

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**INCOMPATIBILIDADE ENTRE O PARADIGMA ATUAL DA
CONSTRUÇÃO E PRINCÍPIOS DE SUSTENTABILIDADE:
PROPOSIÇÃO DE NOVO PARADIGMA**

José Alberto Azambuja

Porto Alegre
2013

José Alberto Azambuja

**INCOMPATIBILIDADE ENTRE O PARADIGMA ATUAL DA
CONSTRUÇÃO E PRINCÍPIOS DE SUSTENTABILIDADE:
PROPOSIÇÃO DE NOVO PARADIGMA**

Tese apresentada ao programa de pós-graduação em engenharia civil da universidade federal do rio grande do sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de doutor em engenharia

Porto Alegre

2013

CIP - Catalogação na Publicação

Azambuja, José Alberto
Incompatibilidade entre o paradigma atual da
construção e princípios de sustentabilidade: proposição
de novo paradigma / José Alberto Azambuja. -- 2013.
334 f.

Orientador: Miguel Aloysio Sattler.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS,
2013.

1. Paradigma da construção de edificações. 2.
Princípios de sustentabilidade. 3. Estrutura geral da
construção. I. Sattler, Miguel Aloysio, orient. II.
Título.

JOSÉ ALBERTO AZAMBUJA

Incompatibilidade entre o paradigma atual da construção e princípios de sustentabilidade: proposição de novo paradigma

Esta tese de doutorado foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA, Área de Construção, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 26 de abril de 2013.

Prof. Miguel Aloysio Sattler
PhD. pela University of Sheffield
Orientador

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
PhD. pela University of Leeds
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Luiz Fernando Mahlmann Heineck (UFC)
PhD. pela University of Leeds

Prof. Vanderley Moacyr John (USP)
Dr. pela Universidade de São Paulo

Prof. Rualdo Menegat (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho (UFRGS)
PhD. pela Universidade de Leeds (Inglaterra)

JOSÉ ALBERTO AZAMBUJA

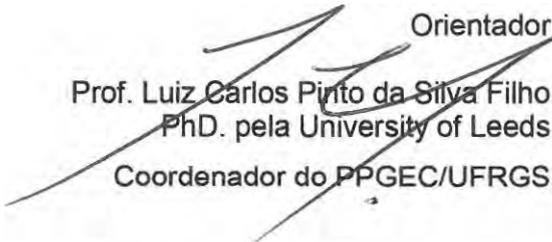
Incompatibilidade entre o paradigma atual da construção e princípios de sustentabilidade: proposição de novo paradigma

Esta tese de doutorado foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA, Área de Construção, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 26 de abril de 2013.

Prof. Miguel Aloysio Sattler
PhD. pela University of Sheffield

Orientador



Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
PhD. pela University of Leeds
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Luiz Fernando Mahlmann Heineck (UFC)
PhD. pela University of Leeds

Prof. Vanderley Moacyr John (USP)
Dr. pela Universidade de São Paulo

Prof. Rualdo Menegat (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho (UFRGS)
PhD. pela Universidade de Leeds (Inglaterra)

Dedico esta tese aos meus pais e especialmente à minha esposa: sem eles, ela não teria existido. Dedico também aos meus filhos e ao meu neto: sem eles, ela não teria sentido.

AGRADECIMENTOS

Nos agradecimentos, todo autor se transmuta temporariamente em altruísta: retém os eventuais erros e compartilha generosamente os acertos de seu trabalho. Não serei exceção, até porque neste caso, a regra se aplica sem risco de engano.

Antes e acima de tudo, expresso a minha profunda e eterna gratidão à minha esposa Inês, incessante em sua demanda para que eu fizesse meu doutorado e me reintegrasse à vida acadêmica, a qual, segundo ela, eu jamais deveria ter abandonado.

Segundo, uma palavra aos meus colegas estudantes do Norie, que me acolheram e fizeram com que minha estada ali fosse muito mais feliz. Gostaria de mencionar alguns com quem compartilhei mais tempo, embora minha amizade e admiração vá para todos indistintamente: O Daniel, a Eugenia, a Luciana, o Mauro, o Anderson, o Santiago, a Amanda, o Fábio, a Daniela e, de modo muito especial, minha grande amiga Lais. Gostaria também de agradecer ao pessoal técnico, especialmente o Airton, por todo o apoio em diversos momentos nos laboratórios do Norie, do Leme e da Cientec.

Agradecimentos são devidos aos professores do Norie, especialmente aqueles com quem tive uma convivência como aluno ou como colega de pesquisa, pela acolhida e disposição de buscar sempre o melhor conhecimento. Gostaria de agradecer a professora Angela, minha primeira orientadora e a professora Denise, por seu constante e incondicional apoio. Gostaria também de agradecer, de modo especial, ao professor Bonin, por todas as conversas e discussões sobre os mais variados assuntos da construção civil. Sem o continuado debate com ele, provavelmente muitas das idéias e proposições desta tese jamais teriam tomado forma. Gostaria também de agradecer ao professor Luiz Carlos, que me acolheu no Leme e com quem espero poder continuar a trabalhar para tornar a construção uma ciência mais exata e uma prática mais sustentável. Gostaria também de agradecer ao professor Luiz Fernando Heineck, por suas opiniões e sugestões desde a qualificação, bem como ao professor Tamagna, de participações pontuais, mas fundamentais, na minha trajetória de doutorando, não somente durante a qualificação mas também na sua decisiva participação no meu processo de ingresso no PPGEC.

Finalmente, gostaria de agradecer imensamente meu orientador, professor Sattler, que heroicamente defendeu, de maneira pioneira no PPGEC, as causas da sustentabilidade em um ambiente muitas vezes hostil. Fica aqui minha admiração e respeito.

Institucionalmente, gostaria de agradecer ao PPGEC por ter aceito um aluno com mais de 50 anos, apesar da resistência de alguns. Gostaria também de agradecer à Capes e à Finep pelos meses de bolsa, fundamentais para a viabilização desta empreitada.

Power in science springs from abstraction

Peter Atkins

RESUMO

AZAMBUJA, J. A. Incompatibilidade entre o paradigma atual da construção de edificações e princípios de sustentabilidade: proposição de novo paradigma. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2013.

Introdução: O macrossetor da construção de edificações causa um significativo impacto sobre o ambiente natural. Tal impacto é gerado em três momentos: produção, uso e descarte das edificações. Embora exista uma crescente consciência na indústria de edificações sobre a necessidade de redução desse impacto, os esforços atuais nesse sentido são limitados devido à incompatibilidade entre o paradigma atual, no qual estão baseadas as práticas da indústria, e os princípios de sustentabilidade a serem incorporados àquela prática. Para que a indústria possa avançar, tornando suas práticas ambientalmente mais sustentáveis, um novo paradigma deve ser formulado para servir de referência à indústria de edificações. **Objetivos:** O objetivo principal desta tese é demonstrar as incompatibilidades entre o paradigma atual que inspira as práticas da indústria de edificações e os princípios de sustentabilidade. Os objetivos secundários são: definir com clareza os conceitos básicos da construção de edificações; formular uma estrutura conceitual que possa incorporar os conceitos básicos de maneira consistente e integrada; compreender o paradigma atual da construção, bem como os princípios que o regem; formular e propor princípios de sustentabilidade que possam ser utilizados no desenvolvimento de soluções tecnológicas para as edificações; elaborar as características essenciais de um novo paradigma, compatível com os princípios de sustentabilidade propostos; definir quais as condições necessárias para que ocorra a transição entre o paradigma atual e o novo paradigma. **Método:** A estratégia de pesquisa adotada foi a pesquisa bibliográfica, combinada com a utilização do método socrático. Essa estratégia foi desdobrada em seis etapas para a condução da pesquisa: 1) Formulação de uma estrutura geral da construção, onde foram explicitados conceitos básicos relacionados ao produto e processo; 2) Descrição do macrossetor da construção segundo o paradigma atual, apresentado como um caso particular do caso geral descrito na primeira etapa; 3) Definição dos princípios de sustentabilidade, estruturados segundo três grandes eixos: integração, perpetuação e otimização; 4) Análise de compatibilidade entre os princípios de sustentabilidade e o paradigma atual; 5) Formulação de novo paradigma compatível com os princípios de sustentabilidade formulados na terceira etapa; 6) Identificação das condições necessárias para que ocorra a transição entre o paradigma atual e o novo paradigma. **Resultados:** O trabalho demonstrou que existem diversas incompatibilidades entre o paradigma atual da construção de edificações e os princípios de sustentabilidade. O estudo também permitiu a formulação de uma estrutura geral da construção de edificações, tanto para o produto, quanto para o processo. Permitiu ainda a caracterização do paradigma atual, bem como a formulação de princípios de sustentabilidade, que poderão orientar as práticas da indústria de edificações, adotadas a partir da formulação do novo paradigma para essa indústria. Finalmente, o trabalho identificou quais as condições necessárias para que ocorra uma transição entre o paradigma atual e o novo paradigma.

Palavras-chave

paradigma da construção de edificações; princípios de sustentabilidade, estrutura geral da construção.

ABSTRACT

AZAMBUJA, J. A. Incompatibility between the present building construction paradigm and sustainability principles: proposition of a new paradigm. Thesis (Doctorate in Civil Engineering) - UFRGS, Porto Alegre, 2013.

Introduction: The construction macro sector, and, more specifically, building construction, causes a relevant impact on the natural environment. Such impact is generated in three different moments: during production, use and discharge of buildings. Although there is a growing consciousness in the building industry about the need to reduce this impact, present day efforts are limited due to the incompatibility between the present paradigm, on which is based the industry activity, and the sustainability principles to be incorporated in that activity. A new paradigm has to be formulated, to serve as reference to the building industry.

Objectives: The main objective of the thesis is to demonstrate the incompatibilities between the present paradigm, that structures the activities of the building industry and the sustainability principles. The secondary principles were formulated in order to make viable the main objective. They are: to clearly define the basic concepts of building construction; to formulate a conceptual structure that can incorporate the basic concepts of building construction, in an consistent and integrated way; to understand the present construction paradigm, as well as the principles that underpin it; to formulate and put forward principles of sustainability that can be used in the development of technological solutions, in the construction of buildings; to define the essential characteristics of a new paradigm, compatible with the sustainability principles proposed; to define which are the necessary conditions for the transition from the present paradigm to the new one; to suggest and evaluate methodologies and technologies, new and existing in other areas of engineering, as to their capacity to incorporate the sustainability principles proposed. **Method:** The research strategy adopted was the bibliographic research, combined with the use of the Socratic Method. This strategy unfolded into six steps for the development of the research: 1) Formulation of a general construction structure, where basic concepts were expressed, related to the product and the process of construction; 2) Description of the macro sector of construction according to the present paradigm, presented as a particular case of the more general case described in the first step; 3) Definition of the sustainability principles, structured according to three main lines: integration, perpetuation, and optimization; 4) Analysis of compatibility between the principles of sustainability and the present paradigm; 5) Formulation of the new paradigm, compatible with the principles of sustainability, formulated in the third step; 6) Identification of the necessary conditions for the transition between the present paradigm and the new one. **Results:** This work has demonstrated that there are several incompatibilities between the present paradigm and the principles of sustainability. Such incompatibilities emerge along the three main lines of organization of those principles. Furthermore, this study also produced the formulation of a general theoretical structure for the construction of buildings, for the product as well as for the process. It also presented the characterization of the present paradigm, as well as a formulation of sustainability principles, which can be used to modify the building industry practices, adopted having the underpinning of a new paradigm for this industry. Finally, the work identified which are the necessary conditions for the transition between the present paradigm and the new one.

Key words

Building construction paradigm; sustainability principles; general framework for construction.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	A SUSTENTABILIDADE DA CONSTRUÇÃO DO AMBIENTE	18
1.1.1	A sustentabilidade na indústria de edificações	26
1.1.1.1	As características básicas das edificações: universalidade de uso e grande volume	26
1.1.1.2	As características derivadas da indústria da construção do ambiente: componentização e variabilidade	27
1.1.1.3	Implicações sobre a sustentabilidade	28
1.1.2	Resposta da indústria da construção às demandas ambientais	32
1.2	QUESTÃO DE PESQUISA	33
1.2.1	Hipótese de pesquisa	33
1.2.2	Refutação da hipótese	34
1.2.3	Justificativa	34
1.2.4	Objetivos	35
1.2.4.1	Objetivo principal	35
1.2.4.2	Objetivos secundários	35
1.2.5	Metodologia	36
1.2.5.1	Definição da metodologia de pesquisa	36
1.2.5.2	Etapas metodológicas da pesquisa	37
1.2.5.3	Limitações da pesquisa	41
1.3	ESTRUTURA DA TESE	41
2	ESTRUTURA GERAL DA CONSTRUÇÃO	44
2.1	ESTRUTURA CONCEITUAL NAS CIÊNCIAS BÁSICAS E NA ENGENHARIA	44
2.2	ESTRUTURA GERAL DA CONSTRUÇÃO DE EDIFICAÇÕES	45
2.3	O PRODUTO EDIFICAÇÃO	46
2.3.1	Conceitos básicos ou ontológicos	49
2.3.1.1	Corpo	50
2.3.1.2	Constituição	50
2.3.1.3	Substância	50
2.3.1.4	Estrutura interna	51
2.3.1.5	Forma	54
2.3.1.6	Geometria	55
2.3.1.7	Escala	56
2.3.1.8	Função	57
2.3.1.9	Perfil energético	60
2.3.1.10	Perfil energético funcional	60
2.3.1.11	Identidade energética e semelhança energética	61
2.3.1.12	Relação entre os conceitos de constituição, forma e função	62
2.3.2	Conceitos complementares ou qualitativos	63
2.3.2.1	Precisão e aleatoriedade	64
2.3.2.2	Homogeneidade e heterogeneidade	65
2.3.2.3	Monofuncionalidade e multifuncionalidade	65
2.3.2.4	Isotropia e anisotropia	66
2.3.2.5	Constância e variação formal	67
2.3.2.6	Espaço dos conceitos complementares	68

2.4	O PROCESSO CONSTRUTIVO	68
2.4.1	Processos constitutivos	70
2.4.1.1	Processos <i>top-down</i>	70
2.4.1.2	Processos <i>bottom-up</i>	71
2.4.2	Processos energéticos	72
2.4.2.1	Formas de energia	73
2.4.2.2	Operações energéticas	74
2.4.2.3	Relações entre as operações energéticas	76
2.4.2.4	Efeitos do sistema sobre as operações energéticas	78
2.4.2.5	Gráficos de processos energéticos	78
2.4.2.6	Aplicação do conceito de processo energético	79
2.4.3	Processos produtivos	87
2.4.3.1	Processos transformativos ou primários	87
2.4.3.2	Processos conectivos ou secundários	94
2.4.3.3	Processos híbridos	105
3	O PARADIGMA ATUAL	106
3.1	O PARADIGMA COMO DEFINIDOR DA REALIDADE	106
3.2	IMPORTÂNCIA E FUNÇÃO DOS CONCEITOS	107
3.3	CONCEITOS BÁSICOS	108
3.4	O PRODUTO EDIFICAÇÃO	109
3.4.1	Classificação dos produtos intermediários da edificação	109
3.4.2	Produtos intermediários da edificação	110
3.4.2.1	Matérias primas	110
3.4.2.2	Materiais de construção	113
3.4.2.3	Componentes	116
3.4.2.4	Elementos	118
3.4.2.5	Subsistemas	120
3.4.2.6	Sistemas construtivos	121
3.4.3	Comparação com outras nomenclaturas	122
3.5	O PROCESSO CONSTRUTIVO	124
3.5.1	Processos constitutivos	124
3.5.1.1	Processos <i>top-down</i>	124
3.5.1.2	Processos <i>bottom-up</i>	124
3.5.2	Processos produtivos	124
3.5.2.1	Processos transformativos	125
3.5.2.2	Processos conectivos	130
3.6	CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DO PARADIGMA ATUAL	132
3.6.1	A dicotomia na edificação	132
3.6.1.1	Causas culturais	133
3.6.1.2	Causas econômicas – a dinâmica do desenvolvimento tecnológico	135
3.6.2	A hegemonia tecnológica da indústria de materiais	135
3.6.2.1	Outras indústrias de transformação	1355
3.6.2.2	O setor de construção de edificações	137
3.6.2.3	Diferentes graus de industrialização nas cadeias produtivas	138
3.6.2.4	A metabolização dos materiais de construção	141
3.6.2.5	A indústria de edificações como polo passivo de tecnologia	142
3.6.3	A centralidade do conceito de material	144
3.6.3.1	O conceito de material, como ideologia	145
3.6.3.2	O material, como um ente abstrato universal	148
3.6.3.3	Relações entre os conceitos de material, forma, função e constituição ...	149

3.6.3.4	Seis conceitos complementares aplicados aos materiais.....	155
4	PRINCÍPIOS DE SUSTENTABILIDADE.....	175
4.1	REVISÃO DA LITERATURA	175
4.2	CONCEITOS SUBJACENTES	179
4.3	CONCEITOS ESTRUTURANTES.....	181
4.4	PRINCÍPIOS DE SUSTENTABILIDADE.....	184
4.4.1	Princípios básicos.....	184
4.4.1.1	Perpetuação	185
4.4.1.2	Otimização.....	186
4.4.1.3	Integração.....	187
4.4.2	Princípios aplicados.....	187
4.4.3	Princípios primários aplicados na relação com o meio.....	187
4.4.3.1	MAER – Mínimo aumento entrópico residual	188
4.4.3.2	Maximização dos benefícios obtidos no meio	193
4.4.3.3	Coevolução.....	194
4.4.4	Princípios secundários de perpetuação aplicados na relação com o meio	196
4.4.4.1	Reciclagem.....	196
4.4.4.2	Estado estável	203
4.4.4.3	Minimização das externalidades negativas	205
4.4.4.4	Banimento de metais.....	207
4.4.4.5	Biodegradabilidade	213
4.4.5	Princípios secundários de otimização aplicados na relação com o meio ..	215
4.4.5.1	Máximo uso de recursos locais	215
4.4.5.2	Mínimo consumo de serviços da natureza	217
4.4.6	Princípios secundários de integração aplicados na relação com o meio..	218
4.4.6.1	Sinergia	218
4.4.6.2	Adequação cultural e econômica.....	219
4.4.7	Princípios primários aplicados na formação da solução.....	219
4.4.7.1	Durabilidade estendida.....	219
4.4.7.2	Eficiência	221
4.4.7.3	Emergência	223
4.4.8	Princípios secundários de perpetuação, aplicados na formação da solução	228
4.4.8.1	Resiliência	228
4.4.8.2	Redundância	229
4.4.8.3	Manutenibilidade	232
4.4.8.4	Robustez	233
4.4.9	Princípios secundários de otimização, aplicados na formação da solução	236
4.4.9.1	Mínimo consumo de energia	236
4.4.9.2	Design biologicamente inspirado – DBI.....	238
4.4.9.3	Customização e personalização	241
4.4.9.4	Desmaterialização	244
4.4.10	Princípios secundários de integração, aplicados na formação da solução	246
4.4.10.1	Estrutura multinível.....	246
4.4.10.2	Processos bottom-up.....	247
4.4.10.3	Multifuncionalidade.....	250

5	AVALIAÇÃO DE COMPATIBILIDADE ENTRE OS PRINCÍPIOS DE SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL E O PARADIGMA ATUAL.....	252
5.1	PROCESSO DE AVALIAÇÃO	252
5.2	O PRINCÍPIO DE PERPETUAÇÃO NO PARADIGMA ATUAL	252
5.2.1	O princípio de perpetuação aplicado na relação com o meio no paradigma atual.....	253
5.2.2	O princípio de perpetuação aplicado na solução no paradigma atual	255
5.3	O PRINCÍPIO DE OTIMIZAÇÃO NO PARADIGMA ATUAL	258
5.3.1	O princípio de otimização aplicado na relação com o meio no paradigma atual.....	258
5.3.2	O princípio de otimização aplicado na solução no paradigma atual.....	261
5.4	O PRINCÍPIO DE INTEGRAÇÃO NO PARADIGMA ATUAL.....	263
5.4.1	O princípio de integração aplicado na relação com o meio no paradigma atual.....	264
5.4.2	O princípio de integração aplicado na solução no paradigma atual	264
5.5	CONCLUSÃO DA AVALIAÇÃO DE COMPATIBILIDADE	267
6	CARACTERÍSTICAS DE UM PARADIGMA COMPATÍVEL COM OS PRINCÍPIOS DE SUSTENTABILIDADE.....	268
6.1	CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES DE UM NOVO PARADIGMA.....	268
6.2	COMPATIBILIDADE DO PARADIGMA COM OS TRÊS EIXOS	269
6.3	ESTRUTURA E DINÂMICA DO MACROSSECTOR DA CONSTRUÇÃO ..	270
6.3.1	Hegemonia da indústria da edificação.....	270
6.3.1.1	Aplicação do princípio da perpetuação, de modo hierarquizado	270
6.3.1.2	Aplicação do princípio da otimização, por meio da coordenação das diversas indústrias do macrossetor da construção.....	272
6.3.1.3	Aplicação do princípio da integração, por meio da coordenação das diversas indústrias do macrossetor da construção.....	273
6.3.2	Eliminação do conceito de material	274
6.3.2.1	Heterogeneidade	274
6.3.2.2	Variação formal	276
6.3.2.3	Anisotropia.....	279
6.3.2.4	Intolerância ao erro.....	281
6.4	PRODUTOS INTERMEDIÁRIOS DA CONSTRUÇÃO DE EDIFICAÇÕES NO NOVO PARADIGMA	282
6.4.1	Matérias primas	283
6.4.2	Componentes nanoscópicos	284
6.4.3	Componentes microscópicos.....	285
6.4.4	Componentes mesoscópicos.....	286
6.5	PROCESSOS DO CICLO DE VIDA DE EDIFICAÇÕES, NO NOVO PARADIGMA	286
6.5.1	Processos produtivos	286
6.5.1.1	Processos transformativos	287
6.5.1.2	Processos conectivos.....	288
6.5.2	Processos degenerativos	288
6.5.2.1	Utilização	288
6.5.2.2	Degradação	289
6.6	DESENVOLVIMENTO DE SOLUÇÕES NO NOVO PARADIGMA.....	291
6.6.1	Modelagem energética	291
6.6.2	O projeto de edificações	293
7	TRANSIÇÃO PARA UM NOVO PARADIGMA	295

7.1	PRINCIPAIS DIFERENÇAS ENTRE OS PARADIGMAS	296
7.2	TRANSIÇÃO NA ESTRUTURA DO MACROSETOR DA CONSTRUÇÃO DE EDIFICAÇÕES	298
7.3	TRANSIÇÃO NAS CARACTERÍSTICAS DOS PRODUTOS INTERMEDIÁRIOS DA EDIFICAÇÃO	298
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	302
8.1	ATENDIMENTO DOS OBJETIVOS PROPOSTOS	302
8.2	SUGESTÃO DE NOVAS PESQUISAS	307
8.3	ÚLTIMAS OBSERVAÇÕES.....	308
	REFERÊNCIAS	308
	APÊNDICE	308

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Quadro com os principais eventos relacionados à sustentabilidade	23
Figura 2: Volume de legislação ambiental nos EUA	23
Figura 3: Crescimento populacional urbano e rural até 2030.....	30
Figura 4: Descrição das etapas da pesquisa.....	38
Figura 5: Conceitos relacionados aos corpos e às relações entre eles.....	49
Figura 6: Telhado de madeira, mostrando os diversos níveis hierárquicos da estrutura.	53
Figura 7: Perfil energético de uma lâmina de vidro, na interação com a luz visível. .	60
Figura 8: Gráfico do perfil energético de uma hidroelétrica.....	61
Figura 9: Três tipos de maçanetas com variação formal.....	67
Figura 10: Espaço dos conceitos complementares.	68
Figura 11: Gráfico geral de operações energéticas que atuam em um sistema.....	77
Figura 12: Gráfico de processo energético do sistema iluminação.	79
Figura 13: Fluxo de materiais, ao longo de seu ciclo de vida comercial.....	81
Figura 14: Fluxo de materiais proposto pela OECD	81
Figura 15: Classificação dos processos produtivos e degradativos.	82
Figura 16: Processos cíclicos.....	85
Figura 17: Processo produtivo geral e na construção de edificações.	86
Figura 18: Classificação dos processos produtivos.....	86
Figura 19: Esquema geral de processos, segundo o paradigma atual.....	125
Figura 20: Escultura de peças cerâmicas de piso, durante o processo de montagem.	131
Figura 21: Uso de pedras em diversos templos.	85
Figura 22: (a) pedra de assentamento; (b) brita; (c) areia de britagem.....	154
Figura 23: Na esquerda, vista aérea da área afetada, antes do vazamento. Na direita, a mesma área, após o vazamento	154
Figura 24: Impacto ambiental de minas. Esquerda: mina de cobre em Berkeley, Montana, USA. Direita: Mina de ferro em Tinden, Michigan, USA	211
Figura 25: (a) planta in natura; (b) feixe de caules; (c) telhado.	227
Figura 26: Gráfico representando o comportamento de um sistema complexo.	235
Figura 27: (a) Árvore e (b) fungo otimizam sua forma para adaptar-se ao ambiente.....	242
Figura 28: Fractais: (a) em uma planta (foto do autor); (b) em um muro externo....	247
Figura 29: Representação esquemática do processo de design emergente.....	249
Figura 30: Soluções que utilizam a abordagem bottom-up: (a) telhado com cobertura orgânica; (b) forro de bambu trançado.	250
Figura 31: (a) Perfis de alumínio com quebra de ponte térmica; (b) Perfil de alumínio sem quebra de ponte térmica.	259
Figura 32: Soluções de edificações onde os materiais são locais e existe integração com o meio: (a) casa tradicional japonesa; (b) oca indígena no Xingú; (c) vila grega.	259
Figura 33: Soluções utilizando tecnologias e materiais universais são indistinguíveis do ponto de vista de sua identidade cultural e geográfica. (a) Osaka, Japão; (b) Manaus; (c) Patras – Grécia.	260
Figura 34: (a) edifícios em Trípoli; (b) edifício em Porto Alegre, sem integração com o meio físico e sem representação da cultura local.	264

Figura 35: Arquitetura tradicional líbia. Edifícios com arcos, feitos com tijolos de adobe e carregados de significado cultural.	265
Figura 36: Prédios em Trípoli com arquitetura ocidental e condicionadores de ar: (a) Aeroporto Internacional de Trípoli; (b) Predio do governo a oeste de Trípoli.	266
Figura 37: Janelas de diferentes formas. em Trípoli	266
Figura 38: Estrutura hierárquica da pata do gegko.	276
Figura 39: Variação formal a) engenharia mecânica; b) aeronáutica; c) eletrônica.	277
Figura 40: Edificações com variação formal, com uso de materiais não industrializados: (a) catedral de Milão; (b) Templo Hinduista Matale em Sri Lanka; (c) Teto da Mesquita Isfahan Lotfollah.	277
Figura 41: Exemplos de edifícios utilizando materiais com constância formal: (a) Terry Building; (b) Federal Building Hamilton.	278
Figura 42: Utilizações de materiais que não seguem a constância formal: (a) Metropol Parasol em Sevilha; (b) Aqua Building, Chicago; (c) Fachada de Pedra; (d) Norie.	278
Figura 43: Variação formal na edificação utilizando componentes que apresentam constância formal: (a) City Hall, Londres; (b) South Asian Human Rights Documentation Centre.	279
Figura 44: Estruturas anisotrópicas biogênicas	280
Figura 45: Estruturas anisotrópicas antropogênicas.	296
Figura 46: Estrutura básica do paradigma atual.	296
Figura 47: Estrutura básica do novo paradigma.	297
Figura 48: Utilização de energia solar	340
Figura 49: Utilização de energia elétrica	340
Figura 50: Utilização de energia química	341
Figura 51: Espectro de radiação solar	342
Figura 52: Gráfico da modelagem energética da solução adotada	343
Figura 53: Operações energéticas utilizando material fosforescente	346
Figura 54: Estrutura multinível do sistema de acumulação de energia elétrica da enguia	349
Figura 55: Sequência de reações químicas para a geração de luz	350
Figura 56: Estrutura e amostra de filme transparente de célula fotovoltaica	353
Figura 57: Separação das diversas radiações do espectro solar	354
Figura 58: Concentrador parabólico composto.	355
Figura 59: Sistema de absorção e condução de energia luminosa	356
Figura 60: Incidência de radiação solar sobre a superfície da terra	359
Figura 61: Complementariedade entre duas formas de energia	361
Figura 62: Placas para absorção de luz direta	362
Figura 63: Uma lente fresnell e detalhe da seção A - A'	363
Figura 64: Espícula gigante de Monorhaphis Chuni.	364
Figura 65: Após passar pelas lentes fresnell, a luz é convergida para um ponto onde é colimada	365
Figura 66: Convergência de diversos feixes de luz colimada, através de espelho côncavo	365
Figura 67: Tronco de cone de absorção de luz difusa.	367
Figura 68: Estruturas hexagonais formadas por conjuntos de cones	368
Figura 69: Esquema do trajeto da luz incidente sobre cada estrutura hexagonal ...	369
Figura 70: Vista superior de uma plaqueta retangular.	369
Figura 71: Condução da luz difusa através das plaquetas quadradas	370

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Conceitos complementares dos produtos intermediários da construção..	64
Quadro 2: Operações energéticas mutuamente excludentes.	777
Quadro 3: Classificação de subsistemas da ISO.	121
Quadro 4: Comparação entre nomenclaturas de produtos intermediários da construção.	123
Quadro 5: Dinâmica do desenvolvimento tecnológico e inovação	129
Quadro 6: Diferenças das quantificações, para processo e produto.	173
Quadro 7: Conceitos adjacentes encontrados em listas de princípios de sustentabilidade.....	180
Quadro 8: Tradução dos conceitos subjacentes em conceitos estruturantes.	182
Quadro 9: Conceitos estruturantes apresentados de maneira hierarquizada.	183
Quadro 10: Possibilidade de projetar propriedades emergentes em sistemas.	225
Quadro 11: Funções que devem ser atendidas pelo envelope.	334
Quadro 12: Exigências e requisitos funcionais para um envelope	335
Quadro 13: Funções a serem atendidas pelo envelope - final	336
Quadro 14: Funções e formas de energia relacionadas.....	337
Quadro 15: Operações energéticas presentes nos sistemas lumínicos utilizando três formas de energia inicial.....	339

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Vida útil das reservas dos principais metais	208
Tabela 2: Redução no consumo de energia pelo uso de sucata.	213
Tabela 3: Comparação entre as condutividades e densidades de vários metais.	347

1 INTRODUÇÃO

1.1 A SUSTENTABILIDADE DA CONSTRUÇÃO DO AMBIENTE

Até duzentos e cinquenta anos atrás, a humanidade seguiu seu curso civilizatório sem que surgissem preocupações maiores sobre a capacidade do planeta de sustentar as atividades humanas. Até ali, estas atividades demandavam energia mecânica, calorífica e luminosa para a produção e conforto, assim como energia química (contida nos alimentos) para a subsistência dos seres humanos e de seus animais. Os processos produtivos que demandavam energia mecânica estavam baseados, quase que exclusivamente, na força humana e animal, com exceção de alguns moinhos de água e de vento. Os processos que envolviam energia calorífica utilizavam prioritariamente lenha, mas em alguns poucos casos, como nas forjarias, era utilizado carvão mineral. A energia luminosa era provida pela queima de madeira e gordura animal e vegetal. Por outro lado, o consumo de bens tinha uma intensidade muito baixa, compatível com a quantidade de energia disponibilizada por aquelas fontes (DURANT; DURANT, 1965).

Naquele momento, a revolução industrial começou a emergir, primeiramente na Inglaterra e, depois, em boa parte da Europa, Estados Unidos e Japão. Nela, diversas tecnologias foram combinadas para alterar, quantitativa e qualitativamente, a forma como o homem passou a se relacionar com a natureza. A energia passou a ser consumida com maior intensidade, sendo extraída, primeiro, de mananciais hídricos, através da construção de barragens, depois, de máquinas a vapor desenvolvidas e aperfeiçoadas principalmente por James Watt com o uso do carvão (DURANT, 1967) e, finalmente, com o uso do petróleo. “A revolução industrial foi, na realidade, uma revolução do uso de energia. Ela abandonou o uso de força humana e animal em favor do uso de energia fóssil” (CHU, 2009). A abundância de minério de ferro e de carvão mineral, na Inglaterra, permitiu a exploração destes minérios naquele país, a qual foi rapidamente intensificada, causando um impacto ambiental com a devastação de áreas rurais antes intocadas e o primeiro grande evento de poluição atmosférica antropogênica em cidades como Manchester (MOSLEY, 2001). O ferro e o aço tornaram-se baratos e passaram a ser utilizados em casas, armas, barcos, equipamentos agrícolas e industriais, locomotivas e linhas férreas. O aperfeiçoamento dos teares mecânicos aumentou enormemente a produção de tecidos (WOODWARD, 1938).

Primeiramente de lã e depois de algodão, os tecidos geraram uma grande demanda por essas matérias primas (DURANT, 1967). Assim, forjou-se o conceito de progresso: o consumo crescente de matéria e energia, utilizadas através de tecnologias cada vez mais sofisticadas e que permitiam maior produtividade. Por duzentos anos, este conceito seguiu de mãos dadas com o paradigma desbravador, explicitado por Liddle (1994), que concebe a atividade humana como um ciclo aberto – o chamado modelo linear - que se inicia com a extração de recursos do meio ambiente e termina quando os resíduos são descartados (CURWELL; COOPER, 1998). Neste paradigma, meio ambiente e desenvolvimento se contrapõem e, conseqüentemente, a preservação do ambiente natural é considerada anti-desenvolvimentista (LIDDLE, 1994). Nas palavras de John, ainda segundo Liddle, “a lógica implícita nesta cultura industrial é que a quantidade de recursos naturais disponíveis é, em termos práticos, infinita e que a natureza é capaz de absorver ilimitadas quantidades de resíduos” (JOHN, 2000, p. 5).

De acordo com um grande e sempre crescente número de autores e instituições, o modelo linear adotado pela civilização industrial nos últimos duzentos e cinquenta anos é insustentável (BRUNDTLAND et al., 1987; UNEP, 1991; MCDONOUGH, 2002; MEADOWS et al., 2004; STERN et al., 2006; UNEP, 2011). Este modelo de desenvolvimento, baseado na extração maciça de recursos naturais e no intenso consumo de energia, precisa, portanto, ser substituído por um novo modelo, construído sobre diferentes premissas. Uma destas premissas consiste em adotar um modelo circular – ou cíclico – que permita, em cada setor de atividade, que os processos ocorram “do berço ao berço”¹ (MCDONOUGH; BRAUNGART, 2002).

O paradigma desbravador, hoje criticado por muitos, foi questionado, talvez pela primeira vez, por Malthus em seu *Essay on the Principle of Population*, escrito em 1798, em que relacionava o crescimento populacional com o crescimento da produção de alimentos, afirmando que o primeiro era geométrico e o segundo aritmético. Sua conclusão foi de que a capacidade de sustentação da humanidade era limitada e que, em algum momento, o consumo da população atingiria a capacidade máxima de produção de alimentos, com graves conseqüências (MALTHUS, 1798). As teses Malthusianas receberam muita atenção e poucos desdobramentos, servindo mais como uma espécie de contraponto a ser desmentido, quando eram mencionados os avanços tecnológicos e a aparentemente ilimitada capacidade da sociedade moderna de gerar riqueza e aumentar seu bem-estar.

¹ A expressão “do berço ao berço” foi alegadamente criada por Walter R. Stahel nos anos oitenta (PRODUCT-LIFE INSTITUTE, 2011).

Foi apenas a partir da segunda metade do século XX que o interesse no tema da sustentabilidade ressurgiu, crescendo a partir de inúmeras iniciativas e acontecimentos ocorridos e incorporando novos conceitos relacionados à ecologia e às teorias de sistemas e de complexidade. O modelo de ciclo aberto passou a ser questionado em diversas frentes, que eram, a princípio, totalmente desconexas. As críticas enfocavam tanto a poluição gerada quanto a degradação ambiental e o consumo desenfreado de recursos finitos. Uma linha do tempo mostrando os marcos (fatos e ações) mais relevantes desse processo histórico, que envolveu muitas instituições e lugares, é apresentada na figura 1. É possível observar, nessa figura, que cada fato ou cada iniciativa ressaltava um aspecto do tema. Entretanto, algumas ações integradoras ocorreram, principalmente, por iniciativa da ONU. Tais ações, como o estudo *Os Limites do Crescimento* (MEADOWS, H. D. et al., 1972), desenvolvido para o Clube de Roma, ou o Relatório Brundtland, que definiu desenvolvimento sustentável como “desenvolvimento que atende as necessidades do presente sem comprometer a habilidade das futuras gerações de atender suas próprias necessidades” (BRUNDTLAND, 1987), permitiram que uma visão mais unificada do campo da sustentabilidade fosse paulatinamente construída.

A ideia de sustentabilidade, como um objetivo que deve ser atingido de maneira integrada através do desenvolvimento econômico, social e ambiental – o chamado desenvolvimento sustentável – tem sido manifestada nos esforços dos diversos organismos internacionais que lidam com esta questão (CIB, 1999). Inicialmente, a sustentabilidade ambiental ganhou maior relevo. Entretanto, com o passar dos anos, a ênfase passou a ser nas três esferas (PAUL, 2008). Apesar desta mudança de enfoque, a importância da esfera ambiental permanece sendo enfatizada na literatura que trata da questão da sustentabilidade na construção civil (NAVARRETE, 2011). Esta ênfase será mantida nesta tese, buscando-se, concomitantemente, a integração com os outros dois campos de sustentabilidade. A justificativa para a ênfase encontra-se no grau de comprometimento do meio ambiente que a construção civil traz, bem como na premência de uma mudança de enfoque nas inovações que ocorrem no setor da construção. Este trabalho tem, portanto, uma preocupação focada no desenvolvimento de soluções tecnológicas para a produção de edificações, baseadas em princípios de sustentabilidade ambiental (principal enfoque), econômica e social. Esses princípios foram formulados a partir da literatura, onde diversos autores também propuseram princípios de sustentabilidade a serem aplicados no desenvolvimento de soluções tecnológicas.

O campo de estudos da sustentabilidade não emergiu, como ocorreu com tantas outras ciências, para satisfazer a curiosidade intelectual dos pesquisadores. Seu surgimento e

posterior proeminência deveram-se, acima de tudo, à necessidade de compreender os fenômenos que passaram a afetar a vida das pessoas de modo intenso e constante. Estes fenômenos foram de dois tipos: desastres ambientais, de impacto imediato, e mudanças paulatinas, de efeito prolongado. Alguns destes fenômenos foram incluídos na linha do tempo da figura 1.

Após a Segunda Guerra Mundial, a economia baseada em um consumo crescente foi alvo de críticas de Packard (1960), que cunhou os termos obsolescência programada e sociedade do desperdício², em seu livro. A partir da década de 70 e, mais especificamente, a partir da conferência de Estocolmo de 1972, tem surgido um número sempre crescente de instituições que tratam da questão ambiental (JABBOUR et al., 2012). Até a década de 90, embora já houvesse uma percepção mais clara da problemática da sustentabilidade, a busca de soluções era ainda extremamente incipiente e, em alguns casos, tinha um caráter apenas reativo ou contestatório. Diversas instituições de preservação da natureza, como o Friends of the Earth, fundado em 1969 e o Greenpeace, fundado em 1971, tiveram este caráter. A partir dessa década, a ciência da sustentabilidade também revelou um caráter propositivo e diversas reuniões de organismos internacionais reconheceram a necessidade de definir princípios de atuação e de avaliação de ações e soluções, em relação à sua capacidade de estimular e promover a sustentabilidade. Dentre estas reuniões, geralmente conferências, as mais marcantes foram as do Rio, em 1992, Kioto, 1997 e Seattle, 2002.

² No original, *throw away society* ou, literalmente, sociedade do jogar fora.

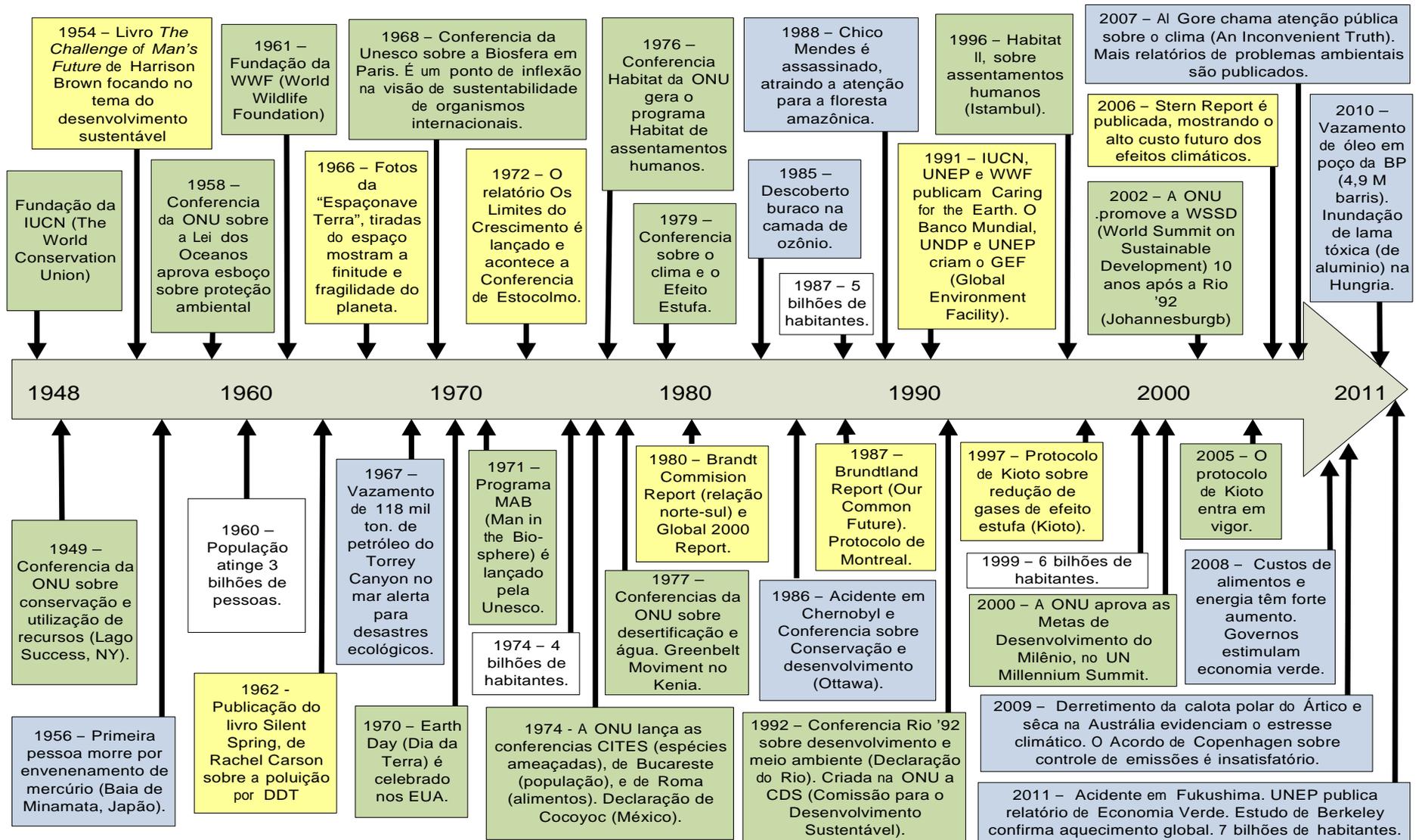


Figura 1: Linha do tempo com os principais eventos que levaram a um aumento da consciência ecológica mundial (Fonte: IISD, 2012).

Além disso, governos de diversos países aumentaram exponencialmente a estrutura legal de controle do impacto ambiental que a atividade humana em geral e industrial em especial geravam. Nos Estados Unidos, o volume de produção de legislação acelerou a partir da década de 1970 (figura 2).

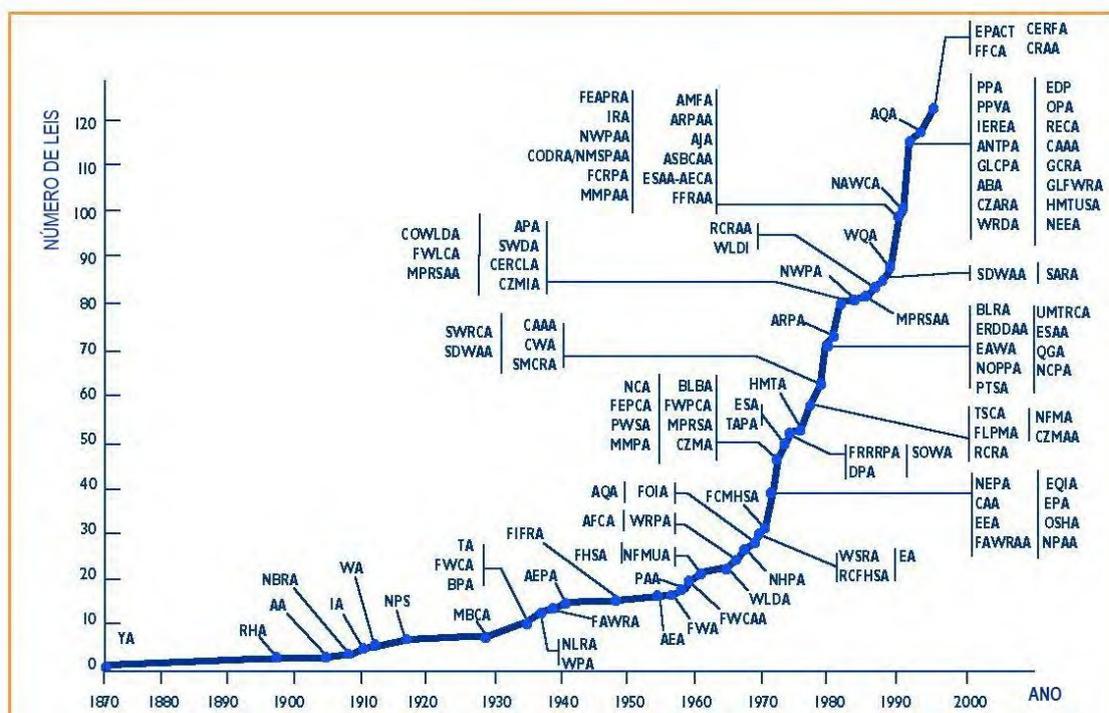


Figura 2: Volume de legislação ambiental nos EUA. (Fonte: SHONNARD, 2001).

O campo da sustentabilidade continua em constante evolução nos dias atuais. E com ele o próprio conceito de sustentabilidade. Nesta tese, o termo sustentabilidade foi conceituado como uma qualidade que um sistema apresenta ao ser capaz de manter suas funções, através dos mesmos processos, por um período de tempo indefinidamente longo. Como afirmou Fiskel (2003), a sustentabilidade não é um estado final que se deve atingir, mas uma característica de um sistema dinâmico que está em evolução.

Entretanto, todo o esforço de governos e organismos multi-governamentais como a Unesco e a UNEP, bem como de ONGs tais como o Greenpeace e o WWF, não terá nenhuma repercussão se a atividade econômica em si não for transformada para incluir a sustentabilidade entre suas premissas de atuação. A crescente consciência da sociedade sobre este fato fez com que a presença da agenda da sustentabilidade na atividade produtiva esteja presente na esfera empresarial, de forma cada vez mais intensa. A sustentabilidade já foi pensada, inclusive, como um componente essencial para a longevidade das empresas (FISKEL, 2003). A Global Reporting Initiative estimula e orienta

empresas a produzirem relatórios de sustentabilidade (GLOBAL REPORTING INITIATIVE, 2011), inclusive fornecendo orientações específicas para diversos setores econômicos em sua página na internet. Neste cenário, um número cada vez maior de empresas, normalmente grandes corporações de diversos setores, têm apresentado relatórios anuais sobre atividades ou políticas corporativas relacionadas à sustentabilidade. Dentre estas empresas, estão algumas das maiores geradoras de degradação ambiental, quer seja na produção de poluentes, na degradação do meio ambiente ou no consumo de recursos finitos. A lista, sempre crescente, inclui setores industriais com alto impacto ambiental, como o de energia fóssil, onde todas as grandes empresas de petróleo, como a British Petroleum (BRITISH PETROLEUM, 2009), a Shell (SHELL, 2006) e a Petrobras (PETROBRAS, 2009), assim como várias empresas menores, tais como a Hess (HESS, 2009). Ela inclui, também, todas as grandes indústrias químicas, tais como a Du Pont (DUPONT, 2008), a Henkel (HENKEL, 2008), a Johnson & Johnson (JONSON&JOHNSON, 2007) e a Roche (ROCHE, 2003), assim como diversas empresas de menor porte.

Por outro lado, indústrias de transformação de diversos setores também estão elaborando seus relatórios anuais, com um destaque para a indústria eletro-eletrônica, com empresas como a Microchip (MICROCHIP, 2010), a Canon (CANON, 2008), a Dell (DELL, 2007), a Lenovo (LENOVO, 2008) e a Epson (EPSON, 2010). O elevado número de empresas deste setor em particular, que apresentam relatórios de sustentabilidade, poderia ser atribuído a uma visão diferenciada dos executivos destas empresas, que têm como uma de suas premissas básicas desenvolver soluções com um consumo mínimo de matéria e energia, ou seja, elas incorporaram princípios de sustentabilidade em sua filosofia de negócio.

Além das grandes empresas (algumas com seu *core business* claramente dissociado da questão ambiental), alguns empreendimentos com uma visão francamente sustentável estão presentes. Como exemplo destes últimos, podem ser citadas empresas que comercializam produtos orgânicos (WEDGE, 2010) e reciclam os produtos de outras empresas (RECELLULAR, 2006; WASTE MANAGEMENT, 2008). Enfim, estão presentes os bons (empresas e instituições cujo foco é a sustentabilidade), os maus (empresas com alto impacto ambiental, que tentam dissimular tal impacto com relatórios) e os feios (empresas com algum impacto ambiental, que apresentam seus relatórios porque isto valoriza suas ações no mercado)³.

³ A expressão “os bons, os maus e os feios” faz referência ao clássico filme do gênero western spaghetti “*The Good, the Bad and the Ugly*” de 1966, dirigido por Sergio Leone.

Um cenário pode ser apreendido dos relatórios publicados pelas empresas dos diversos segmentos econômicos. Elas tentam construir uma agenda, encontrando pontos comuns entre uma prática focada em critérios econômicos e gerenciais tradicionais, e uma perspectiva ambiental com valores bastante distintos. Esta agenda comum gira em torno de três pontos: redução de desperdícios, inovação tecnológica e controle de fontes poluidoras. Esta agenda também é defendida pelos autores do livro *Natural Capitalism*. O argumento principal, que percorre todo o livro, afirma que a produtividade dos recursos pode ser aumentada até cem vezes, ou mais, visto que as tecnologias mais utilizadas atualmente nos diversos setores produtivos geram muitos desperdícios. O aumento de produtividade viria, basicamente, através de inovações de diversos tipos, mas, essencialmente, de inovações tecnológicas (HAWKEN et al., 1999). Embora este tipo de visão seja um avanço em relação à prática usual de negócios, duas limitações são detectáveis. Primeiro, fica implícito nesta abordagem a limitação de fazer o que é possível, desde que o lucro seja mantido ou (preferencialmente) aumentado. Neste caso, quando um conflito de interesses apresenta-se como irresolúvel, a abordagem encontra seus limites (JABBOUR et al., 2012). Segundo, esta abordagem não apresenta um mapa, não propõe um processo sistemático para encontrar soluções ou para avaliar quais soluções são mais benéficas do ponto de vista da sustentabilidade. As opções são avaliadas por um critério de sustentabilidade que enfatiza os aspectos positivos, tais como a reciclagem ou o menor consumo de material e/ou energia, mas tende a esquecer os aspectos negativos trazidos pela própria solução tecnológica. Assim, o alumínio, por exemplo, pode ser considerado como ambientalmente mais correto do que a madeira, porque poupa o corte de árvores e pode ser reciclado, mas também pode ser considerado incorreto, porque consome uma grande quantidade de energia e agride o meio ambiente nos processos de extração e beneficiamento. Em casos como este, existem argumentos para todos os gostos e eles são utilizados de acordo com os interesses de quem os evoca.

No macrossetor da construção civil, algumas indústrias reciclam os subprodutos ou resíduos de seu próprio segmento, como no caso do aço e do vidro, além de reciclarem de outros segmentos, como no caso da indústria do cimento. Estas práticas causam uma substancial redução no impacto causado pela atividade produtiva destes segmentos, tanto no que se refere aos danos causados no meio ambiente pela extração de matérias primas e descarte de resíduos, quanto ao menor consumo de energia para a produção.

Com relação a empresas de engenharia civil, inicialmente apenas algumas dentre as maiores do mundo apresentaram relatórios de sustentabilidade. Existe, entretanto, uma clara tendência de seguir o exemplo de outros setores, com uma atenção crescente às

questões ambientais e uma agenda com enfoque muito semelhante ao apresentado por aquelas empresas, com ênfase na questão do desperdício. No Brasil, diversas empresas de construção já produzem seus relatórios anuais. Dentre elas, encontram-se Even, Galvão, Camargo Correa, Tecnisa, Mendes Junior, Rossi, Andrade Gutierrez e Y. Takaoka (GLOBAL REPORTING INITIATIVE, 2013). Um exemplo a ser destacado é a empresa sueca Skanska. Seu esforço em desenvolver soluções mais sustentáveis, através de diversas práticas de construção, mostra uma preocupação legítima com a minimização do impacto ambiental gerado por suas atividades. Um exemplo desta preocupação é o caderno *Material Revolution*, que mostra a utilização mais sustentável de quatro materiais extensivamente utilizados pela indústria da construção: madeira, concreto, plásticos e palha (SKANSKA, 2011). Porém, a prática da esmagadora maioria das empresas permanece a mesma de décadas passadas, apenas com mudanças pontuais e periféricas, quase cosméticas. Ou seja, a inovação tecnológica com vistas à sustentabilidade, estimulada em outros setores, permanece bastante modesta no setor da construção. As causas deste fraco interesse na inovação, os princípios que devem guiá-la e a capacidade do setor de seguir estes princípios são enfocados no presente trabalho.

1.1.1 A sustentabilidade na indústria de edificações

1.1.1.1 As características básicas das edificações: universalidade de uso e grande volume

Segundo John (2000, p. 5), “na...sociedade industrial...a função da construção civil é a transformação do ambiente natural no ambiente construído, adequado ao desenvolvimento das mais diversas atividades”. Esta transformação é materializada em diversas estruturas físicas - dentre elas as edificações - e é obtida através do emprego de tecnologias específicas, utilizando matérias primas retiradas dos ambientes natural e antropogênico. As edificações apresentam duas características especiais, que condicionam as soluções tecnológicas empregadas na sua produção. A primeira característica é a universalidade de seu uso. A habitação não é um bem de consumo opcional, mas uma necessidade e um direito de todos, já definida no artigo 25, da Declaração Universal dos Direitos Humanos (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, 1948). Além disto, a maioria das atividades laborais e muitas atividades recreativas necessitam, também, ser conduzidas dentro de uma edificação. A segunda característica é o grande volume do produto edificação. Toda a edificação que abriga seres humanos em atividade tem, obrigatoriamente, a escala do espaço que pode acomodá-lo e protegê-lo nesta atividade. Esta necessidade de grande volume difere daquela de outros bens de consumo e produção, cuja funcionalidade, em boa parte, independe da escala antropométrica. Ao contrário da edificação, o tamanho e peso destes outros bens, como, por exemplo, os dedicados ao processamento de informações,

podem ter sua escala reduzida em função da tecnologia disponível para a fabricação de suas partes internas, permitindo uma evolução que busca constantemente sua miniaturização. Nestes casos, é somente na interface com o ser humano – escrever e ler a informação – que a escala antropométrica passa a ser importante (RAMSDEN, 2009). Soma-se a isso o aumento contínuo na área útil das residências, observada em países desenvolvidos, como no caso dos Estados Unidos, onde a área média de novas residências cresceu de 141,7 m² em 1973, para 201,5 m² em 2010 (US CENSUS BUREAU, 2013). Ou no caso da Austrália, onde a área média das residências cresceu de 149,7 m² entre 1984-95 para 205,7 m² entre 2002-03 (AUSTRALIAN BUREAU OF STATISTICS, 2013).

Tomadas em conjunto, as duas características (universalidade de uso e grande volume) trazem algumas implicações importantes. O grande volume de material necessário para a produção de cada edificação, multiplicado pelo grande número de edificações, faz com que o impacto econômico desta atividade seja imenso. De fato, o setor da construção de edificações constitui parcela importante do PIB dos países, sendo, portanto, fundamental para o desenvolvimento da economia. No Brasil, toda a cadeia de produção contribuiu com 9,3% do PIB, em 2009 (ABRAMAT/FGV, 2010), sendo que apenas o setor de construção, propriamente dito, representou aproximadamente 5,7% do PIB naquele ano, constituindo entre 50 e 70% da formação bruta de capital fixo (CBIC, 2011), seguindo um padrão histórico, já que o setor foi responsável por 65% da formação de capital bruto no período entre 1980 e 1996 (ABIKO et al., 2003). Em termos mundiais, o setor utiliza uma enorme quantidade de recursos, consumindo, anualmente, mais de um terço das matérias primas, e em torno de 10% da energia é consumida na produção de materiais de construção. (UNEP, 2011). Além disto, os resíduos de construção e demolição contribuem com cerca de 40% de todos os resíduos sólidos gerados nos países desenvolvidos. Deste total, a maior parte é proveniente da demolição de edifícios. (UNEP SBCI, 2010).

1.1.1.2 As características derivadas da indústria da construção do ambiente: componentização e variabilidade

O grande volume característico da edificação fez com que, em cada instante e lugar ao longo da história, ela fosse o maior, mais caro e mais importante artefato construído pelo ser humano (PILE, 1979; McLENNAN, 2004), para uso individual, familiar ou coletivo, com a possível exceção de barcos (que também podem ser considerados edificações flutuantes). Este problema de escala faz com que a edificação não possa ser construída monoliticamente, como um pote ou uma pequena canoa esculpida de uma árvore, nem ao menos que seja, na maioria dos casos, produzida de um único material (como os tecidos), onde se aplica universalmente um único processo de ligação entre as partes (a costura). A

edificação normalmente é construída em uma série de etapas e, de maneira geral, através da superposição de partes individuais, desempenhando diferentes funções e sendo constituídas de distintos materiais, as quais vão sendo sistemática e ordenadamente agregadas ao conjunto, sendo ligadas (conectadas) a este conjunto e dele passando a fazer parte, interagindo com as outras partes. Ou seja, as ligações entre as partes de uma edificação são uma necessidade que emerge da própria escala do conjunto, com uma exigência de funcionalidade cuja otimização é atingida através de uma complexa combinação das diferentes partes com diferentes funções e das interações entre elas.

A necessária universalização das edificações foi obtida através de uma adequação das soluções às características do ambiente onde cada grupamento humano se fixou, gerando uma variabilidade tecnológica, consequência da necessidade de utilizar os materiais disponíveis em cada local para a construção dos edifícios, bem como de atender as necessidades decorrentes do clima e as características do terreno. Este processo de adaptação estimulou a busca de novas formas de produção, transporte e ligação entre estes materiais, no mínimo tão variadas quanto as combinações possíveis entre diferentes materiais, climas e terrenos de diferentes regiões. Deve-se ainda somar (ou talvez multiplicar) estas variações pela ocorrência, ou não, de fenômenos naturais, como terremotos, inundações e furacões, que exigiram adaptações específicas, bem como pelas características culturais de cada povo e pela utilização que deram às edificações (por exemplo, nômades e sedentários davam diferentes significados, funções e características às suas edificações). Isso tudo significa que a edificação e seu processo produtivo são extremamente variados. Entretanto, esta variabilidade vem sendo paulatinamente reduzida pelo crescente processo de industrialização e universalização nas características dos materiais utilizados, com importantes implicações para a sustentabilidade do setor.

1.1.1.3 Implicações sobre a sustentabilidade

O alto consumo de materiais demandados pela indústria da edificação e de energia para o seu processamento e transporte, decorrentes das características de universalidade de uso e grande volume, causa, evidentemente, um grande impacto no meio ambiente, com graves implicações para os processos naturais que ocorrem na biosfera. Estas implicações são sentidas tanto na exploração de recursos não renováveis como na poluição gerada, sendo o macrossetor da construção responsável pela emissão de aproximadamente 40% de gases de efeito estufa, além de gerar entre 40 e 50% de todos os resíduos sólidos antropogênicos. Em termos mundiais, é estimado que a indústria da construção, como um todo, consuma em torno de 60% de todos os recursos extraídos da crosta terrestre (WORLDWATCH INSTITUTE, 2005), destruindo-a, desta forma, mais do que qualquer outra indústria. Ela

também é responsável por metade do dióxido de carbono gerado por atividades humanas e lançado na atmosfera (SAN-JOSÉ, 2007). Esta indústria produz grandes quantidades de resíduos, a maioria dos quais irá se acumular, sem nenhuma utilidade, em aterros. Devido às características de componentização e variabilidade, os resíduos gerados em uma demolição apresentam grande variabilidade de volume e de materiais utilizados, impedindo, assim, um tratamento único para todo o volume gerado. Além disso, a pressão sobre o meio ambiente não está estabilizada. Estima-se um aumento de mais de 1 bilhão de pessoas na população mundial entre 2000 e 2015. Atualmente, há um crescimento vegetativo anual que gira em torno de 73 milhões de pessoas (BANCO MUNDIAL, 2011). Sendo necessários, segundo a NASA, aproximadamente 19 m^3 , por pessoa (NASA, 2006), haverá, nos próximos anos, um incremento anual de demanda de aproximadamente 1,5 bilhões de metros cúbicos de volume habitável, um número quase astronômico, cujo impacto futuro sobre o meio ambiente é autoevidente. Além do crescimento vegetativo, o mundo assiste a um processo de urbanização acelerado, especialmente nos países em desenvolvimento, cujo impacto em termos de demanda por edificações tende a ser superior ao do próprio crescimento vegetativo. A população urbana tenderá a crescer dos atuais 3,5 bilhões para até 6,3 bilhões em 2050 (RYDIN et al., 2012). A figura 3 mostra uma estimativa para as populações rural e urbana até o ano de 2050, onde pode ser observado o crescimento exponencial da população urbana, fruto da combinação de crescimento vegetativo e migração do campo. Some-se, ainda, um terceiro aspecto, relacionado à demanda reprimida por habitação, principalmente em países não desenvolvidos, causado pelas sub-habitações. Existem, hoje, aproximadamente 1 bilhão de pessoas vivendo em favelas e que precisam obter moradia decente (SATTERTHWAITE, D., 2007).

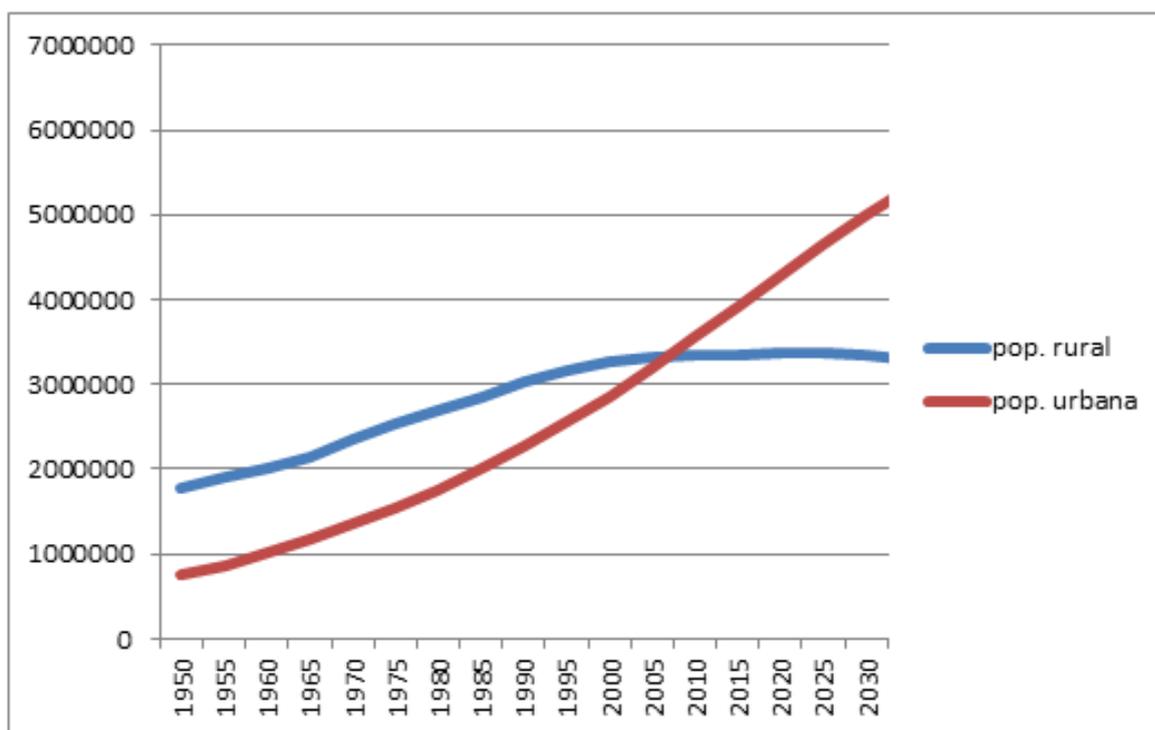


Figura 3: Crescimento populacional urbano e rural até 2030. (Fonte: ONU, 2006).

Apesar do enorme e crescente impacto da indústria de edificações sobre o meio ambiente, as soluções tecnológicas desenvolvidas atualmente para a construção civil não colocam a questão da sustentabilidade no centro do processo de desenvolvimento de soluções. De fato, elas obedecem a uma visão mais restrita, devendo atender apenas a um conjunto de demandas específicas dos usuários, que não leva em consideração as questões de sustentabilidade (JOHN; SATO, 2006). Um conjunto de tais demandas, proposto pela norma ISO 6241 (1984, p. 4), de duas décadas atrás, enfatiza características consideradas desejáveis aos materiais, componentes, elementos e subsistemas das edificações, tais como durabilidade, boa resistência mecânica aos esforços, resistência às intempéries e ao fogo e superfícies geometricamente planas. Estas características devem ser combinadas com a capacidade de controle de diversas condições ambientais, tais como luz, umidade, temperatura e fumaça, sendo verificadas através de ensaios padronizados, normalmente referenciados em normas de desempenho para cada tipo de material, componente, subsistema ou para o sistema edificação como um todo. Tais normas, assim como a tecnologia desenvolvida e utilizada no desenvolvimento e na produção de materiais da edificação, estão baseadas em um paradigma, que, em larga medida, permanece implícito, como será visto no Capítulo 3 deste trabalho.

A ABNT lançou recentemente a norma NBR15575-1 (ABNT, 2008), que trata do desempenho de edifícios. No capítulo 18, esta norma trata da adequação ambiental das

edificações, o que demonstra que a preocupação com o tema da sustentabilidade já chegou ao âmbito normativo da construção no Brasil. Entretanto, as preocupações expressas nesta norma, além de serem inespecíficas e de um caráter paliativo, demonstram claramente que ela ainda está referenciada no mesmo paradigma da norma ISO. Em termos mundiais, o processo de avaliação de impacto ambiental das edificações mais amplamente utilizado é o LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), processo de avaliação e certificação promovido pelo US Green Building Council (USGBC, 2012). Embora fundamental para promover a sustentabilidade na indústria de edificações, o LEED, sendo um processo de avaliação, não faz uma análise aprofundada das características dessa indústria e não indica as limitações estruturais que ela apresenta na implementação de soluções sustentáveis. Por outro lado, este e outros programas também não apresentam uma base conceitual sobre a qual seja possível desenvolver soluções de produto e processo.

Ao considerar-se a indústria da construção de edificações como um sistema e buscar-se sua sustentabilidade, o custo final real das edificações ganha um novo significado. Neste ponto emerge o conceito de externalidade⁴, definida como a diferença entre o custo (ou benefício) de um bem para o agente que o produz e o custo (ou benefício) do mesmo bem para a sociedade em geral. Quando um bem gera impacto ambiental que não é revertido ou compensado por quem o gerou, isto significa que uma parte do custo total de produção do bem não foi paga pelo agente que produziu o bem (nem pelo agente que consumiu o bem), mas pela sociedade, como um todo. Em relação aos processos construtivos, sabe-se hoje que este custo pode ser muito maior do que o preço pago contabilmente pela edificação. A indústria de edificações cobra dos sistemas naturais o fornecimento do que se convencionou chamar de serviços da natureza, ou serviços dos ecossistemas (ESA, 1997), na forma de fornecimento de minerais, madeira, oxigênio e outros, além da degradação de diversos resíduos orgânicos gerados por suas atividades. Essa demanda ambiental, caracterizado e quantificado pelo conceito de pegada ecológica (EWING, B. et al, 2010), tem sido investigado, levando em consideração os diversos materiais utilizados na edificação e os variados processos empregados na sua produção. Ao estressar os sistemas naturais além de sua capacidade de autoregeneração, surge um “déficit ambiental” criado pelo setor, que tende a se acumular, agravando a atual situação até o eventual colapso desses sistemas.

⁴ Conforme o conceito expresso por Pigou (PIGOU, 1932). Na sua formulação mais ampla, uma externalidade pode expressar um custo ou benefício, que não precisa ser econômico, mas pode ser expresso em outras variáveis, tais como conforto, segurança ou conhecimento.

1.1.2 Resposta da indústria da construção às demandas ambientais

A produção atual da indústria da edificação, incluindo a industrialização de materiais e componentes, projeto e construção de edificações, utiliza tecnologias que estão baseadas em premissas que não podem mais ser validadas no mundo atual. Tais premissas são: acesso ilimitado a recursos não renováveis, disponibilidade de grandes quantidades de energia barata e capacidade dos sistemas naturais de absorver quantidades infinitas de resíduos não biodegradáveis e tóxicos. Essa perda de validação está presente sob uma perspectiva econômica, ambiental ou política. Como consequência dessa condição, a sustentabilidade ambiental da indústria da edificação ficará inviabilizada no longo prazo se as tecnologias atuais permanecerem em uso de maneira hegemônica. Além do que, isto acabaria acarretando, também, sua inviabilidade técnica.

Sattler e Pereira (2006, p.6) propõem três estratégias para o desenvolvimento de tecnologias ambientalmente mais compatíveis, com um enfoque visando a sustentabilidade: “a) reduzir e otimizar o consumo de materiais e energia; b) reduzir os resíduos gerados; e c) preservar e, na medida do possível, melhorar a qualidade do ambiente natural e construído”. Essas importantes estratégias são de caráter geral e devem, portanto, ser traduzidas em propostas mais específicas, que consigam expressá-las em tecnologias a serem aplicadas nas edificações.

De modo geral, as propostas apresentadas até o momento são basicamente de três tipos: a) soluções de baixo impacto ambiental e de baixa densidade tecnológica, envolvendo a utilização de madeira, fibras vegetais e adobe, entre outros materiais (SATTLER, 2007); b) soluções de mitigação dos efeitos da tecnologia, através de reciclagem e reuso de resíduos e subprodutos industriais em geral e da própria indústria da construção, de modo a reduzir a pressão sobre as fontes de matérias primas e o impacto ambiental da indústria da construção (JOHN, 2000); c) soluções que reduzem o impacto ambiental durante o uso da edificação, tais como utilização de energia solar e aproveitamento da água da chuva para diversos usos na edificação, tratamento local de águas negras e cinzas e permacultura. (SATTLER, 2007). Tais iniciativas são altamente meritórias nos seus propósitos e devem ser uma opção preferencial em situações específicas, mas não podem, sozinhas, substituir o grande volume de edificações produzidas com as tecnologias atuais, seja porque são caracteristicamente de baixa densidade, como no primeiro caso, ou porque os seus materiais são baseados em resíduos e, portanto, limitados em volume, como no segundo caso, ou porque se aplicam ao uso da edificação e não à sua produção ou descarte, como no terceiro caso. Além destas soluções específicas, as diversas respostas da indústria da construção, principalmente aquelas de tecnologias mais sofisticadas, sofrem de uma

limitação mais profunda e importante. Praticamente todas elas compartilham o mesmo paradigma com a tecnologia atual. Isto significa que o modo de ver a questão construtiva e as possibilidades de solução dele derivadas estão condicionados por este paradigma e são, portanto, limitados por ele. Mesmo os especialistas que tentam se libertar do paradigma atual, particularmente na questão dos materiais, têm dificuldade em formular soluções em um novo paradigma que contemple as possibilidades que emergem das novas descobertas e desenvolvimento nas áreas da nanotecnologia e da biomimética. Ashby e Johnson (2011, p. 10), por exemplo, acreditam que “se o século XX é visto como a era dos materiais volumosos e tridimensionais, o século XXI será aquele das superfícies, monocamadas, mesmo moléculas individuais, e a nova funcionalidade que estas permitem”. Mas não apresenta uma visão abrangente, um esboço do que seria um novo paradigma orientador de novas soluções.

Esta pesquisa tentará mostrar que, diferentemente do que pensam Ashby e outros pesquisadores, que ainda estão enraizados no paradigma dos materiais, este século será o século das estruturas multi-nível biodegradáveis, multifuncionais, com variabilidade da forma, constituição heterogênea, especificidade local e drástica redução na aceitação do erro⁵.

1.2 QUESTÃO DE PESQUISA

Colocado o quadro de referência, a presente pesquisa tentou responder à seguinte questão: Poderão os princípios de sustentabilidade, desenvolvidos e propostos nesta tese, ser empregados pela indústria da construção estruturada segundo o seu paradigma atual, de maneira a obter um desenvolvimento sustentável do setor, consideradas as três esferas da sustentabilidade (ambiental, econômica e social)?

1.2.1 Hipótese de pesquisa

A pesquisa formula a hipótese de que os princípios de sustentabilidade da construção não são compatíveis com o paradigma atual. Conseqüentemente, não podem ser integralmente aplicados pela indústria da construção enquanto ela estiver baseada nesse paradigma. Assim, para que os princípios sejam aplicados, é necessário que o paradigma seja substituído por outro, compatível com os mesmos.

⁵ O erro é considerado aqui como manifesto no comportamento estocástico das variáveis determinísticas de projeto. Este comportamento incita um tratamento probabilístico dessas variáveis, característico do atual paradigma, como será visto no capítulo 3.

1.2.2 Refutação da hipótese

Em lógica, se a hipótese é “ter algum A”, sendo A uma incompatibilidade, não A é traduzido como “não ter algum A”. Para a refutação da hipótese, portanto, não é necessário demonstrar que não há incompatibilidades (que elas não são possíveis) entre o paradigma atual e os princípios de sustentabilidade. Será necessário apenas que não sejam encontradas tais incompatibilidades.

1.2.3 Justificativa

Um estudo sobre a sustentabilidade na construção de edificações se justifica ao menos em três níveis. Em um nível mais amplo, a questão da sustentabilidade, embora venha recebendo, nas últimas duas décadas, considerável atenção por parte da academia, é, ainda, um campo de estudos não consolidado, com muitas e importantes divergências em relação a diversos aspectos envolvidos. Portanto, todos os estudos sobre o tema, desenvolvidos com base no método científico, devem ser bem-vindos.

Em um segundo nível, focado no macrossetor de construção de edificações, o estudo se justifica pela necessidade de compreender como a indústria da construção, entendida aqui como todo o arco de indústrias, desde aquelas envolvidas na extração de matérias primas, até a indústria de edificações propriamente dita, está estruturada, e qual sua capacidade de responder às demandas de um paradigma baseado na sustentabilidade. Além disto, a investigação dos valores que permeiam, tanto a prática da indústria da construção, quanto a atividade acadêmica que lhe dá sustentação teórica, tem sido extremamente limitada.

Finalmente, em um terceiro nível, de desenvolvimento de soluções compatíveis com um eventual novo paradigma da sustentabilidade, o estudo se justifica ao formular princípios que devem ser utilizados para guiar o desenvolvimento sustentável a partir de novas soluções tecnológicas. O autor não encontrou na literatura uma descrição clara do paradigma atual, nem se ele é capaz de incorporar os princípios de sustentabilidade a serem propostos para o desenvolvimento destas tecnologias. Entende-se aqui incompatibilidade como uma contradição entre a lógica do paradigma e o princípio em questão. Por exemplo, se a lógica do paradigma estimula inovações tecnológicas geradas exclusivamente pelos fabricantes de materiais de construção, sem interação com as empresas de construção, esta lógica gera uma incompatibilidade entre o paradigma e o princípio de otimização, que busca o máximo benefício para todos os participantes da cadeia produtiva, inclusive os usuários finais. Por outro lado, embora alguns autores já tenham

propugnado alguns princípios (VANEGAS, 1995; MEDINECKIEN, 2010), que serão analisados no seu devido tempo, não existem princípios claros de sustentabilidade a serem seguidos em um eventual novo paradigma da construção e que possam ser utilizados diretamente no desenvolvimento de novas tecnologias. Afinal, como disse Moehlecke (2010, p. 17), “a expressão desenvolvimento sustentável é uma abordagem ainda em construção, repercutindo, muitas vezes, em críticas e controvérsias, sendo frequentemente criticada por seu caráter propositivo pouco operacional.”

1.2.4 Objetivos

1.2.4.1 Objetivo principal

Avaliar as incompatibilidades entre o atual paradigma e os princípios de sustentabilidade propostos nesta tese.

1.2.4.2 Objetivos secundários

Definir com clareza os conceitos básicos da construção de edificações.

Formular uma estrutura conceitual que possa incorporar os conceitos básicos da construção de edificações, de maneira consistente e integrada.

Compreender o paradigma atual da construção, bem como os princípios que o regem.

Formular e propor princípios de sustentabilidade que possam ser utilizados no desenvolvimento de soluções tecnológicas na construção de edificações.

Elaborar as características essenciais de um novo paradigma compatível com os princípios de sustentabilidade propostos.

Definir quais as condições necessárias para que ocorra a transição entre o paradigma atual e o novo paradigma.

Propor e avaliar metodologias e tecnologias novas e existentes em outras áreas de engenharia, quanto à sua capacidade de incorporar os princípios de sustentabilidade propostos.

1.2.5 Metodologia

1.2.5.1 Definição da metodologia de pesquisa

A metodologia deste estudo é teórica, pois não envolve experimentos. Além disso, é uma pesquisa qualitativa, pois ele não envolve experimentos ou medições de quaisquer quantidades, nem tenta correlacionar quantitativamente quaisquer fenômenos, o que a caracterizaria como quantitativa. Entretanto, ela não apresenta uma característica comum em pesquisas qualitativas, que é a subjetividade ou a participação do pesquisador. Pesquisas qualitativas podem ser, dentre outras, descritivas (WALLIMAN, 2001). Pesquisas descritivas baseiam-se na ideia de observação dos fenômenos, sem uma preocupação em controlá-los. Este tipo de pesquisa pode ter um caráter de avaliação, que busca representar construções com significado, criadas por grupos de indivíduos para lidar com a realidade (CLARKE, 2005), como é o caso do paradigma da indústria da construção. Finalmente, de acordo com Berto e Nakano (1998), a pesquisa qualitativa obtém dados através de observação direta, entrevistas, análise documental e questionários. Dentre estes, a presente pesquisa utilizou os três primeiros instrumentos de coleta de dados. Esta pesquisa pode, então, ser classificada como teórico-conceitual qualitativa de avaliação. No processo investigativo, foi utilizado um método de compreensão da realidade, conhecido como método socrático.

O método socrático foi obviamente desenvolvido e utilizado inicialmente por Sócrates⁶. Ele consiste em um processo investigativo, onde a busca da verdade é feita através da análise dos conceitos utilizados para descrever a realidade. Esta análise é realizada através do diálogo, onde um interlocutor propõe um conceito ou definição, enquanto outro (originalmente Sócrates) questiona a extensão da validade (ou aplicabilidade) do conceito, bem como sua exatidão. O método também é extremamente útil para revelar todas as premissas e imprecisões, que normalmente ficam implícitas na formulação e utilização de conceitos. Para que se tenha sucesso na aplicação do método, além do mais alto grau de alerta mental, são necessárias três qualidades básicas, segundo Vlastos (apud PHILLIPS, 2001): sinceridade, humildade e coragem. Phillips (2001) propõe a substituição de sinceridade por honestidade, porque alguém pode manter com sinceridade sua convicção sobre um conceito, sem honestamente buscar todas as possibilidades de escrutínio daquele conceito (PHILLIPS, 2001).

⁶ Filósofo grego do século 4 A.C, não deixou trabalhos escritos. Seu principal discípulo, Platão, foi responsável por registrar os diálogos de Sócrates.

Os acadêmicos da área filosófica chamam o método socrático de 'elenchus', que significa investigação, ou acareação, em grego. Neste método, as visões e convicções de cada participante do diálogo são questionadas e postas à prova, tanto com relação à sua consistência lógica interna, como com relação aos fatos objetivos da realidade, preferencialmente fatos que tenham sido obtidos através do método científico. "O método socrático requer que – honestamente e abertamente, racionalmente e imaginativamente – [os participantes] confrontem o dogma perguntando questões como: O que isto significa? O que está a favor e contra? Existem maneiras alternativas de considerar as coisas, que são mais plausíveis e aceitáveis?" (PHILLIPS, 2001, p.22). O resultado desta etapa foi a formulação inicial de uma estrutura genérica da produção de edificações que, depois, sofreu diversos ciclos de aprimoramento.

1.2.5.2 Etapas metodológicas da pesquisa

A metodologia de pesquisa consistiu em seis etapas fundamentais, conforme a figura 4. As etapas são descritas abaixo.

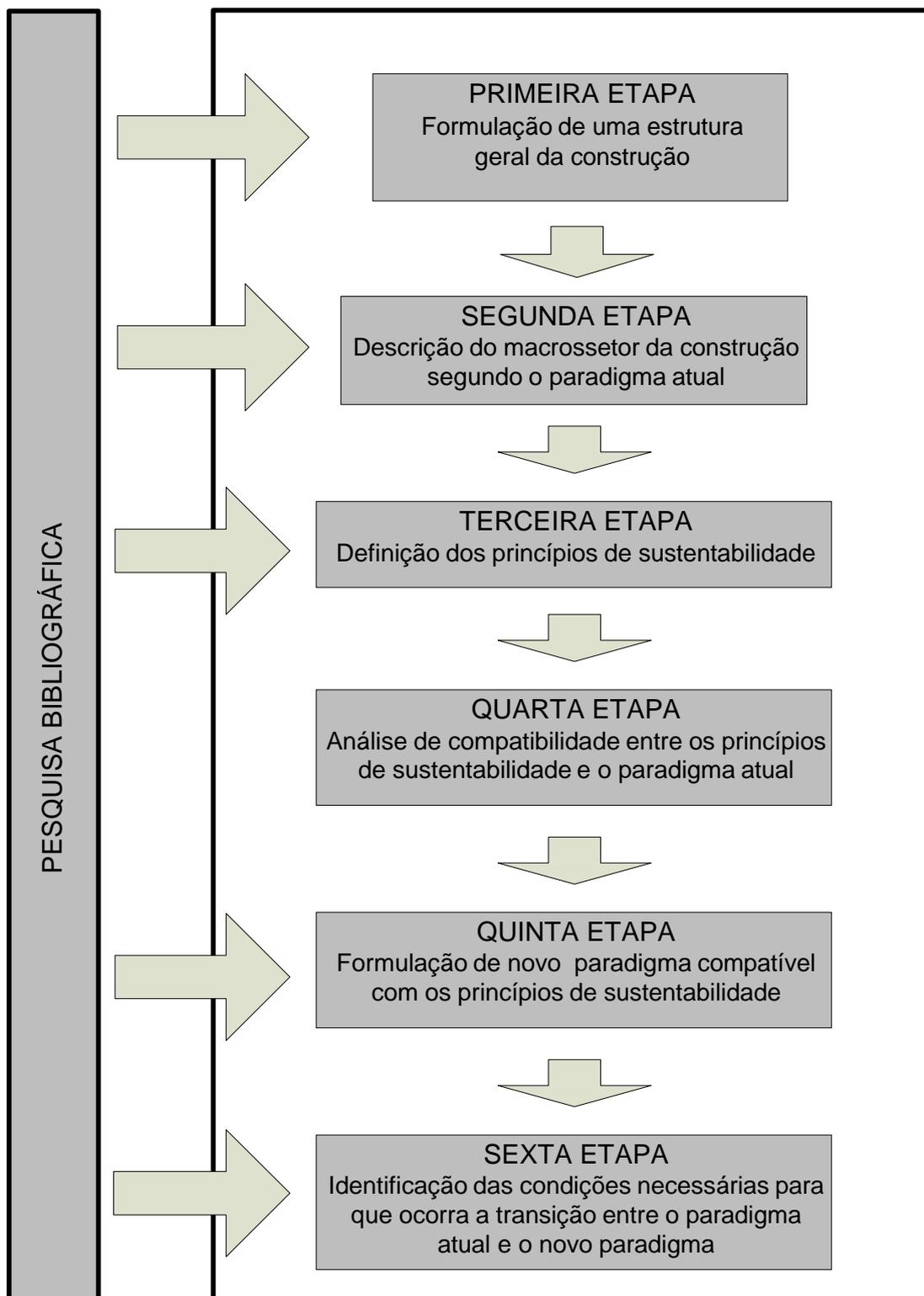


Figura 4: Descrição das etapas da pesquisa.

Na primeira etapa, foram buscadas informações sobre a indústria da construção no Brasil e no mundo. Estas informações serviram para a elaboração de um modelo geral da construção, tanto com enfoque no produto edificação, quanto no seu processo construtivo.

Esta etapa foi conduzida através de leituras acadêmicas e não acadêmicas, como poderá ser observado no texto, referentes a informações fornecidas por empresas de diversos segmentos envolvidos com a produção de edificações e por instituições e organizações focadas na questão da sustentabilidade. A busca de informações não acadêmicas deveu-se à inexistência, pelo menos no conhecimento do autor, de estudos acadêmicos que enfoquem esta questão de forma sistemática. Complementando as leituras, foram feitos debates extensos com dois professores do Norie – prof. Miguel Sattler e prof. Luis Carlos Bonin – utilizando o método socrático de investigação. A finalidade destes debates, que pode ser considerada como uma consulta com especialistas, sem um questionário formal ou uma agenda excessivamente rígida, buscou elucidar diversos conceitos, dirimir dúvidas e cristalizar um entendimento sobre a dinâmica da indústria da construção, através da compreensão de seus conceitos mais fundamentais.

Na segunda etapa, foi desenvolvida uma descrição da indústria da construção (do macrossetor da construção), segundo o paradigma atual, vista como um caso particular da estrutura genérica formulada. Para tanto, foi utilizada e complementada a pesquisa bibliográfica da primeira etapa. Também foi utilizado o método socrático para a compreensão das interações entre os diversos segmentos do macrossetor da construção. Como resultado desta segunda etapa, foi obtido um entendimento sobre a dinâmica da indústria, no grande arco que vai da extração das matérias primas até o descarte dos edifícios usados.

Na terceira etapa, o esforço concentrou-se na busca de informações de fontes acadêmicas. Foi conduzida uma pesquisa bibliográfica, com o objetivo primordial de compreender um campo de conhecimento bastante diversificado e difuso, que tem como foco principal a questão ampla da sustentabilidade, bem como seu significado e aplicação na indústria da construção. Entendeu-se que a visão de mundo que dá proeminência à sustentabilidade obedece a um paradigma essencialmente distinto daquele que rege a visão meramente técnico-econômica (expressa no atual paradigma da construção), trazendo valores que são distintos daqueles que orientam a busca da maximização do lucro ou que privilegiam uma visão antropocêntrica do meio ambiente. Com uma compreensão deste campo, foram formulados os princípios de sustentabilidade, baseados em conceitos estruturantes. Como conclusão desta etapa, foi produzido um trabalho, apresentado na Conferencia Internacional do RILEM “Progress of Recycling in the Built Environment”. Este trabalho continha uma primeira formulação dos princípios básicos de sustentabilidade para a construção (AZAMBUJA et al., 2009). A percepção dos conceitos estruturantes evoluiu com a continuação da pesquisa, tendo, em sua formulação final, uma relação hierárquica entre os

diversos conceitos, diferentemente da formulação original, onde todos os conceitos estruturantes estavam em um único nível hierárquico.

A quarta etapa da pesquisa consistiu em confrontar o paradigma atual da construção com os princípios de sustentabilidade formulados na terceira etapa, de forma a verificar se o paradigma atual permitiria que os princípios de sustentabilidade pudessem ser incorporados à prática da indústria da construção de edificações. Foram verificadas diversas incompatibilidades entre eles, o que levou à conclusão de que os princípios somente poderiam ser aplicados integralmente em um novo paradigma da indústria de construção de edificações.

Um novo paradigma foi formulado, consistindo tal formulação na quinta etapa do trabalho. As características de tal paradigma foram baseadas nos resultados obtidos da análise realizada na etapa anterior, bem como nas características gerais do produto e processo de construção, elaboradas na primeira etapa. Com isto, ficou assegurada a compatibilidade (ao menos potencial) entre o novo paradigma e os princípios de sustentabilidade.

A sexta etapa consistiu em identificar quais seriam as condições necessárias para viabilizar a transição entre o paradigma atual e o novo paradigma. Tais condições são a condensação de muitas ações levadas a cabo por diversos agentes. Devido ao caráter complexo em que elas ocorrem, as premissas para que possam ocorrer não foram exploradas extensivamente, até mesmo porque tal empreitada envolveria campos de conhecimento que vão muito além da formação do autor, porque envolvem aspectos políticos, culturais, e econômicos. Entretanto, esta ressalva não invalida o esforço de identificar aquelas condições, muitas das quais estão ligadas às atividades da comunidade, tanto brasileira quanto mundial, que atua na produção de edificações.

Evidentemente, ao longo de todas estas etapas, como de praxe, permaneceu a atividade de pesquisa bibliográfica.

Finalmente, foi elaborada uma breve conclusão do trabalho, resumindo os resultados encontrados na pesquisa.

1.2.5.3 Limitações da pesquisa

Esta pesquisa apresenta duas importantes limitações. Em primeiro lugar, o escopo da análise, tanto do paradigma atual, quanto do novo paradigma proposto e das tecnologias que poderão servir para a utilização na construção, limita-se à construção de edificações, embora muitos conceitos aqui apresentados possam ser aplicados, tanto na indústria da construção em geral, como em outros campos da engenharia, onde o conceito de materiais é fundamental para o desenvolvimento de soluções. Em segundo lugar, a fonte primordial de informações foi bibliográfica. Embora atividades experimentais não fossem justificáveis, pela própria característica do tema e do enfoque abrangente adotado, informações obtidas apenas via bibliografia, sem dados diretos de campo, correm sempre o risco de trazerem embutidos critérios de valor, que distorcem o dado objetivo. Entretanto, sendo esta uma pesquisa em um campo, ao mesmo tempo vasto e incipiente, fazer uma pesquisa de campo somente terá sentido após as ideias expostas neste trabalho terem sido devidamente avaliadas, criticadas e consolidadas. Esta deverá, portanto, ser a atividade de trabalhos futuros sobre o tema.

Com relação ao enfoque aqui adotado, como bem foi observado pelo prof. Heineck durante o exame de qualificação para esta tese, ele claramente elege o mercado como o ambiente onde deverão ser aplicados os conceitos, tanto no que se refere aos princípios de sustentabilidade e ao novo paradigma proposto, quanto no concernente ao desenvolvimento de novas metodologias e tecnologias de projeto e produção de edificações, embora centros de pesquisa e desenvolvimento evidentemente possam e devam cumprir o papel de solidificação e disseminação dos conceitos propostos, bem como no desenvolvimento de soluções. O enfoque é, portanto, no lado da oferta. Outros estudos poderão focar, também, as questões relativas ao consumo e ao papel regulador e normativo do governo (MILANI, 2005).

1.3 ESTRUTURA DA TESE

A estrutura da tese refletiu, na sua essência, a metodologia adotada, com os capítulos coincidindo com as etapas da pesquisa. Além deste primeiro capítulo – Introdução – que define as características básicas da tese, foram elaborados sete outros capítulos, assim distribuídos: no segundo capítulo foi apresentada uma formulação geral da indústria da construção, com base nos seus produtos e processos; no terceiro capítulo foi apresentada uma descrição do paradigma atual; no quarto capítulo foram descritos os princípios de sustentabilidade; no quinto capítulo foi feita a avaliação da compatibilidade entre os princípios descritos e o paradigma atual; o sexto capítulo foi dedicado à descrição do novo

Incompatibilidade entre o paradigma atual da construção e princípios de sustentabilidade: proposição de novo paradigma

paradigma da construção de edificações; o sétimo capítulo traz um repertório de novas metodologias e tecnologias de construção, com simulações de aplicação. Finalmente, o último capítulo foi dedicado às conclusões.

A seguir, são descritos brevemente os escopos de cada um dos capítulos seguintes.

Capítulo 2 – Conceitos básicos – neste capítulo foi apresentada uma estrutura conceitual para a edificação, incluindo-se os conceitos considerados básicos para a compreensão do produto edificação e o seu processo construtivo.

Capítulo 3 – Paradigma atual – o capítulo sobre o paradigma atual está dividido em três partes: produtos, processos e características básicas do paradigma. Estas características são: dicotomia espelhada em produtos e processos; hegemonia da indústria de materiais; e os materiais de construção como ponto focal da inovação tecnológica no macrossetor da construção.

Capítulo 4 – Princípios de sustentabilidade – neste capítulo foram descritos os princípios identificados como fundamentais para o desenvolvimento de tecnologias para a indústria da construção. Esses princípios foram classificados em duas categorias: básicos ou aplicados. Esta aplicação pode ser relacionada ao meio ou à formação do artefato e, em ambos os casos, os conceitos aplicados podem ser primários ou secundários. O detalhamento desta nomenclatura foi feito no próprio capítulo.

Capítulo 5 – Avaliação do paradigma atual – no capítulo de avaliação, o paradigma foi confrontado com os princípios de sustentabilidade enunciados, para que fosse verificada a viabilidade de utilização destes princípios naquele paradigma.

Capítulo 6 – Novo paradigma da indústria de edificações – neste capítulo, foram descritas as características básicas do novo paradigma, de forma a torná-lo compatível com os princípios enunciados no capítulo 4. Essas características são: uma dicotomia de produtos e processos, diferente da dicotomia atual, de forma a viabilizar processos *bottom-up* em diversos níveis hierárquicos, a partir de estruturas moleculares; a hegemonia da indústria da edificação, em detrimento da indústria de materiais; e a substituição do conceito de material pelo conceito de estrutura multinível como ponto focal de inovações tecnológicas do macrossetor da construção.

Capítulo 7 – Transição do paradigma atual para o novo paradigma – neste capítulo, primeiro foram comparadas as características dos dois paradigmas e destacadas suas diferenças essenciais: a hegemonia tecnológica da indústria de materiais no paradigma atual versus a

liderança da indústria de edificações no novo paradigma; e a substituição do conceito de material, central no paradigma atual, pelo conceito de estrutura heterogênea multinível no novo paradigma. Com base nesta distinção, foram identificadas as condições para que houvesse a transição entre os dois paradigmas, de tal maneira que fosse possível transformar a atividade do macrossetor, de modo a torná-la compatível com os princípios de sustentabilidade.

Capítulo 8 – Conclusões – O capítulo de conclusões analisa se o trabalho atingiu os objetivos propostos, reunindo e avaliando os resultados obtidos nos capítulos anteriores. Além disso, foram feitas recomendações para estudos futuros que possam aprofundar alguns conceitos propostos pelo autor. Finalmente, foram feitas observações finais relativas ao trabalho como um todo.

Apêndice – No apêndice foi desenvolvida uma aplicação dos conceitos desenvolvidos relativos ao novo paradigma e aos princípios de sustentabilidade apresentados.

2 ESTRUTURA GERAL DA CONSTRUÇÃO

Um campo de conhecimento é exposto (manifesto) nas práticas sociais⁷ de uma comunidade que o detém. A sua compreensão, através da análise dessas práticas, deveria levar em consideração que elas “podem chegar a engendrar domínios de saber, que não somente fazem aparecer novos objetos, novos conceitos, novas técnicas, mas também fazem nascer formas totalmente novas de sujeitos e de sujeitos do conhecimento” (FOUCAULT, 2009). No caso específico da construção de edificações, ela é uma prática social que vem evoluindo ao longo dos séculos, com a participação ativa dos diversos profissionais (sujeitos do conhecimento), cujas práticas e campos de atuação vêm se transformando durante este período. Para estudar a prática social da construção, é preciso, antes, formular uma estrutura conceitual, que foi chamada, nesta tese, de Estrutura Geral da Construção. Esta Estrutura Geral tenta estabelecer as principais características deste campo de atividade e de conhecimento, de maneira a permitir uma análise das práticas e conceitos utilizados atualmente na construção. Esta estrutura conceitual foi descrita da maneira mais abrangente e genérica possível, preferencialmente sem utilizar os conceitos próprios da comunidade da construção para defini-la e descrevê-la, pois isso poderia comprometer a generalidade da descrição, bem como a objetividade da análise posterior dos conceitos e práticas da comunidade da construção.

2.1 ESTRUTURA CONCEITUAL NAS CIÊNCIAS BÁSICAS E NA ENGENHARIA

A engenharia desenvolve tecnologias utilizando conhecimentos gerados nas ciências básicas da química, da física, da economia e, de maneira mais incipiente, da biologia e da ergonomia. Em todas estas, existem alguns conceitos básicos que estruturam os respectivos campos de conhecimento. Estes conceitos básicos podem ser divididos em dois campos de investigação: no primeiro, encontram-se os objetos de estudo, a coisa estudada; na segunda, encontram-se as maneiras como estas coisas passam a existir e são transformadas. Deste modo, a química está alicerçada nos conceitos de substâncias (o seu objeto de estudo) e de reação química (a produção e transformação destas substâncias). A física, de maneira similar, estuda a matéria (seu objeto de estudo) e a energia (que

⁷ Práticas sociais são práticas compartilhadas socialmente e cuja validação ocorre na interação social.

transforma esta matéria). A biologia tem o ser vivo como objeto de estudo e os processos biológicos, como seus modos de transformação.

Cada um destes grandes campos engloba subdivisões. Na química, por exemplo, as substâncias podem ser puras e compostas, sendo formadas por elementos químicos, que também são agrupados segundo suas características, como apresentado na tabela periódica, enquanto as ligações entre os átomos podem ser iônicas, covalentes ou metálicas. Na física e em outras ciências observa-se situação semelhante.

De maneira similar às ciências que lhe servem de base, os conhecimentos da engenharia podem ser divididos em dois grandes campos conceituais: produto e processo. Entretanto, aqui surge um obstáculo a ser reconhecido de início. A uniformidade da nomenclatura encontrada nas ciências básicas não está presente na engenharia. Assim, um conceito básico de produto como material, por exemplo, tem um significado para o designer industrial e outro para o arquiteto (ASHBY, JOHNSON, 2011). De modo semelhante, as classificações de processo variam conforme a área da engenharia considerada. A engenharia química, por exemplo, apresenta sua classificação de operações unitárias, enquanto a engenharia mecânica trabalha com processos físicos unitários.

2.2 ESTRUTURA GERAL DA CONSTRUÇÃO DE EDIFICAÇÕES

Diferentemente das ciências básicas, a engenharia da construção – e mais especificamente da construção de edificações – não estrutura seus conceitos de forma rigorosa e sistemática.

Os conceitos formulados na área da construção baseiam-se, muitas vezes, em uma percepção intuitiva da coisa conceituada, emergindo através da prática, sem a preocupação com a sua exatidão ou com contradições entre as diversas definições utilizadas. Esta falta de rigor não se limita aos praticantes das atividades de produção, mas estende-se aos geradores e difusores do conhecimento da área, como será exemplificado ao longo deste trabalho. Um pequeno exemplo inicial pode ilustrar o argumento. Andrade agasalha a definição de Cohen, propagada por Padilha, de que materiais são “substâncias com propriedades que os tornam úteis na Engenharia” (ANDRADE, 2007, p. 203). Mas no mesmo parágrafo, o autor diz que devem ser “estabelecidas as relações existentes entre as suas propriedades macro e microestruturais” (ANDRADE, 2007, p. 203). Ora, se são substâncias, os materiais não podem ter tais propriedades, pelo menos não na definição química de substância. Mais adiante, o mesmo autor explica que “as propriedades físicas dos materiais dependem basicamente de sua homogeneidade e de suas características

isotrópicas” (ANDRADE, 2007, p. 204). Novamente, substâncias não apresentam homogeneidade. Isto é uma propriedade, na menor escala possível, da mistura de substâncias. A isotropia depende da estrutura interna do corpo, cuja menor escala é, de fato, molecular ou da célula básica nos cristais. Mas em outros casos, como na madeira (também citada pelo autor como um material), a anisotropia ocorre em vários níveis (e escalas) da estrutura interna. As inconsistências detectadas nesse autor específico estão presentes em toda a literatura sobre materiais e podem ser encontradas em uma leitura mais atenta. Elas decorrem da falta de um corpo consistente de conceitos no campo da Engenharia e, em particular, da Engenharia Civil. Desta forma, nesta tese foi criada, como ponto de partida, uma taxonomia de conceitos genéricos (ou básicos) sobre produto e processo. Esta taxonomia foi incorporada à Estrutura Geral da Construção. A posterior análise do paradigma atual confrontou os significados dos conceitos utilizados no paradigma, com os significados apresentados nessa Estrutura Geral. Esta confrontação visou revelar algumas dificuldades que os significados mais intuitivos utilizados no paradigma atual apresentam, no que tange à precisão de cada conceito e à coerência entre eles. Com base nesta análise, foram validados os conceitos mais rigorosos e consistentes. Em alguns casos mais importantes, também foram enfocadas as relações de complementariedade entre os conceitos, mostrando que o significado de cada um somente pode ser apreendido quando relacionado aos outros.

2.3 O PRODUTO EDIFICAÇÃO

No processo de produção de uma edificação são utilizados vários produtos intermediários. Tais produtos podem ser definidos como os produtos resultantes das diversas etapas do processo de produção da edificação. Na nomenclatura do paradigma atual, por exemplo, as matérias primas, os materiais e componentes são alguns destes produtos. A maneira como os produtos são desenvolvidos, (projetados), produzidos e utilizados serviu como ponto de partida para a descrição dos conceitos básicos e complementares envolvidos no produto edificação. Estes conceitos referem-se a características que podem ser encontradas em todos os produtos e que, devidamente caracterizadas, servem como referência para identificá-los.

Evidentemente, cada corpo físico individual apresenta diferenças nas suas diversas características básicas. Mas aquele que analisa um corpo como algo físico e específico, necessita relacioná-lo como pertencendo a uma classe mais geral. Essa classe é uma formulação mental, um ente abstrato, que serve como modelo e referência a todos os

materiais físicos que pertencem à sua classe⁸. Um exemplo de tal classe seria o concreto. Existem infinitas formulações possíveis de concreto. Mas todas elas são identificadas como sendo o material composto, formado, essencialmente, por agregado graúdo, agregado fino, aglomerante e água. Esta identificação com o material abstrato “concreto” só é possível porque este concreto ideal, esta formulação mental, serve como referência à classe de todos os concretos, emprestando-lhe suas características e propriedades. Assim, todo o corpo que possuir as mesmas características descritas para o concreto, será chamado também de concreto e pertencerá à classe dos concretos. É verdade que os filósofos trabalharam exaustivamente o conceito de classe e de identidade, mas também é verdade que os engenheiros trabalharam exaustivamente diversos conceitos de propriedades⁹, não para compreendê-los somente, mas, principalmente, para poder usá-los na identificação e qualificação dos diversos corpos que são utilizados na produção de edificações. Entretanto, a identificação de propriedades individuais dos corpos, sem a definição clara de suas características, traz o risco da perda de uma generalização que será de extrema importância quando o paradigma atual for analisado. Por isso, a identificação dessas características (essências e complementares) dos corpos utilizados na edificação é apresentada, abaixo, como primeira etapa na descrição dos conceitos fundamentais da edificação.

De acordo com Ashby (2004), o projeto de um objeto é função de três variáveis: carga (que está relacionada à função), material e forma. Entretanto, a carga não é uma variável à disposição do projetista, mas um dado (uma informação) para o projeto, pois o produto é desenvolvido para atender àquela carga. Por exemplo, um engenheiro estrutural deve calcular as cargas e tensões a que a estrutura estará submetida, a partir dos dados fornecidos pelo arquiteto, referentes ao uso e à geometria do prédio, os quais não lhe cabe alterar. A partir das cargas e tensões, o engenheiro calculista poderá, então, dimensionar os componentes da estrutura. Da mesma forma, o engenheiro acústico deverá utilizar materiais e, eventualmente, algumas geometrias de superfície, para atender os requisitos de desempenho acústico do ambiente. Também aqui, não cabe ao engenheiro acústico definir quais os usos do ambiente ou os sons gerados, tanto em seu interior, quanto no seu entorno. Estes são dados no projeto. Evidentemente, pode haver uma interação entre o

⁸ A idéia de classe percorre toda a história do pensamento humano, generalizado na filosofia, desde Platão e Aristóteles até nossos dias.

⁹ O termo propriedade está associado, em um contexto tradicional, ao conceito de materiais, que possuem as chamadas propriedades intensivas (que não estão relacionadas à forma (também referida como extensão), tais como as condutividades elétrica, térmica e outras. Propriedades extensivas são, por evidente, vinculadas à extensão ou forma (que inclui geometria e escala) do corpo. Entretanto, esta correlação não se verifica em estruturas multinível, onde propriedades intensivas variam com a extensão do corpo.

projeto e as cargas. Por exemplo, o engenheiro estrutural poderá propor algumas alterações no projeto arquitetônico, para otimizar e, mesmo, viabilizar o projeto estrutural. Da mesma forma, o engenheiro acústico poderá sugerir algumas mudanças no projeto arquitetônico, ou mesmo influenciá-lo desde o início, para melhorar o desempenho acústico dos ambientes. Mas estas interações, quando ocorrem, são limitadas. De maneira geral, existe uma cronologia de definições, que começam pelos requisitos do usuário e seguem com os requisitos de desempenho do edifício, concluindo com as definições de soluções de produto e processo, para atender esses requisitos. Deste modo, seguindo a fórmula e a nomenclatura de Ashby, as únicas duas variáveis à disposição do projetista são material e forma.

A análise de Ashby pode ser generalizada para contemplar todos os produtos intermediários da construção, bem como a própria edificação. Nesse sentido, o autor propõe, nesta tese, um esquema geral de conceituação dos produtos intermediários da edificação. Assim, os objetos a que Ashby se refere são, de maneira geral, corpos. As cargas podem ser denominadas de funções, as quais deverão ser desempenhadas por esses corpos. O material, na acepção utilizada por Ashby, é a constituição dos corpos e pode assim ser denominada, enquanto a forma pode permanecer com a mesma denominação. A constituição, a forma e a função podem ainda ser desdobradas. A relação entre todos os conceitos assim denominados pode ser observada na figura 5, elaborada pelo autor desta tese. Ali pode ser observado, ainda, que todos estes conceitos interagem entre si, de maneiras que são mostradas na figura e serão descritas mais adiante.

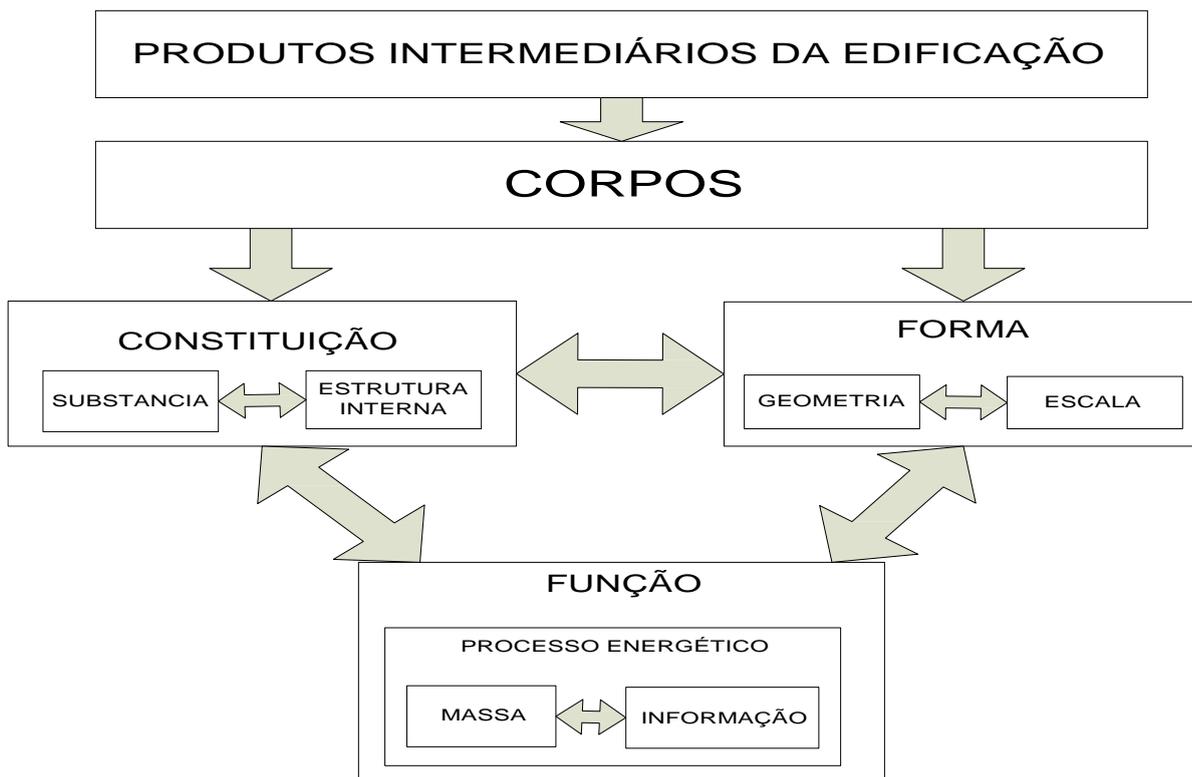


Figura 5: Conceitos relacionados aos corpos e às relações entre eles.

É interessante notar que Le Corbusier também relacionou três elementos, que ele chamou de lembretes, para os arquitetos: massa, superfície e plano (LE CORBUSIER, 2011), que, obviamente, correspondem, respectivamente, à constituição, forma e função, desde o ponto de vista de um arquiteto.

Estes conceitos definem as características básicas dos corpos. Foram, portanto, chamados de conceitos básicos ou ontológicos dos produtos e visam promover a obtenção de uma compreensão unificada desses produtos intermediários da edificação, através da adoção de algumas características consideradas universais entre eles. Segue uma definição de cada um destes conceitos, com suas principais características.

2.3.1 Conceitos básicos ou ontológicos

Os conceitos, aqui chamados de básicos, são aqueles que se referem às características essenciais dos produtos do processo construtivo, quer eles sejam intermediários ou finais. São estas características essenciais que irão definir como estes produtos podem ser definidos e classificados dentro do espectro de possibilidades que cada paradigma delimita. Eles são chamados de conceitos ontológicos também porque se referem à própria essência destes produtos, suas características mais fundamentais.

2.3.1.1 Corpo

Em uma primeira aproximação, um corpo é toda quantidade delimitada de matéria, com forma definida e destacável, ou seja, que pode ser percebido e individualizado como algo distinto do ambiente em que se encontra. Neste texto, portanto, o termo corpo designará toda e qualquer matéria, podendo os corpos ser sólidos ou fluídos. No entanto, em um primeiro momento, serão referidos apenas os corpos sólidos, visto que os corpos fluidos requerem uma análise específica. Tais corpos têm, portanto, as propriedades básicas da matéria sólida, ou seja, massa e dimensões. Estas características podem ser transmutadas em outras. Assim, a massa revela-se como definidora da constituição do corpo, com propriedades específicas, derivadas da natureza atômica e da organização da matéria, enquanto as dimensões caracterizam-se como definidoras da forma do corpo. Estas duas características – constituição e forma – serão analisadas a seguir.

2.3.1.2 Constituição

A matéria pode estar organizada em diferentes níveis. Aqui foi adotada uma divisão, segundo as disciplinas da química e da física, de modo a aproveitar o conhecimento acumulado por elas. A matéria sólida organizada forma, no nível químico, estruturas conhecidas como moléculas, cristais e estruturas metálicas. Estas estruturas são reconhecidas como substâncias, que podem ser simples (puras) ou compostas. A matéria organizada em níveis mais complexos forma estruturas cujo comportamento está mais relacionado com as leis da física. Quando a matéria está organizada em diversos níveis acima do nível químico, sua estrutura é chamada de multinível, embora a maioria dos autores a chame de multiescala (WRIGGERS, P.; LOHNERT, 2010; LeSAR, R.; BRYDEN, K. M., 2011). A escolha do nome multinível, por este autor, deveu-se à caracterização da estrutura segundo níveis de complexidade, os quais podem encontrar-se na mesma escala dimensional ou não.

2.3.1.3 Substância

As substâncias são definidas de acordo com três parâmetros: os seus elementos atômicos constituintes, as proporções entre estes elementos e os arranjos espaciais que estes elementos formam, nas proporções consideradas.

Os elementos atômicos definem diversas propriedades dos corpos. Dentro de cada elemento, o único aspecto com variação relevante seria concernente aos isótopos, mas a engenharia civil não utiliza tecnologias de separação de isótopos para obtenção de propriedades específicas. Com relação às características atômicas, dois aspectos são essenciais: a massa do átomo, definida por seu núcleo, a qual vai ajudar a determinar a

densidade do corpo, dentre outras propriedades; e a eletrosfera, que irá determinar o comportamento químico (reatividade) das substâncias e diversas características físicas do corpo, tais como condutividade elétrica e comportamento magnético. Finalmente, algumas propriedades são definidas pela combinação dos efeitos da massa e da eletrosfera, tais como ponto de ebulição e fusão.

As proporções entre os elementos podem variar, produzindo, com os mesmos elementos, uma infinidade de soluções diferentes. Por exemplo, carbono, oxigênio e hidrogênio formam milhares de substâncias diferentes, obtidas com a variação da proporção entre esses elementos e de seu arranjo espacial. O conceito de proporções entre os elementos é importante porque, muitas vezes, especialmente em moléculas de alto peso molecular e em cristais, são estas proporções, juntamente com o arranjo espacial da unidade básica, que definem a substância. Assim, um polímero e um cristal apresentam, respectivamente, o monômero e a célula unitária como definidores da substância referida. No caso de polímeros, pode haver distinções, ainda, com relação ao tamanho do polímero, que também pode ser classificado de acordo com seu peso molecular.

O arranjo espacial dos átomos na molécula ou no cristal também é fundamental para a compreensão do comportamento da substância e, conseqüentemente, de sua funcionalidade. O arranjo influencia a distribuição de cargas na eletrosfera e um grande número de propriedades da substância, tais como polaridade, cristalinidade, reatividade química e condutibilidade térmica. Em alguns casos, a única diferença entre duas substâncias é seu arranjo espacial (elas compartilham os mesmos elementos atômicos, nas mesmas proporções). Neste caso, as substâncias são chamadas isômeros. Os isômeros podem ser estruturais (quando a variação na posição dos átomos é causada por diferentes estruturas – ou formas de ligação – entre eles) e estereoisômeros ou isômeros espaciais (quando a variação na posição dos átomos é causada por diferentes posições espaciais, dos átomos que compartilham a mesma estrutura de ligações). Existem, ainda, casos em que propriedades totalmente distintas são obtidas, graças ao arranjo espacial, em situações que fogem do que seriam consideradas moléculas, no sentido tradicional. Por exemplo, o grafeno (uma malha plana formada por átomos de carbono, ligados em formação hexagonal) e o nanotubo de carbono diferem entre si somente porque o nanotubo é um grafeno enrolado em uma ou mais camadas.

2.3.1.4 Estrutura interna

A estrutura interna de um corpo pode ser entendida como o conjunto de todos os arranjos espaciais presentes nos diversos níveis de organização deste corpo, acima do nível molecular. Estes arranjos espaciais podem estar organizados em diversas escalas

dimensionais, que são entendidas, aqui, como múltiplos de 10, a partir do nanômetro. A estrutura interna de um corpo desempenha papel fundamental na definição de suas propriedades. Esta influência pode ser tratada de duas maneiras distintas: em uma abordagem tradicional da engenharia, a homogeneidade interna do corpo é valorizada e as variações são geralmente tratadas como desvios. Existem diversos algoritmos de aplicação de materiais, que buscam homogeneizar conceitualmente o corpo, observando os desvios e compensando as variações com coeficientes de segurança. Em outros casos, a estrutura interna causa diferentes comportamentos do corpo, quando este é solicitado em diferentes orientações. Nestes casos, o corpo é dito anisotrópico para aquela solicitação ou propriedade correspondente. De modo geral, os corpos biológicos são anisotrópicos e esta anisotropia é transferida para os produtos obtidos através destes corpos, quando sua estrutura interna é mantida inalterada. A madeira, por exemplo, é anisotrópica em diversas propriedades, entre elas na sua resistência à tração. Entretanto, quando a estrutura interna é desconstituída, existe uma perda total ou parcial da anisotropia. O MDF, por exemplo, é muito mais isotrópico, na sua resistência à tração, do que a madeira.

Quando os arranjos são formados em mais de um nível e os arranjos de um nível influenciam os níveis acima e abaixo daquele nível, a estrutura é chamada de estrutura multinível. É fundamental compreender como cada nível estrutural se comporta e como ele influencia, tanto os níveis que estão abaixo, como os que estão acima dele.

Estruturas multinível estão presentes em todos os seres vivos. Em cada escala destas estruturas, as unidades básicas, ou componentes do arranjo, são identificadas através das suas partes constituintes e de sua geometria característica. Como regra, no estudo de estruturas multinível naturais, a funcionalidade de cada nível somente é identificada e compreendida após o estudo das unidades constituintes daquele nível. Além disto, historicamente, o processo de compreensão é claramente descendente, ou seja, a estrutura e funcionalidade dos níveis macro são compreendidas antes daquelas dos níveis de escalas menores. Um exemplo típico é a compreensão e descrição do concreto. Isto pode ser devido às tecnologias de observação, que foram sendo aperfeiçoadas ao longo do tempo. A exceção a esta regra são as substâncias e elementos químicos constituintes dos corpos, porque, neste caso, são utilizadas técnicas de identificação desenvolvidas pela química, há mais tempo. O conhecimento das substâncias químicas auxilia na compreensão das estruturas que estão em níveis acima do nível atômico ou molecular. Um exemplo é o nacre, cuja estrutura interna é formada na escala nanoscópica por cristais hexagonais de aragonita, com 500 nanômetros de espessura e diâmetro variando de 5 a 10 micrômetros. Estes cristais estão embebidos em uma matriz proteica, de 30 nanômetros de espessura

(LIN, MEYERS, 2005). Neste caso, as substâncias constituintes, juntamente com a geometria dos cristais, serviram para a identificação dos componentes constituintes daquele nível, visto que a funcionalidade desta estrutura e de seus componentes não era conhecida, quando ela foi descrita pela primeira vez. O estudo de estruturas multinível de seres vivos é importante, porque serve de inspiração para diversas soluções de engenharia, que se apropriam destas soluções utilizando o conceito de biomimetismo, que será visto mais adiante. O conceito utilizado no nacre, por exemplo, serviu de inspiração para diversos desenvolvimentos de compósitos, para várias aplicações.

Em estruturas multinível produzidas pelo homem, a questão da funcionalidade é primordial e deve ser definida em primeiro lugar. Nestas estruturas, o projeto e o processo de produção devem focar no desempenho do objeto e, ao mesmo tempo, nas características funcionais de cada nível, utilizando o conceito de emergência, que também será visto mais adiante. Por exemplo, em um telhado de madeira, como o da figura 6, mostrado abaixo, existem ao menos três níveis definidos pelo homem: o dos componentes individuais, como as ripas; o dos conjuntos que formam elementos funcionais, como as tesouras; e o do telhado, como um todo.

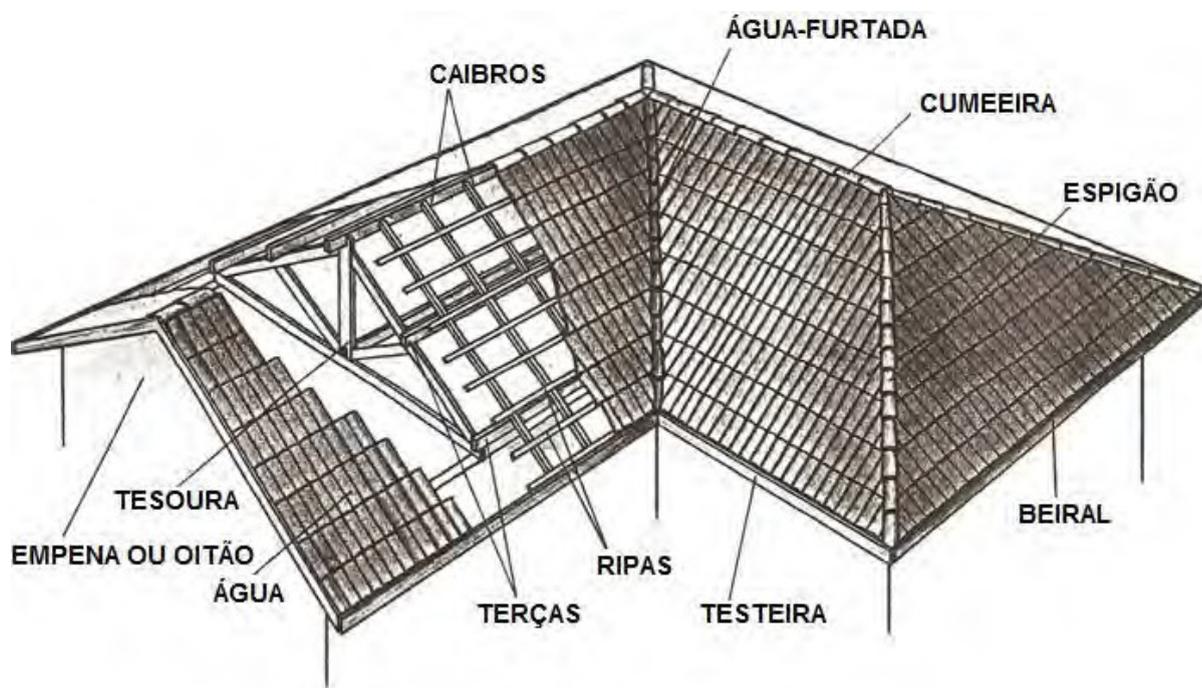


Figura 6: Telhado de madeira, mostrando os diversos níveis hierárquicos da estrutura (Fonte: MOREIRA, 2012).

A estrutura interna dos corpos pode apresentar diferentes graus de homogeneidade e ciclidade, em cada nível de organização. A homogeneidade pode ocorrer em zero, uma,

duas ou três dimensões, assim como a ciclicidade. E tal definição deve ser referenciada a uma escala definida, na qual é possível definir o corpo como homogêneo e cíclico, ou não. O concreto, por exemplo, é heterogêneo, na escala micrométrica, mas é homogêneo, na escala métrica.

A importância de determinar-se o grau de homogeneidade e de ciclicidade, em determinado nível ou escala, deve-se à correlação entre este grau e os processos de produção do corpo, naquele nível de organização. Assim, a homogeneidade em um nível, em determinada escala, implica na simples acumulação de matéria, neste nível e escala. Evidentemente, a acumulação pode gerar qualidades emergentes, não necessariamente positivas. Por exemplo, o concreto apresenta um limite dimensional, a partir do qual é necessária uma junta de dilatação, na ausência da qual surgirão fissuras.

2.3.1.5 Forma

O termo forma é definido no dicionário Aurélio como “Os limites exteriores da matéria de que é constituído um corpo, e que conferem a este um feitio, uma configuração, um aspecto particular” (FERREIRA, 1986, p. 799). Aqui, é necessária uma qualificação importante do que significa ‘limite exterior’: o termo poderia ser interpretado de duas maneiras: como superfície externa ao corpo, ou como a superfície que limita o corpo. A adoção da primeira interpretação traria problemas, porque muitos corpos têm sua forma definida pelas superfícies externa e interna. Por exemplo, um tubo tem uma superfície interna, que é tão importante, para sua definição, quanto sua superfície externa. Se a superfície interna não fosse característica da forma, tubo e tarugo maciço seriam aceitos como tendo a mesma forma. Evidentemente, há casos em que a superfície interna não é relevante para a definição mais ampla de um elemento construtivo. Por exemplo, uma parede construída com tijolos maciços e outra, construída com tijolos furados, são consideradas, igualmente, paredes de alvenaria. Entretanto, também fica evidente que as cavidades de cada tipo de tijolo terão diversas implicações no comportamento da parede e, portanto, no seu desempenho. Para evitar problemas de identificação de formas, neste trabalho foi adotada a segunda interpretação, na qual toda a superfície da matéria é considerada como seu limite e é, portanto, definidora de sua forma. Cabe destacar o caso dos poros. Quando as células são fechadas, então o espaço no interior das células faz parte da estrutura interna, até porque ele muitas vezes contém gases diversos, incluindo o ar, gás carbônico e hidrogênio. Quando as células são abertas, o espaço no interior das células é externo ao corpo e não faz parte de sua estrutura interna, até mesmo porque tais células ou poros podem ser preenchidos de diversos fluidos, com variação deste preenchimento ao longo do tempo.

Os conceitos apresentados acima são aplicáveis, sem restrições, aos corpos sólidos monolíticos. Quando um corpo tem sua forma alterada, isto ocorre porque a sua constituição assim o permite. Deste modo, sob certas condições, os metais podem ser trefilados graças à sua ductilidade, uma propriedade que não é encontrada nas cerâmicas, por exemplo. Esta capacidade dos corpos, de ter sua forma alterada, é uma propriedade importante para os processos transformativos e pode ser chamada de adaptabilidade de forma.

Os materiais sólidos fragmentados, como a areia e o cimento, e fluídos, como o concreto recém misturado e as tintas, devem ser analisados com mais vagar, porque, nestes casos, o conceito de forma deve ganhar um significado específico. Nestes casos, a adaptabilidade imperfeita da forma é obtida graças a uma característica de constituição diferente daquela dos corpos sólidos. Estes corpos não retêm, na escala em que estão sendo trabalhados, uma forma definida anterior ao processo de alteração. A areia, por exemplo, tem uma forma definida no nível dos grãos, mas o conjunto dos grãos, que é a escala apropriada para a sua manipulação e é considerado como o corpo chamado areia, não tem forma definida. Da mesma maneira, uma tinta tem uma forma definida no nível das moléculas que a constituem ou das micelas que formam a emulsão, mas o corpo considerado na escala de manipulação é a tinta líquida, que não retém forma definida antes da alteração. Esta questão será tratada em maior detalhe no capítulo 3, item 2.3.1.6 (Relações entre os conceitos de material, forma, função e constituição), dentro da quinta proposição.

2.3.1.6 Geometria

A geometria refere-se às características adimensionais das superfícies que definem a forma. Um cubo (ou mais genericamente, um paralelepípedo), por exemplo, tem seis superfícies planas, ortogonais às superfícies que lhe são adjacentes. Isto independe das dimensões dessas superfícies, ou seja, a definição permanece a mesma, independentemente da escala considerada.

As características geométricas da forma são fundamentais sob dois aspectos: com relação à funcionalidade do corpo, ou seja, como ele interage com as formas de energia que incidem sobre ele, e com relação aos processos produtivos utilizados para a fabricação do corpo. A dependência da funcionalidade do corpo, em relação à sua geometria, depende da forma de energia considerada. Na energia elétrica, o fenômeno das pontas exemplifica o papel da geometria, enquanto na energia mecânica, o momento de inércia de uma seção o exemplifica. A geometria desempenha também papel fundamental na definição dos processos, quer sejam transformativos, como a extrusão, por exemplo, quer sejam conectivos, como o encaixe.

2.3.1.7 Escala

A escala do corpo define suas dimensões independentemente da sua geometria. Assim, um cubo e uma esfera podem ser definidos na mesma escala. Normalmente, assume-se, para efeito de referência, que as escalas correspondem aos múltiplos e submúltiplos de uma medida padrão¹⁰. Escalas não são níveis, cuja definição está ligada à funcionalidade específica daquele nível, normalmente vinculada às propriedades emergentes do nível. Por exemplo, MDF e MDP são dois materiais derivados da madeira. Eles utilizam as mesmas matérias primas (fibras de madeira e resina), diferenciando-se apenas pela escala das fibras. No MDF, as fibras utilizadas são menores que as fibras utilizadas no MDP.

A escala influencia o comportamento de um corpo e as funções que pode desempenhar, bem como seu processo produtivo (transformativo e conectivo). O exemplo acima pode ser utilizado novamente. As fibras menores do MDF são fundamentais para que o material apresente uma resistência mecânica maior do que o MDP. Graças a esta diferença de comportamento, o MDF e MDP são utilizados para distintas funções dentro da edificação.

Em termos de comportamento, quanto menor a escala, mais relevância têm algumas forças, chamadas forças atômicas, enquanto a força da gravidade perde importância. Além disto, a relação superfície/volume aumenta com a redução das dimensões do corpo, aumentando a importância das forças atômicas. Também a interação do corpo com as diversas formas de energia é alterada por sua escala. Um dos exemplos mais interessantes dessa interação, nos seres vivos, é a maneira como algumas espécies de borboletas e besouros produzem cores iridescentes a partir da interação da superfície de seu corpo com a luz. Nestes casos, não existe emissão de luz em determinada faixa, mas o aprisionamento das bandas do espectro visível, à exceção de uma estreita faixa, que é refletida. Dentre as tecnologias humanas que dependem da escala estão as fibras ópticas. O próprio cimento, cuja granulometria apresenta uma relação superfície/volume que permite que o processo de dissolução e recristalização ocorra no tempo adequado, também é um exemplo.

O processo produtivo de um produto intermediário da construção é afetado e afeta a escala que pode ser adotada. Em muitos casos, a escala também é função da constituição do corpo. O vidro, por exemplo, apresenta limitações com relação à espessura mínima a ser adotada, para cada pano de janela, em função das características mecânicas deste material.

¹⁰No SI (Sistema Internacional de Unidades), a medida padrão é o metro e as escalas sucessivas de múltiplos e submúltiplos são definidas em função dele, na base 10.

2.3.1.8 Função

Uma das definições da palavra função, no dicionário, é de “utilidade, uso, serventia” (FERREIRA, 1986, p. 819). Na construção, este conceito de função ligado à utilidade remonta a Vitruvius (VITRUVIUS, 2006), que descreve cada tipo de material, elemento e edifício de acordo com seus usos. A função dos corpos também está relacionada ao conceito de desempenho. Os requisitos de desempenho de um corpo, quer ele seja uma edificação ou um produto intermediário desta, são, em realidade, as funções que devem ser desempenhadas por esse corpo.

No paradigma atual, a ideia de função está normalmente associada aos componentes e elementos acabados; ou seja, partes que podem ser empregadas sem alteração em sua forma ou constituição. Em contrapartida, as matérias primas e os materiais são muitas vezes considerados como não tendo função definida. Segundo esta percepção, os materiais são amorfos, definidos como “materiais beneficiados, porém sem conformação e função específicas” (ROCHA, 2009), ou são simples, ou seja, “que não tem forma geométrica definida” (ABNT, 1977). Estes conceitos são compatíveis com a ideia de um único material, utilizado em diferentes partes do edifício, cumprindo diferentes funções. Existem, entretanto, alguns problemas com este raciocínio. Em primeiro lugar, é preciso diferenciar entre o fato de os materiais não apresentarem a sua forma final de uso – o que realmente ocorre na maioria dos casos – com a ideia equivocada de que não possuem forma. Com exceção aos materiais líquidos, que por definição realmente não têm forma estável, todos os materiais (sólidos) têm forma. Os materiais líquidos não têm forma definida porque a sua função, naquela etapa, assim o exige. Um concreto ou uma tinta perderiam a sua função se possuíssem forma definida no momento de sua utilização. Em segundo lugar, é preciso diferenciar o fato de os materiais não poderem cumprir, em sua forma original, a função dos componentes nos quais se transformarão, da ideia equivocada de que os materiais não têm função ou não tem função específica. Na realidade, todos os materiais têm função; às vezes, até mesmo uma função específica, compatível com a sua forma a cada momento. O que justifica a assertiva de que todos os materiais têm função é que a ideia de função está ligada à ideia de utilidade. Ou seja, um material sem função seria um material sem utilidade.

A definição da função (ou funções) de um corpo ocorre de maneiras distintas, dependendo da origem deste corpo: se ele é um corpo natural ou produzido pelo homem.

No caso de corpos naturais, a sua função é uma percepção do homem, que se projeta sobre corpos que já existem, antes de se tornarem materiais de construção: as árvores de uma floresta, as formações rochosas, as formações geológicas que contêm minérios, são exemplos de que os corpos naturais existem com suas constituições e suas formas

específicas, as quais foram geradas e refletem o modo como estas estruturas foram formadas. Ou seja, elas não apareceram ou cresceram para terem uma função, menos ainda uma função de utilidade para a construção. Portanto, estas existências não interessam como materiais de construção na sua condição original. Isto é, a sua utilidade não é intrínseca a eles, visto não serem corpos com uma existência teleológica¹¹. Quem deseja se apropriar destes corpos naturais precisa, então, realizar uma operação mental, que enxerga a possibilidade da existência da madeira a ser extraída do corpo da árvore, a pedra de cantaria ou a brita, a ser extraída do corpo da formação rochosa, o minério de ferro, a ser extraído do corpo da formação geológica. Assim, quando esta percepção se estende para além das coisas produzidas pelo homem e envolve corpos naturais, antes de sua extração, a definição de utilidade destes corpos depende, essencialmente, de uma operação mental, que se efetua quando os corpos naturais ainda existem com suas características originais. Entretanto, o homem se apropria destes corpos exatamente devido às suas características de constituição e forma originais, que permitem que eles possam ser, posteriormente, de utilidade para si, geralmente após serem submetidos a processos transformativos. Ou seja, é necessário dar à árvore e aos outros corpos naturais uma função, um propósito que eles originalmente não possuem. É somente após dar esta finalidade às coisas que terá sentido apropriar-se, de fato, delas, para transformá-las fisicamente, alterando sua constituição e sua forma. Estes conceitos são válidos também para os corpos naturais surgidos através da atividade humana, como é o caso das árvores plantadas (de florestamento ou reflorestamento). Também nestes casos, as características de constituição e forma dos corpos não estão relacionadas a qualquer função para a indústria humana e, sim, à existência da própria árvore. Embora a atividade humana possa alterar a constituição (através de, entre outros processos, engenharia genética) e a forma (através de, por exemplo, alteração do espaçamento entre mudas e podas), a constituição e forma permanecem sendo definidas em função da existência da própria árvore.

A projeção dessa utilidade sobre os corpos naturais pode gerar distorções na percepção do homem sobre a natureza destes corpos, invertendo a sequência real de eventos, como no caso da descrição dos “defeitos naturais da madeira” [sic], tais como nós, que “podem ser descritos como características, que se desenvolvem na árvore viva..., as quais podem reduzir a utilidade da madeira” (RIBA, 1994).

¹¹O conceito de teleologia refere-se a uma visão de mundo em que as coisas têm uma função ou propósito e sua própria existência é justificada por este propósito. A teleologia da natureza foi defendida por Aristóteles e, mais tarde por Kant. Kant não chega a afirmar que cada coisa tem um fim; apenas que nós as percebemos *como se* tivessem um fim. Se têm um fim ou não, isso só Deus poderia saber, embora para Kant Deus não tem como ser conhecido (pois não é espaço-temporal).

Os corpos produzidos pela indústria humana, por outro lado, tem uma função definida a priori. Sem esta função definida, sua produção e sua própria existência careceriam de sentido. Neste caso, ocorre o inverso do processo de constituição dos corpos naturais, que, primeiro existem e depois lhes são atribuídas funções. Ou seja, nos corpos antropogênicos, primeiro é definida a função e depois são definidas as características de constituição e forma.

Cabe aqui distinguir entre corpos gerados para uma função posterior a ser desempenhada e corpos que são gerados nos processos de produção, mas que não apresentam função. Estes últimos são os chamados resíduos e, se uma função não é encontrada para eles em outra atividade ou setor da atividade humana, eles são descartados e, via de regra, devolvidos para os ambientes naturais. O problema essencial dos resíduos é exatamente sua inexistência de função. Como eles não podem ser incorporados a nenhum ciclo de matéria, como ocorre nos ciclos dos processos naturais, eles acumulam como corpos desfuncionais.

Evidentemente, todos os corpos antropogênicos são produzidos a partir de corpos naturais. A diferença, aqui, é que os corpos naturais transformados mantêm sua constituição, tendo alterada, essencialmente, sua forma. No caso de corpos antropogênicos, sua constituição é total ou parcialmente destruída, para dar lugar à constituição de um corpo antropogênico. Como um exemplo do primeiro caso estão a areia, que não sofre transformação, nem de sua constituição, nem de sua forma, assim como a madeira, que tem preservada a sua constituição, mas tem alterada a sua forma. No segundo caso, estão os perfis de alumínio, que são produzidos a partir da bauxita, que é reduzida a alumínio metálico, perdendo, assim, o corpo natural extraído, tanto sua constituição, quanto sua forma.

O conceito de função encerra, ainda, outra característica fundamental. Um corpo que deve realizar uma função, o faz sempre através da interação desse corpo com uma ou mais formas de energia. A comprovação desta afirmativa é singela: todo o corpo, sendo matéria, permanece inerte e, portanto, sem realizar função alguma até que passe a interagir com alguma forma de energia. Essa interação, independentemente de sua complexidade, pode ser decomposta em seis operações energéticas básicas, que serão vistas no item 2.4.2, *Processos energéticos*. O conjunto de operações energéticas, que permitem ao corpo cumprir determinada função, chama-se processo energético. Uma função é equivalente a um processo energético. De fato, uma função pode ser identificada com o seu processo energético específico e, embora um processo energético sempre envolva energia, ele também pode envolver matéria ou informação ou matéria e informação. Devido ao caráter

neotérico desta abordagem, as próximas páginas são dedicadas a esclarecer alguns conceitos e exemplificar a sua aplicação.

2.3.1.9 Perfil energético

O perfil energético de um corpo expressa, para cada forma de energia, qual o comportamento desse corpo em relação às operações energéticas. Esse perfil pode ser representado graficamente, como na figura 7, abaixo, onde está representado, como exemplo, o perfil energético de uma lâmina plana de vidro incolor, em relação à energia radiante visível, sem escala.

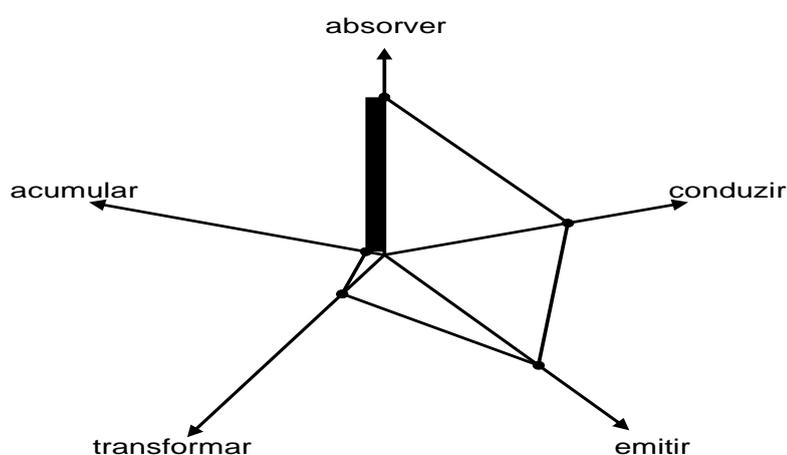


Figura 7: Perfil energético de uma lâmina de vidro, na interação com a luz visível.

2.3.1.10 Perfil energético funcional

O perfil energético funcional de um corpo (ou sistema) expressa quais formas de energia são utilizadas por ele e quais operações energéticas¹² são realizadas com essas formas, para a realização das funções do corpo. O perfil energético funcional também pode ser representado graficamente. O gráfico desse perfil é o mesmo gráfico do processo energético do corpo, apresentado no item 2.4.2.5. Isto significa dizer que, com relação à funcionalidade de um corpo, o perfil energético é caracterizado exclusivamente pelo conjunto de processos realizados por esse corpo. A figura 8, abaixo, representa o gráfico do perfil energético funcional de uma hidroelétrica.

¹² Para os conceitos de formas de energia e operações energéticas, ver itens 2.4.2.1 e 2.4.2.2.

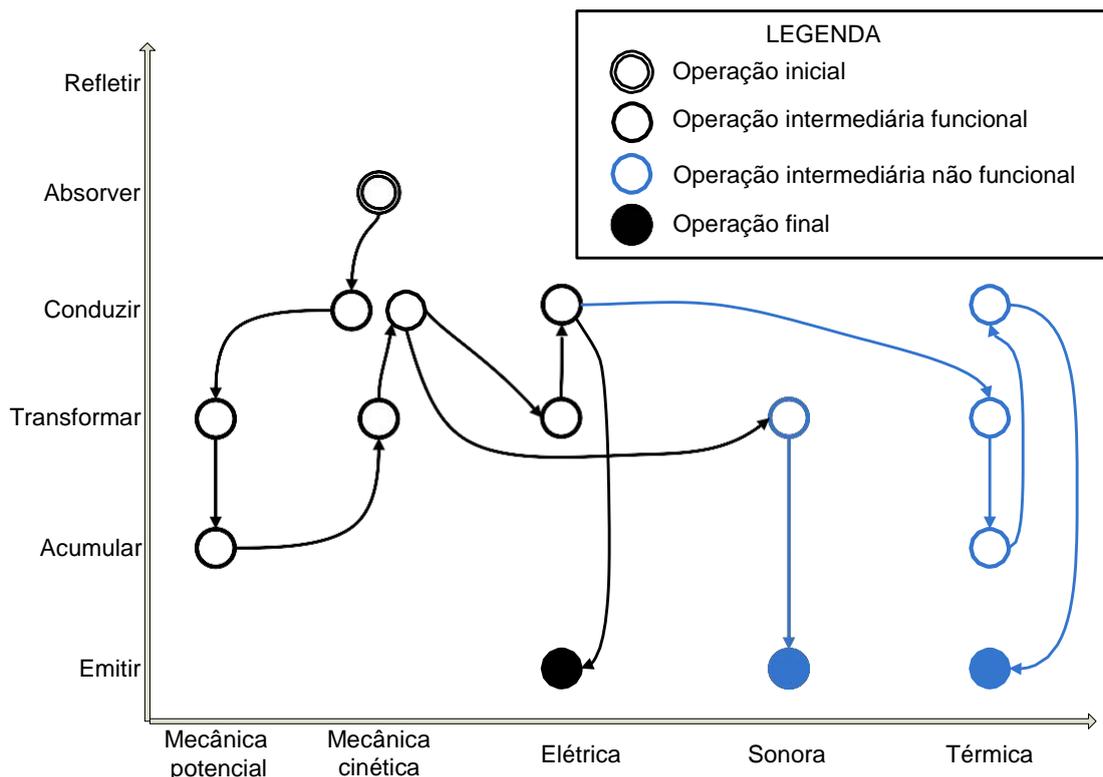


Figura 8: Gráfico do perfil energético de uma hidroelétrica.

2.3.1.11 Identidade energética e semelhança energética

Identidade energética ocorre quando dois corpos ou sistemas apresentam o mesmo perfil energético funcional. Neste caso, são irrelevantes a forma e a constituição dos corpos. As características relevantes são: que tipos de energias são utilizadas naqueles sistemas, quais as operações a que elas estão submetidas e com que intensidade os artefatos estimulam e direcionam estes processos. Por exemplo, uma barragem e uma caneta (esferográfica ou a tinteiro) apresentam identidade energética, ou seja, têm o mesmo perfil energético. Tanto em um caso como no outro, o sistema possui uma capacidade de absorver, conduzir e acumular energia cinética e potencial de líquidos e possui um mecanismo de transferência direcionada e parcialmente estimulada desta energia. Isto significa que os dois artefatos derivam de um mesmo princípio funcional básico: acumular energia cinética e transferi-la lentamente. Evidentemente, se o sistema barragem estiver acoplado a um sistema transformador de energia cinética em energia elétrica (o gerador), ele se transforma em uma hidroelétrica, enquanto o sistema caneta (se esferográfica) possui um mecanismo transferidor de energia, que é a esfera na sua ponta, o qual absorve energia cinética da mão e a converte em outras formas de energia através do atrito. Por outro lado, uma pilha, uma mola de um relógio, uma caixa d'água em um telhado e o tanque de um automóvel atuam sob o mesmo princípio básico de acumulação de energia, porém com diferentes formas de

energia. Nesse caso, é possível considerar que esses sistemas apresentam semelhança energética, pois seus perfis funcionais são idênticos, mas suas energias são diferentes.

2.3.1.12 Relação entre os conceitos de constituição, forma e função

Na figura 5, os conceitos de constituição (e, dentro dele, os conceitos de substância e estrutura interna), de forma e de função estão ligados por setas bidirecionais, significando que estes conceitos são considerados como exercendo mútua influência. Tal influência, entretanto, não é simétrica.

A função é francamente propositiva, ou seja, ela conduz à adoção de determinadas características de forma e constituição do corpo, de maneira a permitir ao corpo um desempenho compatível com aquela função. Esta relação pode ser identificada no preceito “a forma sempre segue a função” (SULLIVAN, 1896, p. 11), adotada por designers e arquitetos.

A constituição e a forma, por outro lado, ao mesmo tempo em que viabilizam a função, agem sobre ela de forma restritiva. Ou seja, a função a ser desempenhada é limitada, em sua amplitude ou qualidade, pelas características de forma e constituição. Por exemplo, a forma de uma viga, a distribuição da ferragem (estrutura interna) e a quantidade de cimento no concreto (substância), ao mesmo tempo em que viabilizam que ela suporte determinada carga, ao longo do plano vertical que a contém, limitam a sua capacidade de carga. Uma porta, ao mesmo tempo em que permite a passagem entre dois ambientes, limita a passagem dos objetos a uma determinada largura e altura. Devem, ainda, ser consideradas as relações em que a constituição e a forma apresentam soluções ótimas para uma determinada função. No caso da constituição, a maximização é um conceito teórico, porque o máximo é inatingível. Por exemplo, o ótimo de um condutor elétrico é apresentar resistência zero. Supercondutores apresentam resistência desprezível, mas mensurável. O mesmo vale para o isolamento térmico. A substância aerogel apresenta uma baixíssima condutibilidade térmica, mas ela também é mensurável. No caso da forma, existem soluções ótimas para algumas funções. Por exemplo, o ótimo (mínimo) para a função superfície de um determinado volume é a esfera; e o mínimo da função parede, para dividir um determinado espaço em frações iguais, é o desenho hexagonal (favo de abelha).

A relação entre forma e constituição geralmente é de mútua compensação, ou seja, de complementariedade funcional. Uma determinada função é desempenhada através de uma combinação variável de forma e constituição, de maneira que uma compense a deficiência da outra. Por exemplo, no caso do desempenho estrutural de uma viga de concreto armado, uma constituição que permite uma maior resistência à compressão do concreto, por unidade

de área (obtida com uma maior adição de cimento, por exemplo), permite que a viga tenha uma menor seção e, portanto, uma forma mais esbelta, com menor utilização de massa; enquanto uma viga mais alta permite que o concreto tenha uma menor resistência à compressão. Esta relação entre forma e constituição pode ser generalizada, ao considerar-se que a capacidade de uma determinada constituição de desempenhar determinada função por unidade (de área, de volume, de massa, ou outra variável) implica na redução do total daquela medida (área, volume, massa, ou outra variável), alterando, assim, a sua forma.

Todas estas relações devem ser consideradas no desenvolvimento de soluções, sempre considerando, também, que diferentes funções poderão ser desempenhadas por combinações de constituição e forma, em diferentes níveis hierárquicos.

2.3.2 Conceitos complementares ou qualitativos

Os conceitos complementares são conceitos auxiliares aos conceitos básicos e sua principal função é caracterizar os produtos do processo construtivo, de acordo com algumas características importantes, que servirão para qualificá-los. Estas características serão valorizadas e interpretadas de modo diferente, em diferentes paradigmas. Portanto, estes conceitos servem para qualificar, de modos diferentes, os produtos em cada paradigma. Eles serão apresentados, sempre que possível, em pares de atributos (ou qualidades) opostos, para mostrar uma dimensão, que vai de um extremo, onde um dos dois conceitos do par é absoluto, até o outro extremo, onde o outro conceito é absoluto. Por exemplo, os conceitos de homogeneidade e heterogeneidade são opostos, ou seja, mutuamente excludentes. O par define uma dimensão, que vai da homogeneidade absoluta à heterogeneidade absoluta.

Sozinhos, os conceitos complementares devem ser entendidos como propriedades gerais e abstratas, atributos gerais dos corpos. Mas suas aplicações em cada paradigma ajudam a definir as características do próprio paradigma e de seu modo de funcionamento. Ou seja, um paradigma que estimula a homogeneidade, por exemplo, tem como uma de suas características a produção e utilização de produtos intermediários, onde a homogeneidade é uma propriedade buscada e os processos são definidos como meios para a obtenção desta homogeneidade, dentre outros atributos.

O quadro 1 descreve os conceitos complementares dos produtos intermediários. Na coluna à esquerda encontram-se as características básicas dos conceitos complementares: complexidade, variabilidade e eficiência. Nas outras colunas, nas duas primeiras linhas estão os conceitos básicos: função, constituição (substâncias e estrutura interna) e forma (geometria e escala). As células internas do quadro descrevem os conceitos

complementares, que apresentam uma determinada característica básica (complexidade, por exemplo), em um determinado conceito básico (constituição – substância, por exemplo). Esse conceito complementar refere-se à complexidade da molécula e a interação entre moléculas.

Quadro 1: Conceitos complementares dos produtos intermediários da construção.

CARACTERÍSTICA	CONCEITO BÁSICO				
	FUNÇÃO	CONSTITUIÇÃO		FORMA	
		SUBSTÂNCIAS	ESTRUTURA INTERNA	GEOMETRIA	ESCALA
COMPLEXIDADE	Monofuncionalidade e multifuncionalidade	Complexidade da molécula e interação entre moléculas	Hierarquia e interação entre níveis, emergência	Complexidade geométrica	Fractais
VARIABILIDADE	Isotropia e anisotropia	Homogeneidade e heterogeneidade a nível molecular	Homogeneidade e heterogeneidade nos diversos níveis	Constância formal e variação formal	Mono e multi-escala
EFICÁCIA	Desempenho	Precisão e aleatoriedade (erro e tolerância no grau de pureza das substâncias)	Precisão e aleatoriedade (erro e tolerância nos diversos níveis)	Precisão e aleatoriedade (erro e tolerância nos diversos níveis)	Precisão e aleatoriedade (erro e tolerância nos diversos níveis)

Alguns dos conceitos apresentados no quadro estão em negrito, porque são discutidos em maior detalhe, abaixo. Estes conceitos foram selecionados porque eles são os mais relevantes na compreensão da estrutura dos próprios paradigmas.

2.3.2.1 Precisão e aleatoriedade

A precisão pode ser de substância, de estrutura interna ou de forma. A precisão de substância refere-se à pureza das substâncias que compõem determinado corpo ou à quantidade exata de átomos, de cada um dos elementos que compõem aquele corpo. A precisão da estrutura interna refere-se à precisão dos arranjos internos, em cada um dos níveis do corpo, desde o nível molecular até o nível macroscópico; precisão, tanto na quantidade, quanto na posição destes arranjos. A precisão de forma refere-se à geometria e às dimensões do corpo do produto de construção. Evidentemente, a aleatoriedade refere-se às mesmas características básicas, porém com significado oposto. Assim, a aleatoriedade de substância refere-se às impurezas, tanto de outras substâncias, quanto de elementos em arranjos, onde as ligações são metálicas ou iônicas.

2.3.2.2 Homogeneidade e heterogeneidade

A homogeneidade, assim como a heterogeneidade, pode ser de substância, estrutura interna ou forma. A homogeneidade de substância significa que apenas uma substância está presente no corpo, como um todo, ou em determinado nível de organização, como o nível de um monocristal. A homogeneidade de estrutura interna é a repetição daquela estrutura por toda a extensão do corpo ou por toda a extensão da estrutura, em determinado nível. Considere-se, por exemplo, um corpo monocristalino. Neste caso, a homogeneidade é absoluta, nos diversos níveis do corpo. Entretanto, se em um nível acima do nível molecular, como no caso de cristais de perlita, no aço, a homogeneidade existe dentro do cristal, mas não no nível acima, então a homogeneidade restringe-se ao nível interno de cada cristal. O mesmo vale para corpos com múltiplos cristais, do mesmo mineral ou metal, como no caso de uma placa de silício, com cristais justapostos. A homogeneidade da forma deve fazer referência a uma das três dimensões espaciais. Assim, um perfil de aço com uma seção U apresenta homogeneidade de forma no eixo longitudinal do perfil. A homogeneidade da forma é geralmente referida, neste texto, como constância formal, para distingui-la da homogeneidade de constituição.

2.3.2.3 Monofuncionalidade e multifuncionalidade

O número de funções que um corpo pode realizar, quando já em uso, normalmente apresenta uma relação direta com a complexidade deste corpo. Esta relação pode ser apreendida em um simples exemplo: o iPhone tem muitas funções, além de telefone, tais como comunicação por email, bloco de notas, gravador, câmera fotográfica, filmadora e GPS. Um telefone comum, muito mais simples, tem somente a função telefone. Esta observação, embora pareça óbvia, na verdade, expressa uma diferença de concepção no desenvolvimento de produtos. A multifuncionalidade é uma característica ausente na grande maioria de produtos desenvolvidos para a área de edificações, onde os elementos tendem a ser monofuncionais. Assim as fundações, a estrutura, as instalações elétrica e hidráulica e o telhado são caracteristicamente monofuncionais. Existe uma tendência no design à produção de produtos multifuncionais, como o já citado iPhone, os processadores de alimentos e os computadores. As janelas são um exemplo notável de multifuncionalidade na edificação, pois realizam as funções de controle da passagem de luz, de ar, de insetos (quando possuem tela) e de som, quando adequadas a esta finalidade.

A multifuncionalidade pode ser paralela ou sequencial. A primeira ocorre quando as diversas funções podem ser realizadas pelo corpo simultaneamente. No caso citado da janela, as funções de passagem de luz e abatimento do som, por exemplo, são realizadas simultaneamente. A segunda ocorre quando as funções são, necessariamente, realizadas

em momentos diferentes. No mesmo caso da janela, a liberação para a passagem de ar e o abatimento do som são realizados, obrigatoriamente, de maneira não simultânea.

Finalmente, é preciso distinguir entre multifuncionalidade em uso e potencial. No primeiro caso, a realização de uma função não impede o corpo de realizar outras funções, simultânea ou seqüencialmente. No segundo caso, uma vez que o corpo tenha sido utilizado em para a realização de uma função, as outras funções ficam inviabilizadas. Este é o caso, por exemplo, de um lingote de alumínio. Muitas funções podem, potencialmente, ser realizadas por aquele lingote. Mas, uma vez definida uma função e feita a utilização do corpo para a sua realização, as outras funções ficam impossibilitadas de ocorrer, ao menos sem a alteração do corpo já em sua nova função. A maneira do corpo voltar a ter sua funcionalidade potencial restituída seria via reciclagem do alumínio.

Esta definição está de acordo com as definições que serão feitas, mais adiante, sobre matérias primas, materiais e componentes.

A monofuncionalidade está intimamente ligada à questão da homogeneidade dos materiais, como será visto mais adiante, na discussão do paradigma atual.

2.3.2.4 Isotropia e anisotropia

A isotropia refere-se à resposta do corpo a um estímulo, em diferentes direções. Quanto mais similares as respostas, mais isotrópico é o corpo, para aquelas direções e para aquele estímulo. Considerando-se que a resposta desejada do corpo ao estímulo é a sua função específica, a isotropia refere-se a funções específicas. Por exemplo, se o estímulo é uma força de tração, a resposta do corpo é a resistência a esta força. Se o estímulo é uma onda sonora, a resposta é a condução desta onda através do corpo. A isotropia está normalmente associada à homogeneidade, embora esta correlação possa ser válida para algum nível de organização, embora não o seja em outros, do mesmo corpo. Por exemplo, um material ferromagnético pode ser homogêneo na sua estrutura química e anisotrópico, com relação ao campo magnético, porque ele também tem precisão (em oposição à aleatoriedade), no que se refere à orientação de sua eletrosfera. A isotropia também está normalmente associada à monofuncionalidade, enquanto a anisotropia está, muitas vezes, associada à multifuncionalidade.

A anisotropia pode advir da heterogeneidade, em qualquer escala, desde a escala atômica/molecular, até a escala macroscópica. Esta heterogeneidade pode ser expressa na constituição, mas também na forma, como nos materiais com coeficiente de Poisson negativo (FRIIS et al., 1988).

Seres vivos são sempre anisotrópicos, devido à sua heterogeneidade em diversas escalas. Isso permite que otimizem seu desempenho, utilizando o mínimo de material. A concha dos moluscos, por exemplo, apresenta diferentes resistências à compressão e à tração, na direção perpendicular ao plano de crescimento dos cristais de aragonita, se comparados a essas resistências, no plano de crescimento (DASHKOVSKIY et al., 2007).

Em alguns casos, a anisotropia pode ser também de sentido, além de direção, dentro do corpo. Um caso típico é o comportamento dos semicondutores. Seres vivos também apresentam esse comportamento unidirecional.

2.3.2.5 Constância e variação formal

A constância formal pode ocorrer em uma, duas ou nas três dimensões de um corpo, mas também pode não ocorrer em nenhuma delas. A definição de quais dimensões serão constantes depende de dois fatores: a função do corpo, que deve ser viabilizada através da interação da forma com a constituição e o processo produtivo no qual a forma é gerada. Normalmente, processos produtivos com constância formal permitem precisão nas dimensões, principalmente naquelas que são constantes, enquanto processos sem constância formal podem permitir, ou não, precisão, dependendo do tipo de processo (*bottom up* ou *top down*), como será visto mais adiante. De modo geral, com base na observação de estruturas dos seres vivos, a variação formal absoluta (nas três dimensões) com precisão permite o mais alto grau de otimização da forma e, conseqüentemente, da quantidade de material (mas não necessariamente de energia). É o caso, por exemplo, da maçaneta de uma porta, que integra ergonomia, resistência mecânica, estética, funcionalidade e custo (figura 9). No outro extremo, a variação formal absoluta sem precisão gera o mais baixo grau de otimização da forma. É o caso, por exemplo, de pedra britada para calçamento. No paradigma atual, a grande maioria dos materiais apresenta constância formal em uma ou duas dimensões. Isso se deve, como será visto no capítulo 3, à estrutura do setor da construção, que permitiu à indústria de materiais adotar processos que conduzem à constância formal, em relação à geometria e à escala.



Figura 9: Três tipos de maçanetas com variação formal.

2.3.2.6 Espaço dos conceitos complementares

Como foi visto, muitos conceitos complementares podem variar entre extremos. Portanto, é possível imaginar, para cada par de conceitos um eixo, onde cada corpo teria os conceitos manifestos em determinada intensidade, uma característica associada, que expresse os conceitos. Por exemplo, no eixo do par homogeneidade/heterogeneidade, a característica seria a variabilidade constitucional. Assim, a constituição de um corpo poderia variar de um extremo, onde este corpo seria absolutamente homogêneo, até outro extremo, onde ele seria absolutamente heterogêneo. Embora não seja possível representar graficamente mais do que três dimensões neste espaço, uma representação gráfica, tomando os conceitos de homogeneidade/heterogeneidade, isotropia/anisotropia e constância formal/variação formal, como os três eixos, poderia ser visualizada como na figura 10.

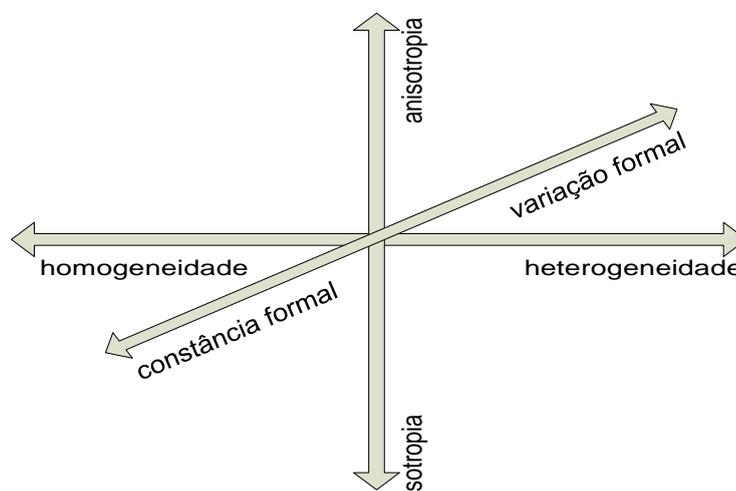


Figura 10: Espaço dos conceitos complementares.

A ideia de poder variar estas características, para obter a otimização no desempenho de funções, ao invés de eleger um extremo (homogeneidade, por exemplo), como ideal, confere uma inusitada gama de possibilidades no desenvolvimento de soluções. Além disso, a observação das estruturas produzidas pelos seres vivos permite afirmar que os conceitos normalmente eleitos como ideais pela engenharia (homogeneidade, constância formal, isotropia, entre outros) não estão presentes nessas estruturas.

2.4 O PROCESSO CONSTRUTIVO

Para que a análise do processo construtivo seja consistente com a análise realizada sobre o produto construção, é necessário considerá-lo como um processo cumulativo de trabalho, que se inicia com a extração das matérias primas e segue através de várias etapas, até

chegar ao descarte da edificação. Este descarte pode iniciar um novo ciclo, significando uma reciclagem de curto prazo (ver capítulo 4, item 4.3.2.3 Reciclagem no ambiente construído), ou poderá representar o final do processo linear, significando, uma reciclagem de longo prazo (ver mesmo item).

Independentemente da sua característica cíclica ou acíclica, o processo construtivo da edificação pode ser descrito de três maneiras distintas, mas interligadas, de acordo com o aspecto que se pretenda focar. Na primeira, as etapas do processo são classificadas de acordo com o modo como os produtos intermediários da edificação, tais como matérias primas, componentes, elementos, etc. são constituídos; ou seja, como são os seus processos constitutivos. Na segunda, os processos são vistos do ponto de vista das operações energéticas que ocorrem, considerando-se cada processo, individualmente. Finalmente, na terceira, as etapas são classificadas de acordo com o modo como os produtos intermediários são trabalhados, ou seja, de acordo com os processos produtivos, propriamente ditos, que foram utilizados em sua produção.

Do ponto de vista dos processos constitutivos, a classificação apresentada aqui refere-se a duas abordagens distintas, conhecidas como “top down” e “bottom up” (RAMSDEN, 2009; HEATH, 1999). Estes termos foram originalmente utilizados pelo Foresight Institute, em 1989, para distinguir duas formas de produção na nanotecnologia (WALDRON et al., 2004), onde o uso destes termos ainda ocorre. Entretanto, é interessante utilizar os conceitos de top-down e bottom-up em relação a todas as tecnologias disponíveis na edificação, em todas as escalas, incluindo a última escala macro, ou seja, da própria edificação.

Do ponto de vista das operações energéticas, é possível classificá-las em cinco categorias: transformação, absorção, condução, acumulação e liberação. Estas categorias podem ocorrer isoladas, ou simultaneamente, dentro de um processo. O aspecto interessante desta classificação é que ela se estende até as etapas de uso e descarte, fornecendo informações importantes com relação à modelagem de soluções.

Do ponto de vista de como os produtos são trabalhados, os processos podem ser classificados em processos transformativos (sendo alguns deles classificados, também, como processos subtrativos) e processos conectivos (também chamados de processos aditivos). Os processos transformativos são considerados, aqui, como processos produtivos primários, enquanto os processos conectivos são considerados como processos produtivos secundários. Nos primeiros, o enfoque está sobre cada corpo individualmente, enquanto, nos últimos, a questão que ganha especial relevância é a maneira como a conectividade

ocorre entre os corpos (AZAMBUJA; BONIN, 2010). A conceituação destes termos e suas aplicações no processo de construção são apresentadas abaixo.

2.4.1 Processos constitutivos

Os processos constitutivos são assim chamados porque expressam a maneira como são concebidos e constituídos os produtos intermediários da edificação, nas diversas etapas de seu processamento e montagem. Para a compreensão destes processos, é essencial o conceito de nível, conforme a descrição geral dos corpos, no que tange a sua estrutura interna. Por nível, entende-se o nível hierárquico de complexidade de determinado arranjo, em uma estrutura interna. Quanto maior a complexidade, mais alto o nível. Neste trabalho, o nível molecular foi considerado o mais baixo ou de menor complexidade, embora, evidentemente, existam arranjos em níveis inferiores. As moléculas ou células cristalinas arranjam-se em níveis sucessivamente mais complexos, passando, portanto, para níveis cada vez mais altos. Assim, cada nível incorpora todos os arranjos dos níveis inferiores e adiciona seus próprios arranjos, aumentando a complexidade da estrutura. O último (mais alto) nível de complexidade é o do corpo ou do sistema como um todo, neste caso a edificação.

2.4.1.1 Processos *top-down*

Os processos constitutivos *top-down* são caracterizados por transformar a forma e/ou a constituição de um corpo, como um todo. No paradigma atual, este corpo pode ser uma matéria prima ou um material. O resultado do processo é a obtenção de outra matéria prima, de outro material ou de um componente, através das tecnologias convencionais de produção. Por definição, as tecnologias dos processos *top-down* trabalham com o corpo como uma entidade integral, como um volume único (WALDRON et al., 2004). Isto significa que todas as transformações que ocorrem no corpo são definidas para a totalidade do corpo. Com isto, os arranjos internos, as estruturas que se formam, sejam elas cristalinas ou amorfas, seguem os parâmetros de forma e constituição definidos, no nível mais alto (macro) do corpo. Alguns exemplos de processos *top-down* deverão esclarecer melhor o conceito. Um primeiro exemplo é a produção de peças de concreto armado. Quando o concreto é vertido na forma, a forma (geometria) da peça já está definida a priori pela forma (receptáculo). Entretanto, as formas (geometrias) específicas dos cristais e dos capilares que irão se formar serão definidas *a posteriori*, a partir da forma (geometria) da peça, como um todo. Do mesmo modo, a constituição de cada parte da peça, ou seja, as substâncias que irão se formar, em cada ponto no seu interior, serão definidas a partir da constituição do concreto, que resultou da mistura de outros materiais e matérias primas. Neste exemplo, observa-se claramente que a organização do corpo (peça de concreto) ocorreu,

primeiramente, no nível mais alto (da peça como um todo) e, depois, ocorreu nos níveis inferiores. Outro exemplo de processo *top-down* é o corte de madeira. Um corpo (tora de madeira extraída de uma árvore) é recortado, dando-se a ele a forma desejada. Evidentemente, neste caso não existem transformações significativas de forma e constituição posteriores, como no caso do concreto, mas o processo continua caracterizado como *top-down*, porque foram retiradas as partes indesejadas do corpo, independentemente de sua estrutura interna. Assim, se o corte encontrou partes mais ou menos densas, nós, ou outras heterogeneidades, isto se torna irrelevante. O processo olha a peça na sua totalidade. Finalmente, pode-se imaginar um processo de estamparia de uma chapa metálica, para a produção de um espelho de fechadura. Novamente neste caso, o corpo foi conformado de maneira integral. As tensões formadas dentro do corpo, e algumas eventuais mudanças de cristalização no seu interior, decorrem desta alteração de forma, ocorrida no nível mais alto. Todos estes diferentes processos têm em comum o fato de utilizarem a abordagem *top-down* para a transformação da forma e da constituição do corpo.

2.4.1.2 Processos *bottom-up*

Estes processos podem ser encontrados, tanto em tecnologias convencionais, como em tecnologias não convencionais, como é o caso de tecnologias de manipulação atômica e molecular (HEATH, 1999). Eles podem ser agrupados, genericamente, como processos de montagem ou processos aditivos, porque as tecnologias dos processos *bottom-up* trabalham, caracteristicamente, a partir dos níveis mais baixos, com partes menores, formando gradativamente arranjos maiores e mais complexos, em níveis mais elevados. Na construção de edificações do paradigma atual, os níveis mais baixos correspondem, geralmente, a componentes ou elementos. Alguns exemplos auxiliarão a esclarecer o conceito. O primeiro exemplo é a placa cerâmica de revestimento, mais especificamente o porcelanato esmaltado. Um primeiro nível corresponde à produção da massa, que é moída e, depois, seco por aspersão. As partículas produzidas tem seu diâmetro, tipo e percentagem das diversas matérias primas e umidade controlados. Estas partículas são utilizadas para produzir o segundo nível. A massa é prensada, o que caracteriza o segundo nível, formando o biscoito, com dimensões definidas. O biscoito recebe o tardo e o revestimento de esmalte, caracterizando o terceiro nível. O biscoito é queimado (utilização de um processo transformativo), mas isto não altera o número de níveis. O segundo exemplo é uma peça de GRC (*Glass Reinforced Concrete*, ou concreto reforçado com fibras de vidro álcali resistente - AR). No primeiro nível, a fibra de vidro AR é produzida. Em um segundo nível, esta fibra é agregada para formar o fio. Em um terceiro nível, o fio é agregado para formar o cordão de fibra. Pelo lado da matriz de concreto, os agregados são misturados, formando o material que se transformará em matriz cimentícia. Finalmente, no processo de produção do GRC

propriamente dito, em uma das variantes, o material da matriz cimentícia e a fibra são projetados, simultaneamente, em camadas. Cada camada é sobreposta à anterior e o resultado final é uma placa, com uma espessura total igual à somatória das espessuras das camadas projetadas. A camada final de GRC atinge mais um nível de complexidade. No caso das fibras, são 6 níveis de complexidade (níveis molecular, polimérico, da fibra individual, do fio, da camada individual e da camada final). No caso da matriz cimentícia, são 5 níveis (níveis molecular, do cristal, da matriz cimentícia, da camada individual de GRC e da camada final). O processo de produção de GRC é um exemplo do processo chamado camada por camada (*layer-by-layer*). Um terceiro exemplo de processo bottom-up é a execução de um telhado de madeira, como o da figura 6. No telhado de madeira, a montagem da tesoura apresenta características de um processo bottom-up. O primeiro nível, são as peças individuais que compõem a tesoura (o tirante, a perna, o pendural, etc.). O segundo nível, são as tesouras propriamente ditas. Elas são instaladas e as terças são colocadas. A integração das tesouras com as terças, formando a estrutura principal do telhado, é o terceiro nível. Quando os caibros e as ripas são colocados, formando a estrutura secundária do telhado, a combinação de estrutura primária com estrutura secundária formam um quarto nível, o nível da estrutura completa do telhado. A colocação das telhas forma um telhado completo. Embora este seja apenas o segundo nível em relação às telhas, é o quinto nível, em relação às peças, que compõem as tesouras. Todos os exemplos dados mostram que processos bottom-up agregam os materiais e componentes, evoluindo do nível mais simples ao mais complexo.

2.4.2 Processos energéticos

Processo energético é o conjunto de operações energéticas que um sistema realiza, em determinada sequência, de maneira a realizar uma função para a qual aquele sistema foi projetado ou é utilizado. A classificação dos processos de construção, segundo suas características energéticas, deriva de duas constatações básicas: primeiro, todas as tecnologias de engenharia envolvem o uso de uma ou mais formas de energia; segundo, existem poucas formas de energia e poucos modos de atuação, chamados, aqui, de operações energéticas, manifestadas nos corpos. Desta forma, a multitude de variáveis, combinações e princípios envolvidos nos diversos processos podem ser reduzidos a esquemas bastante singelos, de grande utilidade, fácil entendimento e manipulação simplificada. Na verdade, todo e qualquer sistema pode ser expresso, na sua essência, através da compreensão de suas características energéticas, ou seja, ser representado por um modelo energético. Aqui, o conceito de sistema é funcional, como visto no item sobre função de um corpo (item 2.3.1.8).

2.4.2.1 Formas de energia

Desde o ponto de vista da engenharia, as diferenças entre as diversas manifestações físicas da energia – as formas de energia – são importantes por três motivos: a) as diversas formas de energia comportam-se de modo diferente no mundo físico, atuando de diferentes maneiras sobre os corpos; b) as transformações de uma forma de energia em outra dependem das formas de energia envolvidas; c) os usos que são feitos das diversas formas de energias são específicos. São consideradas, aqui, oito formas básicas de energia, segundo uma abordagem fenomenológica¹³. São elas: sonora, luminosa, elétrica, magnética, térmica, eletromagnética, mecânica e química. Esta classificação pode ser contestada ou alterada, de acordo com cada aplicação específica, mas sua intenção básica é lidar com as formas de energia, conforme elas se apresentam e são apropriadas fenomenologicamente pelos seres humanos. A seguir, são feitos breves comentários sobre cada forma.

Energia sonora é, na verdade, um caso particular de energia vibracional, que por sua vez é energia mecânica. Mas a energia vibracional, quer ela seja transmitida por um meio sólido ou fluido, pode ser percebida pelo sentido da audição, quando com frequência compreendida entre 20 Hz e 20 kHz, e tem um papel importante no desempenho das edificações, já que quando ocorrente entre determinados limites de intensidade pode ser audíveis em níveis que são considerados confortáveis, ou não.

Energia luminosa é a energia eletromagnética na faixa da luz visível.

Energia elétrica envolve o deslocamento de elétrons ou de íons. Além disto, embora a energia elétrica tenha efeitos magnéticos, as duas são consideradas separadamente. As manifestações da energia magnética podem ocorrer com a passagem de corrente elétrica por um corpo (condutor?), ou através de ímãs permanentes.

Energia térmica, quando ocorre em um corpo, corresponde ao grau de excitação dos átomos e moléculas deste corpo. Quando manifestada em forma de ondas eletromagnéticas, portanto fora dos corpos, também pode ser percebida como calor, que é emitido ou absorvido pelo corpo.

Energia eletromagnética é toda forma de energia associada a ondas eletromagnéticas, estando aí incluídas as ondas na faixa da luz visível e do infravermelho, que foram descritas em separado.

¹³ A fenomenologia é uma abordagem filosófica fundada por Husserl, em que o conhecimento é baseado nos fenômenos percebidos e organizados pela consciência.

Energia mecânica é a forma de energia que envolve o deslocamento de corpos. Ela pode se apresentar na forma de energia cinética, potencial ou elástica (que é a energia potencial acumulada através da deformação dos corpos). A inclusão da energia elástica, como um tipo de energia mecânica, deverá ser mantida, exceto quando a sua separação for importante para a compreensão do sistema.

Energia química é a energia contida nas ligações atômicas, quer elas sejam iônicas, covalentes ou metálicas.

2.4.2.2 Operações energéticas

Todas as formas de energia mencionadas se manifestam, com maior ou menor frequência, durante o processo construtivo. Nessas manifestações podem ocorrer cinco operações energéticas dentro do sistema: absorção, acumulação, condução, transformação e emissão. Além desses cinco, ocorre a operação de reflexão, quando a energia não é absorvida pelo sistema. É apresentada, a seguir, uma breve descrição de cada uma dessas operações, iniciando com a absorção. Para tal, será utilizada a nomenclatura normalmente empregada em termodinâmica: essas operações ocorrem em sistemas e estes sistemas estão em um meio.

A absorção é a primeira operação, que ocorre na fronteira de um determinado sistema, quando alguma forma de energia incide sobre ele. Considera-se, aqui, que a absorção ocorre com a mesma forma de energia que se tornou disponível ao sistema. Isto significa que ele é formado por um ou mais corpos, que possuem uma constituição e uma forma de viabilizar esta absorção. Após a absorção, que nada mais é do que a entrada da energia no sistema, ele pode acumular, conduzir ou transformar a energia absorvida. Nos processos de produção da edificação, ocorre a absorção de energia mecânica cinética para movimentação, elétrica, térmica e química para transformação. Uma edificação absorve diversas formas de energia, algumas com função, outras sem função. Dentre as formas de energia que são absorvidos sem função estão: a energia cinética do vento, que incide sobre a estrutura (evidentemente quando não é convertida em energia elétrica), a energia térmica e a energia eletromagnética, de alta frequência (abaixo de 200 nm), que degrada os materiais.

A acumulação de energia ocorre quando o sistema absorve energia a uma taxa maior do que a energia que é emitida por ele para o meio. Os produtos intermediários da edificação acumulam, durante o processo de produção, energia química (como o cimento), energia térmica, energia mecânica cinética e potencial, dentre outras. As edificações acumulam diversas formas de energia, com ou sem uma função determinada. Dentre as formas

funcionais de energia acumuladas em uma edificação encontram-se energia mecânica, elétrica, química, térmica e magnética. Na realidade, uma edificação de vários andares pode ser vista como um acumulador discreto de energia mecânica potencial. Ou seja, cada andar acumula energia em determinado nível. Evidentemente, os níveis são planos horizontais, porque planos inclinados permitiriam que tudo o que estivesse sobre determinado piso pudesse variar a sua quantidade de energia potencial, transformando-a em energia cinética. Existem, entretanto, diversas situações em que planos inclinados são vantajosos exatamente porque permitem a transformação da energia potencial em energia cinética. É o caso, por exemplo, das águas do telhado ou dos planos inclinados dos terraços e dos pisos úmidos internos. Caixas d'água também são acumuladores de energia mecânica potencial e baterias acumulam energia elétrica, enquanto combustíveis (gás, lenha e outros) acumulam energia química. Dentre as formas de energia cuja acumulação é indesejada, a mais evidente é energia térmica. Além desta, a energia mecânica elástica, que se acumula na deformação da estrutura do prédio.

A condução de energia é um processo que pode ocorrer dentro do sistema, por canais que foram projetados para isto ou não. Nos processos produtivos, os canais condutores de energia estão nos equipamentos (principalmente canais de energia mecânica, elétrica, térmica e química) ou são canais existentes nos próprios corpos, que devem ser transformados nos processos produtivos. Dentre as energias com canais projetados na edificação, podem ser citadas: energia mecânica, que flui através do elevador e das escadas; energia elétrica, através dos fios, cabos e componentes elétricos; energia térmica, através dos dutos e equipamentos mecânicos de ar condicionado; energia térmica, através do ar; energia sonora, através do ar; energia luminosa, através dos vidros e do ar. A condução de energia também ocorre de forma indesejada, como a energia térmica, através das paredes; a energia sonora, através de janelas, portas, lajes e paredes, e a energia magnética de transformadores, através do ar e de paredes.

Teoricamente, a transformação de energia pode ocorrer de qualquer forma de energia para qualquer outra forma e pode ocorrer, simultaneamente, para duas ou mais formas distintas. Além disto, a transformação pode ocorrer instantaneamente, após a absorção, quando também se inicia o processo de condução, ou após o processo de condução de energia. Um sistema que absorveu determinada quantidade de energia transforma toda a energia recebida, que exceder sua capacidade de condução da forma absorvida. Por exemplo, um fio tem determinada capacidade de conduzir energia elétrica. A energia que for absorvida pelo fio e não for conduzida, será transformada em energia térmica. É preciso observar, entretanto, que o inverso não é verdadeiro, ou seja, um sistema não precisa ultrapassar sua

capacidade de condução para transformar uma energia em outra. Especificamente, este é o caso da energia térmica acumulada no sistema, que está constantemente sendo transformada em energia eletromagnética (radiação infravermelha). Não existe razão externa para esta emissão de energia, visto que ela já estava acumulada no sistema. De fato, a energia eletromagnética e especificamente os raios infravermelhos são o produto contínuo de muitos processos de transformação dos produtos intermediários da construção. São também o produto de processos que ocorrem dentro da edificação, durante a sua etapa de uso.

A emissão de energia para o meio ocorre após os outros processos. Normalmente, três tipos de energia são emitidos, tanto nos processos de produção dos produtos intermediários da construção, quanto na etapa de uso da edificação: energia sonora, luminosa e térmica. Outras formas de energia também podem ser emitidas, mas sua frequência é menor, tais como energia magnética e radiação eletromagnética. Essa emissão de energia causa a redução da entalpia do sistema. Em muitos casos, a emissão da energia não é uma função do sistema. Dois casos funcionais são a emissão de energia luminosa e de energia térmica.

Finalmente, a reflexão ocorre quando a energia não entra no sistema. Em alguns casos, a reflexão é um processo energético desejado e funcional. Este é o caso, por exemplo, da energia térmica, da energia luminosa e da energia sonora. Em outros casos, a reflexão significa, simplesmente, que o sistema não permite que a energia atravesse uma barreira, que se encontra dentro do sistema. É o caso, por exemplo, da energia elétrica, que não consegue ser transmitida através do material isolante do fio condutor.

2.4.2.3 Relações entre as operações energéticas

É possível expressar todas as correlações entre as operações energéticas que ocorrem em um sistema através da figura 11, abaixo, desenvolvida pelo autor:

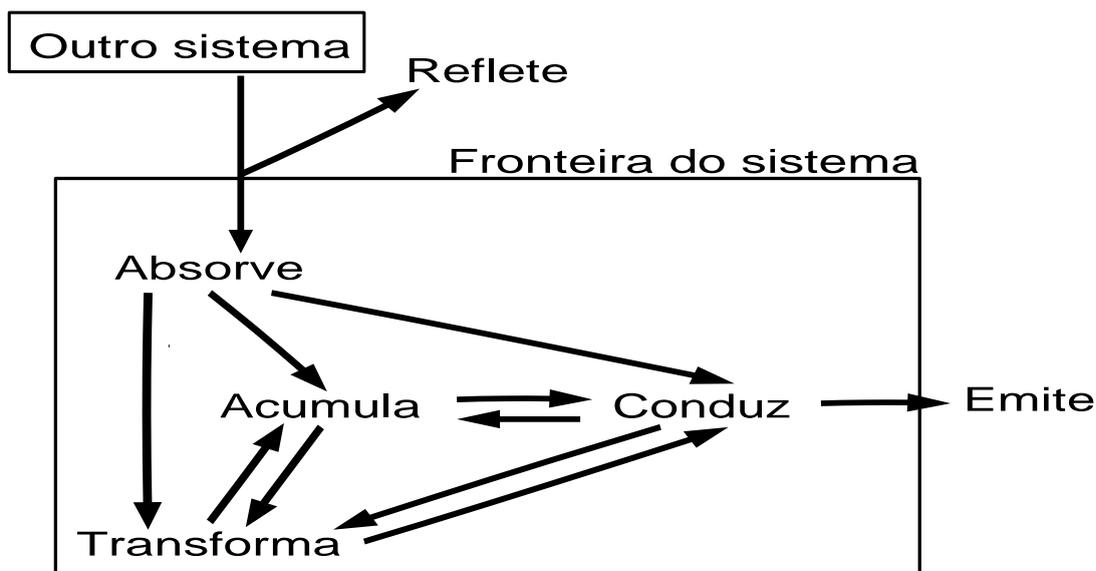


Figura 11: Gráfico geral de operações energéticas que atuam em um sistema.

Além disso, as seis operações podem ser pareadas. Cada par é formado por duas operações mutuamente excludentes, como visto no quadro 2, abaixo.

Quadro 2: Operações energéticas mutuamente excludentes.

OPERAÇÕES MUTUAMENTE EXCLUDENTES	
Absorver	Refletir
Acumular	Emitir
Conduzir	Transformar

Para os dois primeiros pares, a relação é bastante clara: se o corpo absorve uma energia, ele não a reflete. Isto é, os dois processos são mutuamente excludentes, para uma determinada energia que incide sobre o corpo. Assim, também, se o corpo acumula uma energia, ele não a emite. Ele não pode acumular e emitir, ao mesmo tempo, a mesma energia. Para o terceiro par, é necessário compreender a natureza das operações de condução e transformação. Conduzir significa transportar a mesma forma de energia através do corpo, sem transformá-la. Por exemplo, quando uma corrente elétrica passa através de um fio de cobre, uma parte da energia é conduzida através do fio e outra parte é transformada em energia térmica. Assim, a transformação de uma energia em outra, em oposição à condução, está diretamente relacionada com a eficiência do sistema em conduzir energia (e, em muitos casos, à massa que está associada com aquela energia). Outro

exemplo ocorre quando a energia luminosa passa através de uma lâmina de vidro. Uma parte (pequena) desta energia é transformada em energia térmica.

2.4.2.4 Efeitos do sistema sobre as operações energéticas

Todos os sistemas podem causar diversos efeitos sobre a energia que incide sobre eles e/ou que está contida neles. Mais especificamente, os sistemas podem estimular ou inibir as seis operações a ocorrerem com as oito formas de energia. Além disso, eles podem direcionar, concentrar ou dispersar essas energias. Isso depende, essencialmente, das características e do arranjo dos corpos dentro dos sistemas.

O sistema considerado pode ser um produto intermediário da edificação, um equipamento que produz esse produto ou a edificação, como um todo. Cada corpo dentro do sistema apresenta características de constituição e forma que produzem os efeitos desejados. Além disso, a interação entre os diversos corpos (ou subsistemas) gera sinergias e qualidades (portanto características) emergentes. É possível combinar os diversos efeitos com as seis operações mencionadas, de maneira que existem muitas combinações possíveis de efeitos e operações, que podem ocorrer dentro do sistema.

2.4.2.5 Gráficos de processos energéticos

É possível mostrar graficamente um processo energético ocorrendo em um sistema. No eixo das abscissas são dispostas as formas de energia envolvidas no processo e no eixo das ordenadas as operações energéticas realizadas com aquela forma de energia. Assim, um artefato que absorva uma determinada quantidade de uma forma de energia, poderá transformá-la, transportá-la ou acumulá-la, em processos sucessivos (não necessariamente nesta ordem) graficamente representados. Um exemplo de tal tipo de gráfico é mostrado na figura 12, onde é representado o processo energético da iluminação de uma sala. Evidentemente, este processo equivale à função de iluminação do sistema considerado, conforme descrito em 2.3.1.8. Para simplicidade, o sistema considerado inclui o interruptor de luz, os fios do interruptor até a luminária, a luminária e a lâmpada.

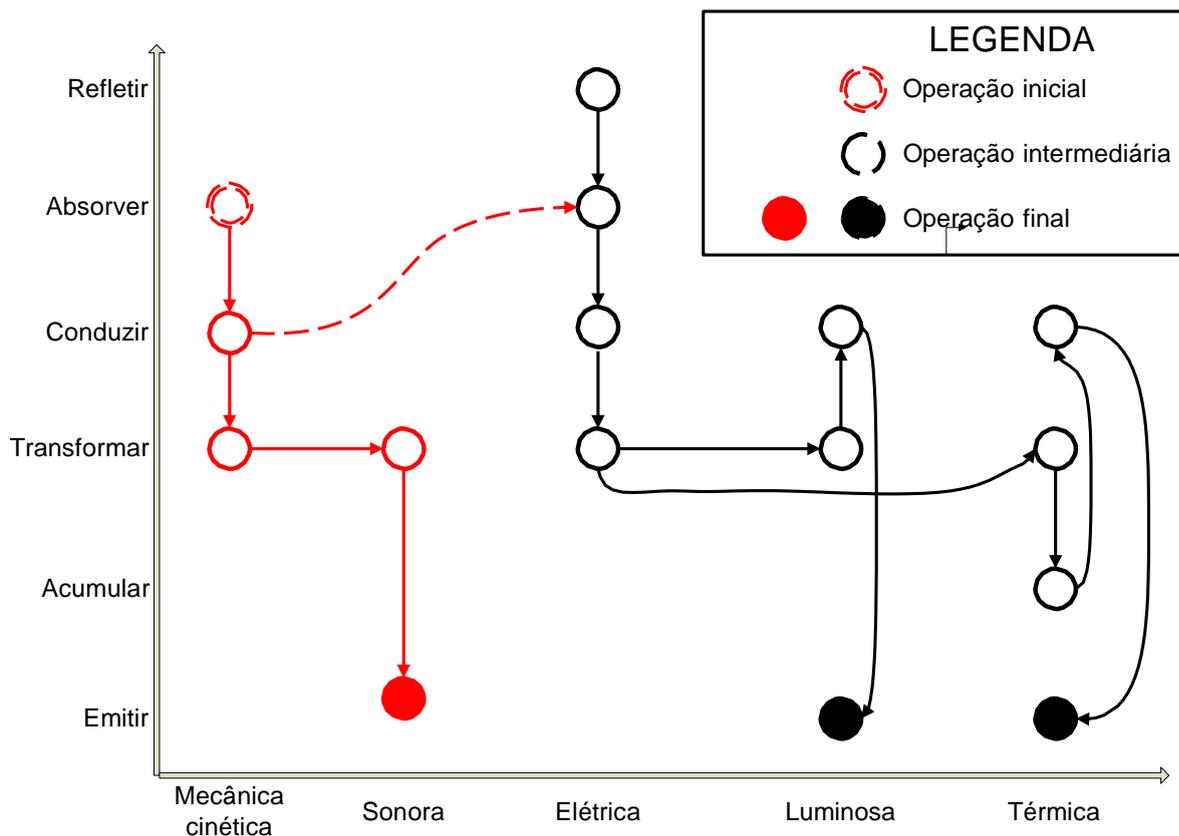


Figura 12: Gráfico de processo energético do sistema iluminação.

Este gráfico poderia ser sofisticado se fosse acrescida a informação sobre os efeitos do sistema sobre o processo, que estariam ocorrendo com cada forma de energia (direcionamento, concentração, dispersão, estimulação e inibição).

2.4.2.6 Aplicação do conceito de processo energético

Os conceitos expostos acima podem ser aplicados na resolução de problemas de engenharia. As vantagens na utilização de um enfoque nos processos energéticos para a resolução de problemas são:

- Compreender o problema sem invocar as características de constituição e forma envolvidos, ou seja, sem a caracterização previa dos corpos a serem projetados ou utilizados;
- Comparar os perfis energéticos de diversos corpos com o perfil definido pelo problema;
- Manipular o perfil energético, buscando otimizar os processos envolvidos no sistema, para o atendimento das funções definidas para o mesmo.

2.4.3 Processos produtivos

Diversas disciplinas da engenharia classificam seus processos em grandes grupos de atividades e a taxonomia adotada por cada disciplina depende, essencialmente, das suas tecnologias. A engenharia química define uma operação unitária como uma atividade básica de transformação das características da matéria que está sendo processada. As operações unitárias reconhecidas são classificadas em grandes grupos de processos envolvendo: fluxos de fluidos (transporte de fluidos, filtração, fluidização de sólidos); transferência de calor (evaporação, condensação); transferência de massa (absorção de gases, destilação, extração, adsorção, secagem); termodinâmica (liquefação de gases, refrigeração); e atividade mecânica (transporte de sólidos, moagem e pulverização, peneiramento e seleção). Outras operações unitárias também envolvem: combinação (mistura); separação (destilação) e reação (química) (MCCABE et al., 2005). Por seu lado, a engenharia mecânica também desenvolveu sua própria taxonomia, criando cinco famílias de processos físicos unitários: processos de mudança de massa, que removem ou adicionam material; processos de mudança de fase, que produzem, por exemplo, uma parte sólida a partir de um líquido ou gás; processos de mudança de estrutura, que alteram a microestrutura da peça; processos de deformação, que alteram a forma de uma peça sólida; e processos de consolidação, que combinam materiais para formar uma parte ou componente (UNPRC, 1995).

Estas classificações eminentemente fenomenológicas podem ser agregadas e reclassificadas em esquemas mais amplos e genéricos dos processos produtivos. O World Resources Institute apresenta o fluxo de materiais, ao longo de sua vida útil comercial. Este fluxo, apresentado na figura 13, caracteriza os processos produtivos, de acordo com uma sequência cronológica, que se inicia com a obtenção das matérias primas, a partir de corpos naturais, seguindo até o descarte do corpo usado e desgastado (WRI, 2005).

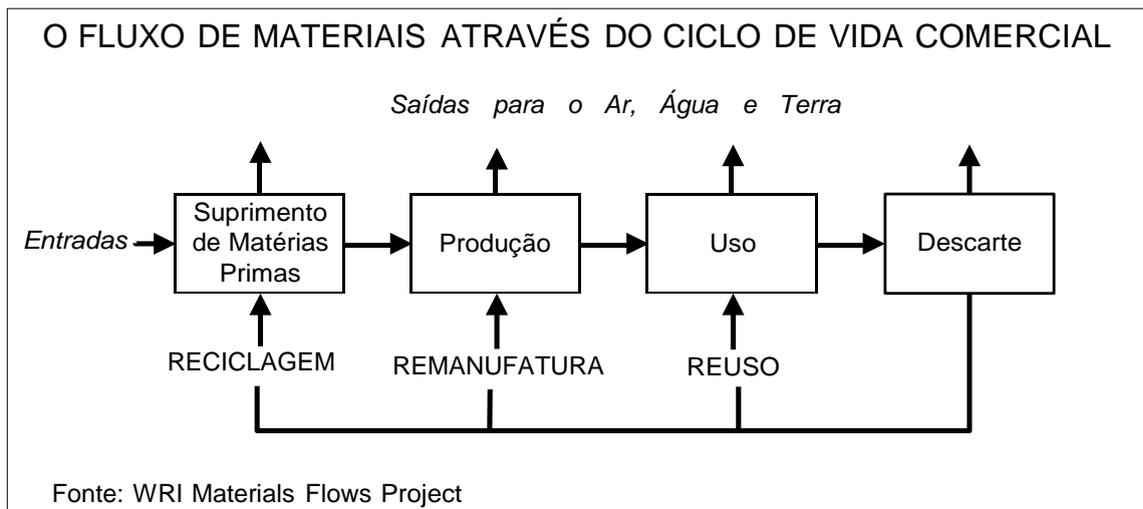


Figura 13: Fluxo de materiais, ao longo de seu ciclo de vida comercial (WRI, 2005).

De modo semelhante, a OECD apresenta um fluxo de matéria, com a diferença de considerar cinco etapas, ao invés de quatro. Este fluxo está apresentado na figura 14, abaixo. O diagrama proposto pela OECD apresenta uma divisão que é mais compatível com a divisão que será apresentada para os processos produtivos, como será visto mais adiante. De modo semelhante, outros autores apresentam fluxos de produção, uso e descarte. Fiksel apresenta um esquema que incorpora o processo específico a níveis de maior complexidade (FIKSEL, 2003), enquanto Mihelcic e Zimmerman apresentam um fluxo que tenta capturar as peculiaridades da produção de infraestrutura (MIHELICIC; ZIMMERMAN, 2010).

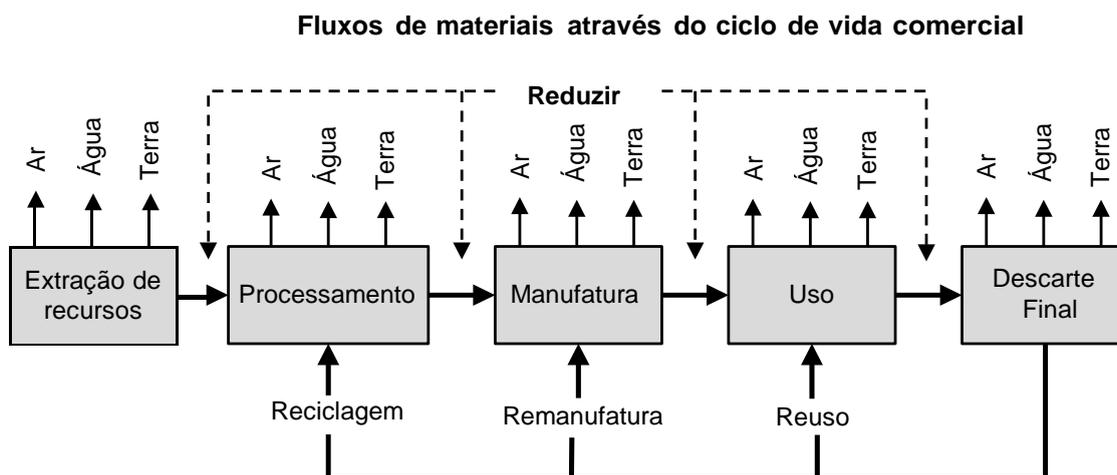


Figura 14: Fluxo de materiais proposto pela OECD (OECD, 2008).

Estas sequências simples e genéricas foram utilizadas como base para uma sequência vinculada aos processos transformativos e conectivos, que é, ao mesmo tempo, mais detalhada e apresenta seus elementos em uma sequência mais ampla, que inclui todos os processos de constituição, que poderia, inclusive, ser utilizada para a descrição dos

processos que ocorrem com os seres vivos. Esta sequência, desenvolvida pelo autor desta tese, é apresentada na figura abaixo (figura 15). Deve-se notar que as atividades de manutenção não foram destacadas no esquema apresentado, porque, para fins deste estudo, a manutenção utiliza os mesmos materiais, componentes, elementos e processos utilizados na produção, de maneira que estas atividades podem ser vistas como uma repetição do esquema geral proposto, mas em escala reduzida.

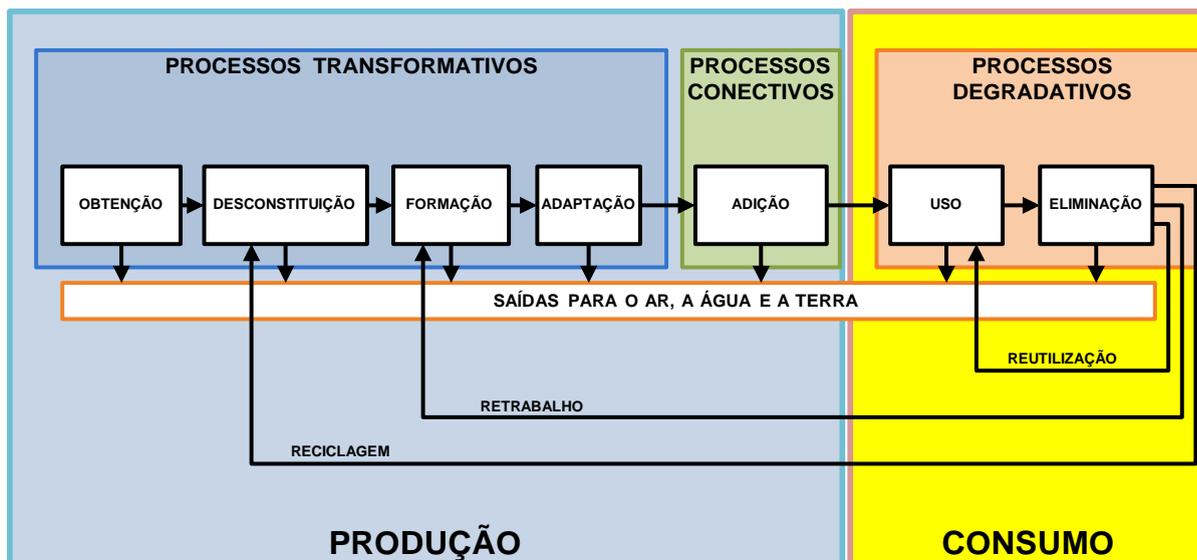


Figura 15: Classificação dos processos produtivos e degradativos.

As atividades apresentadas na figura 15 são definidas em três níveis distintos. No nível mais geral, são apresentadas (ao pé da figura) as duas grandes famílias de processos: produção e consumo. No segundo nível, surge uma classificação associada aos tipos de processo: transformativos, conectivos e degradativos, que serão descritos mais adiante. Finalmente, nos quadros do nível mais simples, estão agrupadas as atividades com características finalísticas semelhantes: obtenção, desconstituição, formação, adaptação, adição, uso e eliminação. Como foi dito, estes conceitos gerais podem ser utilizados na descrição de qualquer processo de produção, inclusive de seres vivos. O paralelo com seres vivos é importante, porque, ao longo desta tese, serão mostrados vários exemplos de soluções inspiradas em estruturas ou processos realizados por seres vivos.

O primeiro grupo de atividades do nível mais específico - obtenção de um corpo - fornece a matéria necessária ao processo produtivo. Esta obtenção pode referir-se, por exemplo, à obtenção de alimento, por um ser vivo, ou à extração de minérios, para a produção de metais. Na engenharia, este grupo de atividades está relacionado a atividades extrativistas, mineradoras, agrícolas e de reciclagem.

O segundo grupo de atividades é a desconstituição. Os corpos obtidos para os processos produtivos geralmente apresentam características de constituição (substância e estrutura interna) e de forma que não são compatíveis com aquelas desejadas para atender à função que motivou a obtenção desses corpos. Por isso, eles precisam ser desconstituídos, tanto em suas substâncias e estrutura interna, quanto em sua forma. Nos seres vivos, a desconstituição é a digestão. Na engenharia, a desconstituição envolve processos físicos de desagregação e separação e processos químicos de purificação, transformação e concentração. Em alguns casos, a constituição e/ou a forma originais dos corpos são mantidas, porque coincidem com aquelas que atendem às necessidades do uso final daquele corpo. Por exemplo, a constituição do granito é mantida quando de sua utilização para a produção de pedras de alicerce. Neste caso, apenas a forma é alterada. O mesmo ocorre com a madeira, quando desdobrada para a produção de peças de variadas bitolas. Nos casos da areia, do seixo rolado e da pedra de mão, tanto a constituição, quanto a forma já são adequadas para a sua utilização final, portanto são mantidas inalteradas. Entretanto, estes casos são a exceção e não a regra.

O terceiro grupo de atividades é a formação, que consiste em obter um corpo com características de constituição idênticas ou muito semelhantes às necessárias ao corpo final produzido. Este grupo pode incluir diversas etapas bastante distintas, envolvendo, também, processos químicos, físicos e biológicos. Nos seres vivos, a formação refere-se à produção de moléculas, que irão participar da constituição do corpo (massa), e de moléculas, que irão participar de processos de consumo de energia ou de transmissão de informação. Na engenharia, os processos de engenharia química e metalúrgica ganham preeminência.

O quarto grupo de atividades refere-se à adaptação dos corpos produzidos nos processos de formação. Estes processos de adaptação realizam a transformação final dos corpos já formados, com uma constituição total ou parcialmente definida. Eles estão focados, essencialmente, na transformação da forma destes corpos. Nos seres vivos, a adaptação ocorre dentro dos ciclos de Krebs, de Calvin (nas plantas) e do Glicoxilato (em plantas e micro-organismos), dentre outros. Na engenharia, processos mecânicos, civis e elétricos estão presentes neste grupo de atividades, com maior intensidade. Estes processos são chamados, nesta tese, de processos transformativos, porque transformam os corpos já constituídos e são realizados de maneira individualizada sobre cada corpo, que preserva sua individualidade.

O quinto grupo de atividades refere-se aos processos chamados de conectivos ou aditivos. Estes processos são caracterizados por atividades de adição; ou seja, nestes processos, os

corpos obtidos, desconstituídos, formados e adaptados nos processos transformativos anteriores, são agora agregados em estruturas de maior complexidade, em níveis hierárquicos mais altos. Estes processos estão presentes no crescimento e na manutenção dos seres vivos, assim como na montagem dos mais diversos bens na indústria. Os cinco primeiros grupos de atividades podem ser caracterizados como sendo processos de produção, porque é através deles que são produzidos todos os corpos, quer sejam naturais ou antropogênicos.

O sexto grupo envolve atividades de uso e consumo. Este uso e consumo leva ao gradativo desgaste e degradação dos corpos e sua conseqüente perda de eficiência. É importante ressaltar que desgaste e degradação são expressões da segunda lei da termodinâmica. Os corpos, ao interagirem com as diversas formas de energia que incidem sobre eles, usam parte dessa energia para transformar suas estruturas internas e suas substâncias (evidentemente afetando também sua forma). Estes processos independem do fato de a energia considerada ser funcional ou não. Por exemplo, a energia mecânica potencial, que é acumulada em um andar de um prédio, é funcional. Mas causa a gradativa degradação da estrutura que está sendo tensionada por ela. Por outro lado, a energia solar que incide sobre uma fachada não é funcional, mas degrada a tinta que nela foi aplicada.

Após o consumo, ocorre o sétimo grupo de atividades, que é a eliminação total ou parcial do corpo, que, depois, poderá seguir o caminho cíclico de degradação (biodegradação ou degradação industrial), que equivale ao processo de desconstituição de um novo grupo de processos, para a produção de novos corpos, ou pode seguir o caminho de estagnação, onde ele não é incorporado em outros processos de produção. Este corpo também pode, dependendo do grau de degradação quando da cessação do uso, ser reutilizado ou retrabalhado.

Este processo poderia ser graficamente representado como um círculo, como na figura 16 abaixo. Nele podem ser observados, além das etapas já descritas nos outros esquemas gerais de produção, dois aspectos, que também serão analisados mais adiante nesta tese: a influência da inovação tecnológica e dos valores culturais. Outros aspectos, também relevantes, mas que não receberão aqui uma análise mais aprofundada, também estão presentes. Estes aspectos, relacionados ao papel de instituições governamentais e à educação, são mencionados ao longo deste texto, quando vinculados aos outros, já mencionados.

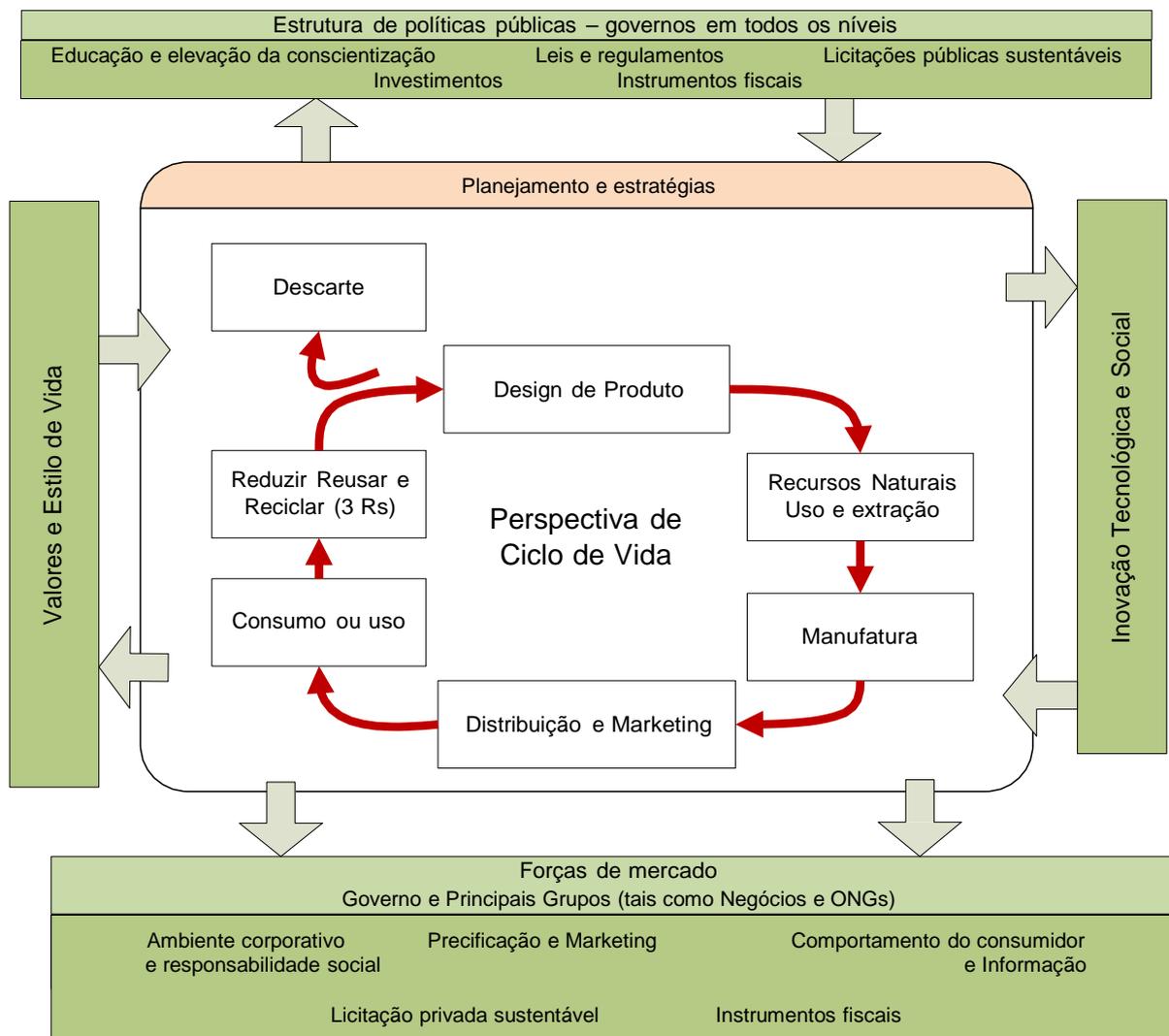


Figura 16: Processos cíclicos (UNEP, 2010).

Na produção de edificações, uma sequência equivalente de atividades pode ser identificada e correlacionada com as atividades genéricas descritas acima, porém com denominações mais específicas. Esta correlação pode ser observada na figura 17. Nesta sequência, a obtenção denomina-se extração, que pode ser de corpos de origem mineral ou biológica. O próximo grupo de atividades é de beneficiamento, equivalente ao processo geral de desconstituição. O terceiro grupo de atividades é a industrialização, que corresponde às atividades de formação e adaptação. Todos os grupos de atividades descritos são processos transformativos. A montagem é o quarto grupo de atividades, correspondente às atividades de adição. Todos estes processos estão vinculados à produção. Finalmente, os grupos de atividades de utilização e descarte estão relacionados ao consumo. O descarte não é, obviamente, consumo *per se*. Entretanto, não seria interessante criar mais uma categoria para incluir apenas esta atividade que, de modo geral, está vinculada ao término,

ao esgotamento da utilização. Entretanto, o descarte não pode ser confundido com a reciclagem ou a reutilização, que são atividades eminentemente de produção.

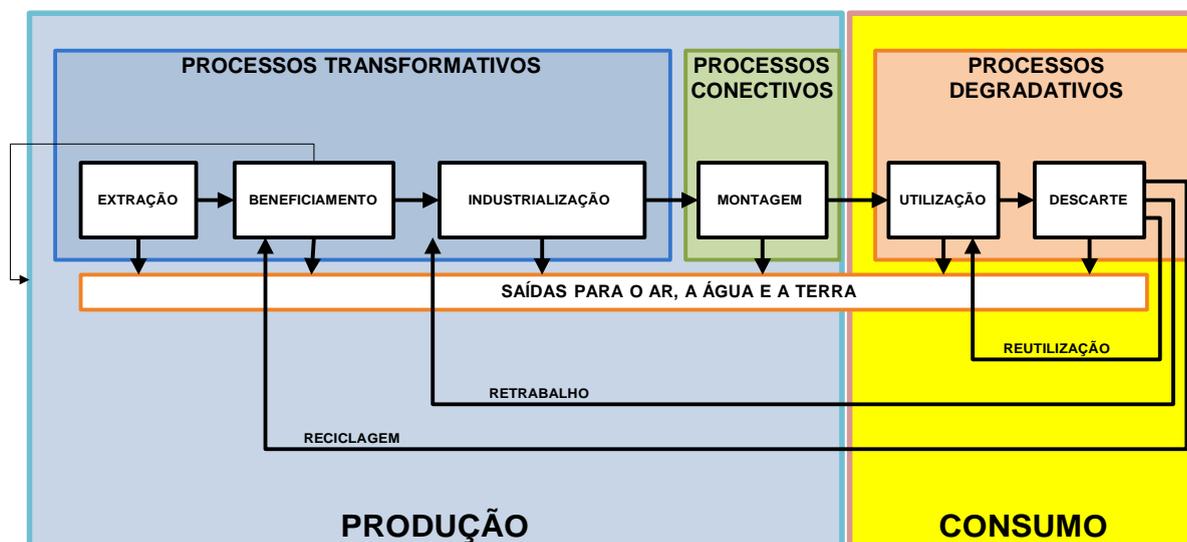


Figura 17: Processo produtivo geral e na construção de edificações.

De acordo com Isatto e Formoso (1998), os fluxos de matéria caracterizam atividades de processamento, consistindo, estas, de alterações de forma e substância, de montagem e desmontagem. Esta afirmativa está parcialmente correta. De fato, como já foi visto na seção 2.3, os corpos são constituídos de substâncias e estrutura interna. Se os processos atuam sobre os corpos, eles devem atuar sobre toda a constituição dos corpos. Portanto, os processos produtivos podem ser alterações de geometria e escala na forma, e de substância e estrutura interna, na constituição. Considerar a estrutura interna como um dos aspectos a serem transformados é essencial quando são considerados processos de beneficiamento, bem como processos bottom-up. Por outro lado, processos conectivos são relacionados à montagem e processos degradativos, à desmontagem. Deste modo, os processos produtivos podem transformar ou conectar os corpos, de diversas maneiras. Esta divisão é apresentada na figura 18.

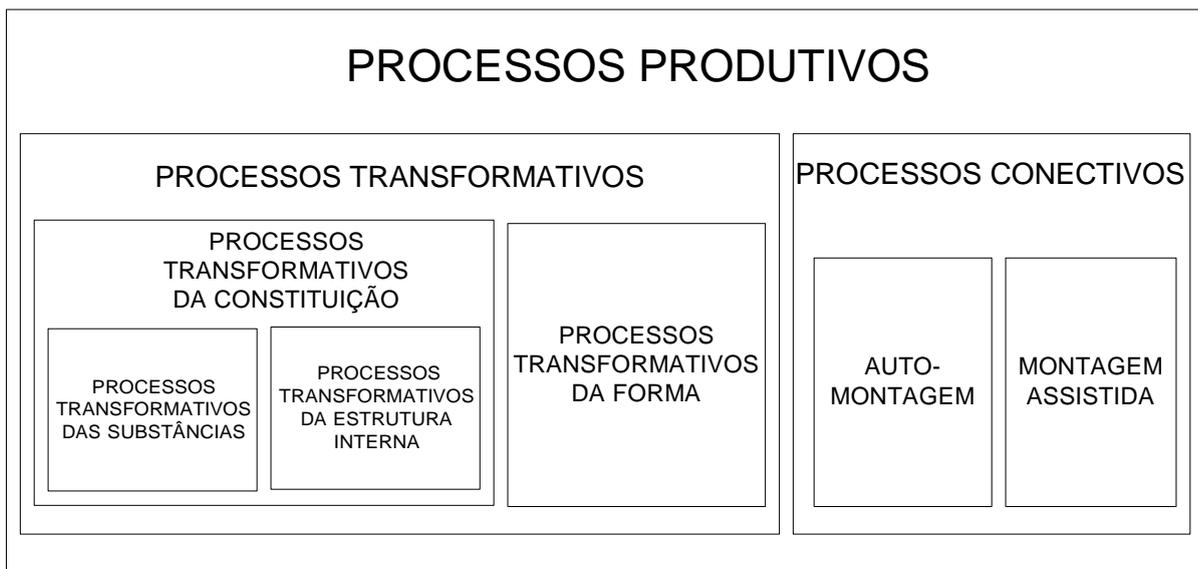


Figura 18: Classificação dos processos produtivos.

Os processos produtivos transformativos podem ser considerados como processos primários, porque são os primeiros processos a ocorrerem na cadeia de processos da construção. Eles podem atuar sobre a forma ou sobre a constituição dos corpos, de acordo com as necessidades funcionais de cada etapa. Os processos produtivos conectivos podem ser considerados como processos secundários, porque atuam sobre a conectividade dos componentes já formados e suas combinações, sem alterar sua forma ou sua constituição de maneira substancial.

2.4.3.1 Processos transformativos ou primários

Como foi dito, as transformações originadas nesses processos podem ocorrer, tanto sobre a constituição dos corpos, como sobre a sua forma, nas etapas que iniciam com a extração das matérias primas dos corpos naturais e vão até a produção de componentes¹⁴. Ou seja, os processos transformativos atuam, essencialmente, nas primeiras etapas do processo construtivo. Isto ocorre porque, sendo a característica básica destes processos a transformação da constituição ou da forma, e sendo os corpos formados na etapa de montagem, apenas a junção de partes, com constituição e forma já definidas, fica evidente que os processos transformativos não podem ser aplicados nestes últimos, porque isto os descaracterizaria como tais e os mesmos passariam a ser considerados como corpos a serem transformados; ou seja, corpos que passariam por processos de industrialização e não de montagem.

¹⁴ A rigor, podem ocorrer processos transformativos também durante os processos conectivos, em combinação com estes, dependendo do tipo de processo conectivo utilizado. Por exemplo, ao colar dois componentes com adesivo epóxi, o adesivo sofre um processo transformativo, porque altera sua constituição, embora o processo principal, naquele momento, seja um processo conectivo. Este assunto será tratado mais abaixo.

É também importante lembrar que os processos transformativos são processos *top-down*. Novamente, esta condição decorre da natureza destes processos. Eles atuam sobre corpos pré-existentes de maneira individual; isto é, sem buscar a combinação de corpos distintos (mesmo os corpos líquidos ou pastosos são predefinidos em sua constituição, embora não em sua forma). E sua atuação dá-se sobre o corpo, como um todo, característica dos processos *top-down*. Por outro lado, estes processos não formam novos corpos com níveis hierárquicos mais altos, a partir de partes menores, característica essencial dos processos *bottom-up*. Evidentemente, a estrutura interna e/ou as substâncias de muitos corpos submetidos a processos *top-down* são modificadas, inclusive com a incorporação de outras substâncias. Mas isso é completamente distinto de dizer que esses corpos estão tendo suas estruturas internas organizadas a partir de níveis hierárquicos mais baixos. A distinção reside na maneira como a matéria é organizada. Se paulatinamente, a partir dos níveis mais baixos, ou simultaneamente.

As transformações sobre a constituição podem ser de natureza química, transformando as substâncias presentes no corpo e podem ser de natureza física, alterando sua estrutura interna, transformando a forma de cristalização, sinterizando partículas, dentre outras, criando diferentes níveis de estruturação da matéria. As transformações sobre a forma do corpo podem ser classificadas dentro de duas categorias gerais: como escultura ou como moldagem. A escultura engloba todos os processos de remoção ou divisão de matéria (furação, corte, lixação e fragmentação). A moldagem inclui todos os processos que mudam a forma do corpo (estampagem, fundição, dobra, moldagem). Esta moldagem ocorre sem o acréscimo ou retirada de matéria. Haveria uma terceira categoria de processos transformativos, que poderiam ser chamados de moldagem cumulativa. Neste processo, um material sem forma sólida (plástico ou fluido), seria moldado de forma cumulativa. Embora tal tipo de processo seja importante em fabricação camada por camada (*layer-by-layer*), caracteristicamente de baixo para cima (*bottom-up*), a moldagem que ocorre na última camada acrescida altera, tanto a forma, quanto (em muitos casos) a constituição. Devido a estas alterações, deve ser considerado um processo transformativo. É classificado, portanto, como um caso de moldagens sucessivas. Este é o caso, por exemplo, dos processos de pintura, onde cada camada aplicada é moldada sobre as camadas anteriores.

2.4.3.1.1 Processos transformativos da constituição

Os processos transformativos de constituição podem atuar nos corpos durante as atividades de extração, beneficiamento e industrialização. Por definição, não podem atuar nas atividades de montagem, pois isto os descaracterizaria como tal. Entretanto, existem duas importantes exceções. A primeira está ligada aos processos conectivos molhados, que se

utilizam de meios auxiliares de conexão, tais como colas (moldagem). Em outros casos, os processos conectivos exigem processos transformativos auxiliares, para adaptar os corpos a uma conexão adequada (efetiva), utilizando escultura. Os processos transformativos da constituição podem ser específicos, das substâncias ou da estrutura interna. Eles são apresentados a seguir.

2.4.3.1.1.1 Processos transformativos das substâncias

Os processos transformativos das substâncias são de dois tipos: aqueles em que as substâncias são modificadas em sua estrutura molecular ou cristalina, havendo, portanto, uma reação química de algum tipo; e aqueles em que são acrescentadas ou retiradas substâncias, alterando assim a constituição química do corpo. Os processos que envolvem reação química podem ser os únicos processos de uma determinada etapa, como, por exemplo, o processo de redução do óxido de ferro, para a produção do aço, ou do óxido de alumínio (bauxita), em alumínio, ou a produção de polímeros, como o PVC. Também podem ser processos auxiliares, que ocorrem em conjunto com outros processos, como, por exemplo, a reação de hidratação do cimento, no processo de moldagem de componentes de concreto. Processos transformativos das substâncias, embora aconteçam a nível molecular, são *top-down*, porque não existe uma preocupação com a organização dos átomos e moléculas individuais, de forma a construir estruturas multinível mais complexas. As reações ocorrem de forma aleatória no interior do corpo que está sendo transformado.

2.4.3.1.1.2 Processos transformativos da estrutura interna

O termo estrutura interna refere-se à organização interna do corpo que está sendo transformado, quer ele seja um corpo natural ou já processado pela atividade humana. Esta organização interna não se sobrepõe aos conceitos de substância ou cristal, mas os complementa. Ela se refere à forma em que a matéria está organizada, nos diversos níveis hierárquicos, a partir da escala nanoscópica, até a escala macroscópica. A organização interna também não se sobrepõe ao conceito de forma, visto que a forma é definida, neste trabalho, como sendo a geometria da superfície externa do corpo. Os processos transformativos deste tipo podem acontecer isoladamente, como é o caso da mudança de estrutura de cristais do aço, de austeníticos, para martensíticos, ou da sinterização de partículas, no processo de queima da cerâmica. Nos dois casos, as substâncias presentes antes da transformação permanecem inalteradas, assim como a forma externa dos corpos. Os processos de transformação de estrutura interna também podem ocorrer combinados com outros tipos de transformação, criando processos híbridos de transformação. Por exemplo, um pedaço de madeira, que é fragmentado e transformado em MDF com a adição de resina, sofre uma transformação de substâncias, porque é adicionada uma nova

substância (a resina), é transformada a estrutura interna da madeira e é alterada a forma, que originalmente era um tronco de árvore e passa a ser uma lâmina de MDF.

2.4.3.1.2 Processos transformativos da forma

Estes processos estão relacionados a tecnologias que podem ser agrupadas, genericamente, como tecnologias de escultura e moldagem. A escultura retira massa do corpo. A furação, a lixação e o corte são processos típicos de escultura. A moldagem altera a forma do corpo, mas não adiciona, nem retira massa. A estampagem e a fundição (a quente, como no caso dos metais e dos plásticos; e a frio, como no caso do concreto) são processos típicos de moldagem.

Quando a moldagem é feita com materiais que são resultado da mistura de outros materiais, como é o caso do concreto, onde ocorre a mistura – ou seja, a adição – de dois ou mais corpos, para formar um terceiro, isto não caracterizaria um processo conectivo. A justificativa para esta classificação reside no próprio conceito de processos conectivos, que exigem a manutenção da forma e da constituição dos componentes. No caso do concreto, embora tenha havido uma mistura, esta mistura não se refere a componentes, mas a materiais que, misturados, têm suas formas individuais dissolvidas, dentro do conceito do novo material – o concreto – e sua constituição alterada. Os processos de escultura e moldagem são analisados em maior profundidade a seguir.

2.4.3.1.2.1 Processos de escultura

A escultura é conceituada, aqui, como o processo produtivo que engloba todas as ações de remoção de material do volume original de um corpo (normalmente sólido, mas que também pode ser plástico). Tal remoção tem por objetivo adaptar a geometria daquele corpo, para que ele possa ser utilizado no processo construtivo de forma eficaz. Esta abordagem traz consigo duas consequências importantes: a perda de material normalmente gera resíduos; e o tempo excessivamente longo (exceto em operações de corte), para obtenção da geometria desejada, quando a nova forma é significativamente diferente da forma original. Por isto, ela se justifica – e, na verdade, é aplicada extensivamente – quando se trata de materiais não industrializados, ou industrializados de forma incompleta; ou seja, quando a geometria resultante não necessita ser precisa. Ela é, portanto, empregada, em um primeiro caso, em rochas e madeiras, de modo geral, que são matérias primas advindas diretamente de corpos naturais. Um segundo emprego da escultura é encontrado em materiais semi-industrializados (nos casos de perfis ou peças de aço, alumínio, plástico). Finalmente, a escultura está presente na adaptação dos componentes, como tijolos, lajotas e azulejos, às dimensões requeridas em obra. A intensidade da utilização da escultura está intimamente

ligada às condições econômicas de cada época e local. Assim, em várias culturas da antiguidade, quando a disponibilidade de materiais restringia-se quase que exclusivamente a materiais não industrializados – essencialmente rocha e madeira, ao mesmo tempo em que havia abundância de mão de obra, a escultura era o processo preferido, por excelência, principalmente na construção dos principais edifícios e obras, que demandavam maior qualidade. Esculpir os blocos de pedra de cantaria, processo predominante até as catedrais góticas, era condizente com tais condições. A madeira foi esculpida, principalmente, em três casos: para funções estruturais, porque apresentava uma excelente relação peso-resistência à tração e compressão; nas esquadrias com partes móveis, onde a sua menor densidade era importante para a mobilidade; e nos pisos, pela baixa condutibilidade térmica.

Nas condições de uso descritas, a conectividade dos componentes e elementos era definida já no processo de escultura, já que, exceto nos raros casos de escultura monolítica, de toda a edificação em um bloco de rocha, este modo construtivo exige um posterior processo de montagem, quando, então, o conjunto obtém a forma e o desempenho esperados. A conectividade dos componentes submetidos à escultura depende de diversos fatores, tanto tecnológicos quanto econômicos e culturais. Em sociedades que dependem pesadamente de mão de obra abundante e barata e não controlam tecnologias de automatização, a conectividade tende a manifestar-se em peça esculpidas artesanalmente. Este é o caso, por exemplo, das pedras de cantaria em edifícios antigos, ou dos encaixes em peças de madeira, em templos chineses. Ainda hoje, em países com mão de obra abundante e barata, carpinteiros são exímios escultores de juntas de madeira. Em países com mão de obra mais cara e em pleno emprego, a utilização de ligações esculpidas fica restrita a móveis e a atividades de hobby, mas raramente é utilizada em escala comercial. Nestas condições econômicas, o alto custo inibe a produção de ligações esculpidas manualmente. Assim, as soluções de ligação normalmente adotam a adição de um elemento ligante. Este é o caso, por exemplo, de peças de madeira fixadas com ferragens diversas, mas sem encaixes. É também o caso de lâminas de pedra para revestimento, onde as ligações com o substrato são obtidas através de componentes metálicos de fixação e juntas de argamassa ou outro material entre as peças. Não se observa encaixe entre as mesmas. Entretanto, quando as ligações podem ser produzidas industrialmente e, preferencialmente, de maneira automatizada, e quando o valor agregado do produto é alto, esculturas são adotadas como forma de produção;

2.4.3.1.2.2 Processos de moldagem

A moldagem é definida como o modo produtivo que engloba todos os processos que dão forma definitiva a um corpo sólido parcialmente conformado ou a um corpo amorfo, sem retirar ou adicionar matéria ao componente que está sendo produzido. O corpo parcialmente conformado é utilizado neste modo produtivo, desde que possa ser moldável. Assim, um metal submetido a um processo de estamparia é moldável. Do mesmo modo, uma barra de aço, ao ser dobrada para a produção da ferragem de uma peça de concreto armado, sofre uma moldagem. O objetivo da moldagem, portanto, é dar forma definitiva a um corpo amorfo (como no caso do concreto) ou alterar a forma de um corpo parcialmente conformado (como é o caso da barra de aço), sem retirar ou adicionar matéria. Duas características deste modo produtivo são relevantes: primeiro, a moldagem nem sempre é um processo gradativo, como a escultura. Isto significa que, em muitos casos, a forma final deve ser previamente definida, em todos os seus detalhes, antes de iniciado o processo; segundo, os processos incluídos neste modo produtivo exigem que o corpo a ser moldado tenha sido previamente preparado, quer seja ele parcialmente conformado, quer seja amorfo. Esta necessidade pode ser observada, mesmo no mais rudimentar e ancestral dos processos de moldagem: os blocos de adobe produzidos artesanalmente. Mesmo neste caso, a argila precisa ser homogeneizada e possuir a plasticidade correta. A moldagem passou a ter um significado maior na construção, com a invenção do concreto. Até aquele momento, as peças moldadas, quer fossem de argila seca ou queimada, apresentavam uma resistência bastante inferior às peças produzidas a partir de blocos de rocha. Além disto, peças grandes de argila queimada eram impraticáveis, devido ao processo de secagem e queima, que, sem a tecnologia adequada, é utilizado apenas para peças de pequeno tamanho, devido ao tempo de secagem e queima, além de problemas com deformação e trincas.

A moldagem é utilizada na produção da maioria dos componentes de construção, em combinação com os outros modos produtivos. Na obra, entretanto, ela se aplica a um número restrito de materiais e processos, visto que, pelas suas características mencionadas acima, a industrialização traz ganhos significativos de qualidade e produtividade a estes processos. Deste modo, é possível identificar apenas algumas situações onde a moldagem é empregada: no concreto armado - durante a preparação da ferragem (quando esta é feita na obra); nas formas de madeira, quando existe deformação de tábuas ou laminados para obter-se uma conformação especial e na moldagem do próprio concreto, nas formas; no reboco - moldado sobre as superfícies a serem revestidas; nas juntas de peças, tais como tijolos, azulejos e pisos e na pintura. Talvez a primeira aplicação da moldagem na construção tenha sido a preparação de blocos de argila, para paredes de adobe. Este primeiro emprego deveu-se, mais às características especiais da argila, um material plástico

(não fluido), que permitia ser moldado sem maiores dificuldades, diretamente pela mão humana. A seguir, os metais e o vidro foram moldados em pequenas peças, operações limitadas pelas tecnologias disponíveis¹⁵. A descoberta das propriedades das pozolanas permitiu aos romanos utilizar o concreto, extensivamente, na moldagem do concreto, que ressurgiu na Europa do século XIX. Este ressurgimento deveu-se, entre outros motivos, ao crescente custo de utilização de pedras naturais como componentes construtivos. Além disto, o fato de que processos de moldagem exigem que o material tenha sido previamente processado, em maior ou menor grau, impulsionou ainda mais este modo produtivo, quando tal processamento passou a ser realizado em escala industrial. As tecnologias desenvolvidas foram gradativamente disseminadas por outros países, sendo neles adaptadas às condições locais de disponibilidade de materiais e tradição construtiva.

A moldagem pode ser utilizada de três formas diversas: através de um processo cumulativo, como no caso da pintura; através de um processo de deformação, como na dobradura de uma barra de aço; ou através de uma fundição, onde o material amorfo tomará sua forma definitiva. No primeiro caso, a conectividade é resolvida através de uma aderência do material moldado à superfície do substrato. A ancoragem pode ser melhorada através do tratamento da superfície do substrato, mas a forma final da conexão, ou junta, será realizada no momento da execução, porque o material que está sendo depositado deve se moldar às irregularidades do substrato. Nos dois últimos casos (deformação e fundição), a conectividade deve ser resolvida antes de iniciado o processo de moldagem, sendo tal solução fisicamente manifesta no negativo do material a ser moldado, ou depois, através de escultura ou da moldagem de um terceiro elemento. O primeiro caso ocorre, por exemplo, no espelho das tomadas de energia elétrica, onde a peça estampada já traz os furos para os parafusos. Quando tal não ocorre, duas soluções são possíveis: uma solução será criada no componente, através de escultura (segundo caso), como no corte de azulejos para a instalação de tomadas; ou a conexão ou junta ocorrerá através da moldagem de um terceiro elemento (terceiro caso), como no caso da conexão entre dois tijolos, com argamassa de assentamento. As soluções são variadas, mas é possível inferir que soluções resolvidas no próprio processo de moldagem sejam mais eficientes, porque são bem resolvidas na fase de projeto, e seu desempenho é avaliado antes da execução. Além disto, o processo industrial de fabricação traz ganhos de controle de qualidade e de custos. De fato, é possível observar

¹⁵ Vale lembrar que a tecnologia para fundir peças maiores de ferro somente foi desenvolvida na Inglaterra, no século XV, porque Henrique VIII queria fundir canhões de ferro para seus navios de guerra. Até então, as únicas fundições de peças maiores utilizavam bronze e cobre, materiais, na época, quase tão caros quanto a prata.

uma tendência de encontrar um número cada vez maior de componentes moldados com soluções de conectividade presentes nos mesmos.

2.4.3.2 Processos conectivos ou secundários

Considere-se dois corpos que foram individualmente produzidos. Caso estes corpos sejam justapostos durante o processo construtivo, entende-se que os mesmos apresentam conectividade entre si, se possuírem a propriedade ou capacidade de interação física e funcional entre eles, sem que esta interação cause alteração substancial em suas características de constituição e de forma, o que poderia descaracterizar um ou os dois corpos conectados. Essas ligações podem ocorrer como uma interação entre superfícies, entre materiais e entre componentes (AZAMBUJA; BONIN, 2010), como será visto mais abaixo. A definição apresentada implica que a conectividade não depende exclusivamente das características de cada um dos corpos, mas também da interação entre eles. Por isso, não é possível dizer que um determinado componente apresenta conectividade, pois é preciso identificar o outro componente, em relação ao qual esta conectividade existe.

Deduz-se, da definição de conectividade, que a montagem somente pode ser utilizada com componentes que estão completamente conformados. Ou seja, a montagem, pela sua própria definição, é consequência dos processos antecedentes. É possível verificar, então, uma diferença importante da montagem, em relação aos outros modos produtivos já discutidos: sua tendência é de manifestar-se nas etapas finais da construção ou da produção de materiais e componentes. Evidentemente, a realidade é mais complexa do que isto e, não raras vezes, os processos de montagem são utilizados simultaneamente com os outros dois. Assim, é possível classificar as montagens em secas e molhadas. Montagem seca é aquela em que os dois componentes estão diretamente ligados entre si, como é o caso das partes que compõem uma dobradiça, ou de um encaixe macho-fêmea, entre tábuas. Montagem úmida envolve a utilização de um componente de ligação entre os dois componentes que estão sendo montados como, por exemplo, uma cola em uma treliça de madeira de telhado. Ambos os tipos apresentam vantagens e desvantagens. A principal vantagem da montagem seca é eliminação de uma terceira substância para fazer a ligação entre as partes, eliminando questões de logística e, geralmente, simplificando o processo de montagem. A grande vantagem da montagem úmida é a possibilidade de ausência de uma característica específica, de forma ou de constituição, no ponto de ligação entre as partes, quer seja entre superfícies, materiais ou componentes. É preciso, também, lembrar que a montagem de elementos pode ocorrer – e de fato ocorre, cada vez com maior frequência – nos processos industriais que antecedem a construção, no que pode ser chamado de pré-

produção. Um exemplo claro disto é a fabricação de portas pré-montadas na fábrica, com suas fechaduras.

Algumas etapas de montagem sempre ocorreram no canteiro, pelas próprias características inerentes àqueles materiais e a seus componentes derivados, como a justaposição de pedras de cantaria ou a construção de estruturas de madeira. Entretanto, em alguns casos, claramente existe uma opção entre a moldagem e a montagem no canteiro. Nestes casos, a transição de um processo de moldagem para um de montagem ocorre quando esta se torna economicamente atrativa, tecnologicamente viável e culturalmente aceitável. Este é o caso, por exemplo, de peças pré-moldadas para estruturas de concreto armado e, mais recentemente, o uso crescente de revestimentos internos de gesso acartonado, em substituição ao reboco. A pré-produção será analisada em maior detalhe, mais adiante, neste estudo.

Quando algum processo utiliza o modo de montagem e as questões de conectividade não foram previamente resolvidas, o mais provável é que outro processo (um processo transformativo) deva ser utilizado para adaptar os componentes, para permitir a conectividade, causando um recuo na sequência natural dos processos. Este é o caso de todos os componentes que necessitam ser esculpidos, como é o caso das placas de cerâmica de revestimento, ou re-esculpidos, como, por exemplo, o vidro mal dimensionado, a ser colocado em uma janela. Em muitos casos, tal adaptação é aceita com naturalidade, como uma inevitabilidade. Entretanto, é possível evitar estas situações, o que vem sendo estimulado pelos conceitos de construção enxuta (*lean construction*) (HEINECK, L. F. M. *et al*, 2009). Quando a conectividade é previamente resolvida, mesmo em uma solução tecnologicamente pobre, a tendência é de um menor custo, com menor geração de resíduos, maior produtividade da mão de obra e menor consumo de energia. Tem-se, assim, que o modo de montagem é aquele que usa mais extensivamente as soluções de conectividade, produzidas nos modos de escultura e de moldagem, como no caso de peças de uma treliça metálica, onde os componentes são cortados e furados (no caso de escultura) e como no caso das peças pré-fabricadas de concreto (no caso de moldagem). No modo de montagem, com grande intensidade, todas as questões relativas à conectividade do processo construtivo estão condensadas e manifestas. Assim, os processos decisórios, o grau de racionalização e as características das atividades envolvidas têm um papel fundamental no sucesso da aplicação deste modo, tanto do ponto de vista econômico, quanto de desempenho.

Os processos de montagem podem ser divididos em processos de automontagem (*self-assembly*) e de montagem auxiliada. Caracteristicamente, para que ocorra a automontagem,

os componentes do sistema devem possuir energia livre (energia potencial, normalmente química ou mecânica) armazenada, disponível para a realização de trabalho, mesmo que esta energia lhes seja fornecida momentos antes da realização do trabalho de automontagem. A energia será liberada no momento da automontagem, quando o sistema passará a um nível de energia mais baixo. Entretanto, este novo nível não deve ser tão mais baixo que o anterior, que o processo seja irreversível (WHITESIDES; BONCHEVA, 2002). Assim, o diferencial de energia a ser doado deve ser cuidadosamente dosado. Já, a montagem auxiliada não necessita acumular energia para a realização do trabalho de montagem, já que a energia será doada por um agente externo, podendo este agente externo ser um equipamento ou um ser humano. A automontagem ocorre, normalmente, a nível molecular ou, mais genericamente, a nível nanoscópico, porque, nestes níveis, a força gravitacional é muito pequena em relação às forças atômicas (forças elétricas de diversos tipos, desde forças de atração iônica, forças covalentes, até forças de Van der Waals). Neste nível, estas forças podem organizar a matéria a nível atômico com grande facilidade e são fundamentais, em diversos processos utilizados na construção civil. O caso mais óbvio na construção é o da formação de cristais no cimento, onde estruturas cristalinas são formadas, através de automontagem dos íons dissolvidos em meio aquoso. Entretanto, este caso específico de automontagem é apenas parcial, porque esta organização a nível nanoscópico não se estende a outras escalas, criando a necessidade de intervenção de um agente externo, para a montagem em outros níveis. Outro caso de automontagem é a reação de polimerização de espumas de poliuretano. Neste caso, a automontagem ocorre, não somente a nível molecular, com a reação dos monômeros, mas também na escala meso, com a formação de células gasosas dentro do material. No caso do concreto, além do cimento, ocorre também a automontagem no fenômeno de empacotamento. Este fenômeno ocorre pela obtenção da compacidade máxima de uma mistura de diversos agregados, materiais ligantes, água e aditivos, de acordo com um protocolo de produção do concreto (SILVA, 2004). A organização dos diferentes materiais é uma automontagem, embora neste caso a energia não esteja contida nos materiais, mas é doada a eles através da energia mecânica de vibração ou compressão. No caso específico de concreto autoadensável, a energia doada ao corpo é a energia mecânica potencial, que o eleva a uma altura maior que aquela na qual será moldado. A automontagem pode ocorrer, também, em uma escala macro, como é o caso da lingueta das fechaduras. Esta lingueta, quando encaixa no recesso do marco, forma um conjunto automontado da folha da porta com o marco. Todos estes exemplos, no entanto, não são a regra nas tecnologias construtivas, e a automontagem não é sistematicamente utilizada no paradigma atual da construção, embora não exista um impedimento teórico para isso (WHITESIDES; BONCHEVA, 2002).

Os processos de montagem auxiliada referem-se a todos os processos onde as partes a serem montadas não contam com mecanismos para armazenar energia, seja energia química, mecânica, térmica ou elétrica, para utilizá-la na montagem. Desta forma, a energia para o processo de montagem deve ser obtida através do trabalho realizado por um terceiro interveniente, que pode ser um equipamento ou um ser humano. É também característico da montagem auxiliada que, embora em muitos casos os componentes montados recebam energia mecânica e a armazenem na forma de energia potencial, esta energia não é liberada durante o processo de montagem.

Em muitos casos, a conexão ocorre diretamente entre as partes; em outros, ela é mediada por um componente específico, cuja principal função é interagir com as duas partes que estão sendo conectadas e que pode ser chamado de componente conectivo. Para distinguir quando um componente é conectivo, é possível adotar dois critérios distintos: a) dimensões: os componentes conectivos apresentam, necessariamente, ao menos uma dimensão bastante reduzida, em relação às partes que estão sendo ligadas (p. ex. uma película de cola, entre duas peças de madeira); b) função: claramente, a função principal do componente conectivo é ligar duas partes (p. ex. os pregos, que ligam duas peças de madeira). Um componente conectivo deve atender estes dois critérios simultaneamente. Por exemplo, uma rótula, em uma estrutura metálica, que une uma viga a um pilar tem, inequivocamente, a função de ligação e seu comprimento (dimensão) é significativamente menor que aqueles das peças que está ligando. Entretanto, muitas vezes, o componente conectivo é utilizado para desempenhar outras funções, que dificilmente poderiam ser adequadamente desempenhadas pelos componentes comuns do elemento ou subsistema. Dentre estas funções, três são particularmente relevantes: permitir a desconexão entre os componentes; fornecer graus de liberdade ao sistema e absorver ou dissipar energia, quer seja mecânica, térmica, sonora, ou outra. No primeiro caso, podem ser citadas as uniões entre tubulações, os parafusos e as gaxetas de fixação. No segundo caso, as rótulas das estruturas, as placas de neoprene de apoios e as mangueiras flexíveis das tubulações de água. No terceiro caso, as quebras de pontes térmicas das esquadrias, as juntas estruturais dissipadoras de energia (especificamente de eventos sísmicos) e as juntas de dilatação do concreto.

As conexões podem ocorrer entre componentes de um mesmo elemento ou entre elementos distintos. Distinguir estes dois tipos de ligação traz a grande vantagem de permitir um foco específico nas ligações entre elementos, onde reside a maioria dos problemas deste tipo, na edificação. De fato, é possível afirmar que, na maioria dos casos, os componentes de um mesmo elemento construtivo já apresentam uma solução desenvolvida para os problemas

de ligação, quer seja porque são fabricados pela mesma empresa, quer seja por imposição do mercado, que exige uma coordenação entre tais componentes, para viabilizar sua utilização. No primeiro caso, podem ser citadas, entre outras, as soluções para as conexões de tubulações hidrossanitárias de PVC e os encaixes macho-fêmea de tábuas de forro, assoalho ou paredes. No segundo caso, as conexões entre metais e louças e entre componentes do subsistema elétrico. Entretanto, são ainda encontrados casos de adaptação local, como é o caso da conexão entre portas e ferragens, que poderia sofrer um processo de padronização. Estes casos, porém, são mais raros e tendem a ser resolvidos dentro da própria dinâmica do mercado. Cabe, entretanto, ressaltar o caso da alvenaria, onde a ligação entre os componentes (tijolos ou blocos) apresenta um grande número de problemas de ligação (fissuras), bem como a ligação entre os tijolos e o revestimento (argamassa ou outro) também apresenta problemas sérios (descolamento, por exemplo).

Por outro lado, as ligações entre elementos construtivos sofrem muito mais a falta de uma coordenação entre fabricantes e entre setores produtivos. A consequência desta falta de coordenação e eventual regulamentação é a necessidade de adaptações, executadas, comumente, no local da obra, com desperdício de material e tempo e custo com mão de obra, durante o processo de construção, além de mais desperdício nos processos de manutenção e de desmontagem final.

As conexões podem ser classificadas de duas formas distintas. Com relação à natureza da conexão, ela pode ocorrer através de uma interação entre superfícies, entre materiais ou entre componentes. Com relação às dimensões, elas podem ser uni, bi e tridimensionais.

2.4.3.2.1 Com relação à natureza das conexões

Quando os corpos atingem sua condição final de constituição e forma, isto permite identificá-los e diferenciá-los, pois os mesmos deixam a condição instável, causada pelos processos transformativos. A interação entre estes corpos será, sempre, a interação através de suas superfícies, que poderá ser química ou física. Interações que não dependem exclusivamente da forma dos componentes, nem das características específicas dos materiais que os formam, podem ser propriamente chamadas de interações entre superfícies. Interações que dependem das características dos materiais são chamadas de ligações entre materiais. Finalmente, interações que dependem da forma (especificamente da geometria) dos componentes são, obviamente, sempre interações físicas e podem ser chamadas de interações entre componentes.

2.4.3.2.1.1 Interação entre superfícies

A interação entre superfícies pode ocorrer com e sem a intermediação de um componente específico de conexão. O caso mais simples de conexão é a interação direta entre as superfícies dos componentes, onde existe, simplesmente, uma justaposição dos mesmos. Normalmente, a interação ocorre somente através das forças de atrito e de ação e reação entre os componentes, e a posição relativa entre eles é mantida exclusivamente por ação da gravidade. Neste caso, não ocorre uma ligação efetiva entre eles e, portanto, a conexão não tem a capacidade de resistir a esforços de tração, apenas de compressão e cisalhamento. É importante ressaltar que a limitação ao efeito da gravidade decorre do fato de que as forças que normalmente atuam em escala nanométrica e que são, de fato, muito mais poderosas que a gravidade, necessitam de um efetivo contato entre as superfícies. Isto é obtido através de geometrias específicas, em escala nanoscópica ou microscópica, para que possam ser efetivas na escala macroscópica. Quando a atuação de tais forças ocorre, isto caracteriza uma conexão química entre superfícies. Portanto, a conexão química entre superfícies de componentes é assim chamada porque ela está baseada em forças atômicas e moleculares, distintas da gravidade, as quais criam ligações novas entre átomos e moléculas, sem alterar a constituição dos materiais envolvidos. É o caso das forças de Van der Waals, que são utilizados por alguns tipos de lagartixas (gecko), para aderir-se a, praticamente, qualquer substrato (AUTUMN, 2002), conceito também utilizado em diversos materiais adesivos.

Para que exista uma interação mais efetiva entre as superfícies, que resista melhor a esforços laterais ou de tração, algum sistema adicional de ligação pode ser incluído. Este elemento de ligação pode ser a geometria das partes, proporcionando um encaixe entre elas (como no caso de telhas cerâmicas sobre madeira), ou um elemento transversal de fixação (como um prego, parafuso, pino ou cavilha tipo borboleta). Estes casos serão estudados na seção dedicada à relação entre componentes. No caso de elementos sobrepostos, em que um dos elementos é moldado no local, a ligação entre superfícies ocorre por ancoragem do elemento moldado nas irregularidades e porosidades do elemento pré-fabricado, como é o caso da argamassa, no tijolo cerâmico. Quando os dois componentes são ligados fisicamente por um terceiro elemento, com função de filler e/ou adesivo, esta ligação torna-se mais complexa e este terceiro elemento deve atender a um vasto e variável leque de funções, como será visto mais adiante neste capítulo. Este terceiro elemento pode ser constituído do mesmo material que os componentes adjacentes, ou de material diverso. Poderá ser colocado após os dois componentes já terem sido posicionados, ou poderá ser previamente incorporado a um deles, como no caso de adesivos. Em todos estes casos, a ligação com elemento intermediário poderá ser reforçada estruturalmente com elementos

auxiliares de fixação, como as buchas de fixação de placas de granito, em fachadas, ou pregos, em conexões coladas de madeira.

2.4.3.2.1.2 Interação entre materiais

A conexão baseada na interação entre materiais caracteriza-se por alterar a constituição dos materiais, na região da conexão. Esta alteração pode ser devida a uma reação química ou a uma mistura entre materiais. A conexão baseada em uma reação química é utilizada de forma bem mais restrita do que a ligação física e refere-se, de forma geral, a soldas metálicas de aço-carbono, aço inox, alumínio e cobre e suas ligas. As conexões baseadas em misturas de materiais incluem as soldas plásticas, como em lâminas plásticas, e a dissolução do material da superfície, como na solda de tubulações de PVC. É interessante observar que, via de regra, ligações químicas apresentam excelente desempenho. Isto se deve, essencialmente, à eliminação da solução de continuidade que estas ligações geralmente proporcionam, tornando o conjunto virtualmente monolítico. Por exemplo, em uma bem executada solda elétrica de dois componentes de aço carbono, as características mecânicas do material na solda são praticamente idênticas às dos componentes. Caberia, então, perguntar por que este tipo de ligação não é usado mais extensivamente. A resposta envolve vários aspectos. Em primeiro lugar, a preocupação com a durabilidade na construção estimula a busca de materiais cuja constituição os torna quimicamente inertes e, portanto, de baixa reatividade. Dentre todos os materiais utilizados, a grande prevalência é a de óxidos e sais minerais, inertes e com custo inferior ao de outros materiais. A estratégia normalmente adotada é de manter os componentes quimicamente inertes e tornar reativos somente os materiais utilizados nas conexões, visto que tornar os materiais reativos envolve grande quantidade de energia, normalmente em forma de calor ou energia elétrica. Alguns destes processos são econômica e tecnicamente viáveis somente em grande escala, como é o caso do cimento e da cal (óxidos) e do gesso (sal). Estes materiais continuam baratos, na sua forma reativa (anidros), exatamente devido à escala em que são processados. Em segundo lugar, o custo, tanto de ajuste e preparação, como da própria operação de solda, encarece os custos da ligação. Além disto, o custo do próprio equipamento de solda e a sua movimentação podem inviabilizar ou inibir o uso mais extensivo destas soluções, como no caso de solda ponto, muito utilizada na indústria metal mecânica.

2.4.3.2.1.3 Interação entre componentes construtivos

Muitas conexões necessitam de uma relação geométrica definida entre os componentes envolvidos, quer seja por uma necessidade estrutural, quer seja por outra demanda de desempenho, como estanqueidade, por exemplo. Esta relação, que não pode ser confundida com uma interação entre superfícies, ou uma ligação entre materiais, baseia-

se, essencialmente, na conformação geométrica dos componentes, e o que se busca é reduzir os graus de liberdade dos componentes envolvidos. Através da conformação geométrica, obtém-se o inter-travamento destes componentes, com ou sem o auxílio de uma ou mais peças auxiliares. Um exemplo típico do primeiro caso (com peça auxiliar) é a ligação entre peças de madeira, utilizando-se um pino tipo borboleta (CALLENDER, 1974), enquanto um exemplo do segundo tipo seria um encaixe tipo endentado, também entre peças de madeira. É interessante lembrar que uma solução universal de intertravamento é a rosca, utilizada, tanto em peças auxiliares de fixação (parafusos e buchas), como em tubulações para diversos fins, como peça de conexão (luva rosqueada, por exemplo) ou como parte integrante das próprias peças, como no caso das lâmpadas.

2.4.3.2.1.4 Casos combinados

As três condições de interação entre componentes, apresentadas acima, são casos simples, onde apenas uma das condições fundamentais das juntas foi destacada. Evidentemente, existem inúmeras situações em que a solução envolve uma combinação de duas ou, até, das três condições discutidas.

2.4.3.2.2 Com relação ao número de dimensões das conexões

A espacialidade é ontológica à conectividade. Entretanto, tem valor fazer uma distinção entre ligações uni, bi e tridimensionais. Ligações unidimensionais são definidas como tendo uma dimensão prevalente, ao menos na ordem de 10:1, em relação às outras. Tais ligações são características de ligações entre arestas, que podem ser: a) interação entre superfícies, onde existe somente uma justaposição de bordas, como no caso de lâminas de vidro, em grandes panos de fachadas; b) interação entre materiais, visando eliminar ou reduzir a solução de continuidade nas características dos componentes. Este tipo de ligação é caracterizado pela integração física entre os componentes, quer através da utilização de um terceiro material de ligação, quer através de uma fusão localizada de um dos dois componentes, junto à borda. No caso de um terceiro componente, o rejunte de placas cerâmicas, a ligação de vidros com silicone, e a solda de topo com eletrodo são exemplos. Na ausência de um terceiro componente, a solda MIG, as soldas de chapas plásticas e de lençóis betuminosos são exemplos; c) interação entre componentes, tanto metálicas, quanto plásticas, para montagem de componentes, quando, ao menos um destes, tem uma dimensão prevalente, como nas esquadrias. Estas diferentes situações têm distintas demandas de desempenho. Com referência a um desempenho estrutural, exceto na solda, ligações unidimensionais são as mais débeis, necessitando, muitas vezes, componentes auxiliares de ligação. Com relação a outros desempenhos, este tipo de ligação visa,

essencialmente, mitigar (e, se possível, eliminar) a solução de continuidade entre peças adjacentes.

Ligações bidimensionais, como o nome diz, ocorrem em um plano. Sua função primordial é ligar componentes sobrepostos. Neste caso, apenas em raras ocasiões importa minimizar a solução de continuidade *per se*. As demandas são estruturais e funcionais e, na maioria dos casos, podem ser atendidas de maneira mais satisfatória do que no caso das ligações unidimensionais. Finalmente, ligações tridimensionais são as mais elaboradas, mais caras e as de maior eficiência. Elas permitem uma interação geométrica entre as partes. Entretanto, tal interação raramente é padronizada, somente ocorrendo nos setores que apresentam maior organização, como é o caso dos materiais hidráulicos e elétricos, onde as ligações, tanto rosqueadas, quanto encaixadas, obedecem a uma normalização.

2.4.3.2.3 Sinergia e conectividade

O conceito de conectividade diz respeito ao processo de ligação entre duas partes adjacentes. Este processo traz consigo a necessidade de discutir-se, também, o resultado obtido com este processo de ligação. Este resultado, que é o desempenho do conjunto, pode ser chamado de desempenho sinérgico. A ideia de sinergia emerge da necessidade de entendimento do conjunto de duas formas distintas e complementares: como somatório do desempenho das partes (por exemplo, o coeficiente médio de condutividade térmica de uma parede de alvenaria, com uma janela); e como o resultado da interação entre as partes, considerando-se os efeitos de uma sobre a outra (por exemplo, o efeito do peso de um componente¹⁶ sobre a estrutura do edifício). É importante ressaltar que, embora a conexão possa estar bem resolvida, o conjunto por ela produzido pode não estar. Por exemplo, imagine-se uma coluna e uma cobertura metálicas. A ligação entre elas, através de um elemento de fixação, pode responder adequadamente a todos os requisitos de desempenho, mas se a cobertura apresentar peso excessivo, a coluna poderá entrar em colapso.

Estas duas formas complementares indicam que a conectividade (entendida como propriedade ou capacidade de ligação entre partes da edificação) conduz a um conjunto, cujo comportamento pode ser mensurado e traduzido em desempenho. Este desempenho vai depender, não somente das características das partes consideradas isoladamente, mas da sua interação. O resultado de todas as interações, das duas formas de atuação, muitas vezes traz ao conjunto propriedades diversas daquelas dos elementos considerados

¹⁶ Neste capítulo, o termo componente tem o mesmo significado que o termo parte ou corpo. No capítulo 3, o termo componente será definido dentro do paradigma atual e ganhará um significado específico.

individualmente. Por exemplo, considerem-se as barras de uma treliça espacial, com ligações rotuladas entre si. Consideradas somente as barras, pode-se aferir sua resistência à compressão, tração e flexão, dentre outras. O mesmo se pode dizer das conexões. Entretanto, colocados no conjunto, estes componentes terão comportamentos completamente diversos, dependendo da estabilidade do sistema estrutural que eles formam: um sistema hipostático entrará em colapso, enquanto um sistema iso, ou hiperestático, permanecerá íntegro. Quando o comportamento de dois ou mais componentes é resultado do efeito de uns sobre os outros, ele é chamado de efeito mútuo. Quando ele é o resultado da soma dos efeitos de vários componentes sobre um terceiro, são chamadas de efeito conjunto.

2.4.3.2.3.1 Efeito mútuo

O efeito mútuo deve ser analisado sob dois aspectos complementares. O primeiro se refere ao grau de coordenação e padronização que existe entre os diversos componentes de cada conjunto; e o segundo, refere-se ao desempenho dos diversos componentes, separadamente e formando o conjunto. Com relação ao primeiro aspecto, é fundamental analisar o processo decisório da constituição e forma dos corpos. As partes da edificação são fabricadas por um grande número de indústrias. Algumas destas partes têm funções que necessitam da intervenção de engenheiros responsáveis pela edificação, para calcular sua constituição e forma ótimas, enquanto outras são, parcial ou totalmente, dimensionadas na indústria. No primeiro caso, encontram-se, por exemplo, as estruturas de concreto armado concretadas *in situ*, enquanto tubulações hidrossanitárias já tem sua forma parcialmente definida e janelas são completamente definidas na indústria.

Quando um componente é completamente definido na indústria, evidentemente não existe possibilidade de alterar suas características ou o efeito que ele exercerá sobre outros componentes da edificação. Este é o caso, por exemplo, dos elevadores, cujos fabricantes exigem adaptação dos outros subsistemas que interagem com ele. Surgem, então, duas possibilidades. Na primeira, todos os componentes são industrializados e existe uma prévia padronização dimensional e coordenação funcional entre eles, não havendo necessidade de adaptação. Na segunda, não existem padronização, nem coordenação entre eles. Neste caso, obrigatoriamente alguns deles não poderão ser completamente industrializados, cabendo a esses a tarefa de adaptação às características dos componentes industrializados. Outra forma de adaptação ocorre quando os componentes são industrializados e suas dimensões são parcialmente definidas, como é o caso das tubulações do subsistema hidrossanitário, onde duas dimensões de sua forma são pré-definidas e a terceira (comprimento) é definida na obra. Neste caso, a adaptação ocorre

após a seleção dentro de um catálogo de possibilidades. Em todos estes casos, a conectividade se expressa na montagem, mas é definida na escultura e na moldagem.

2.4.3.2.3.2 Efeito conjunto

O efeito conjunto pode ser caracterizado, como no caso citado, das barras de uma treliça espacial, como aquele que somente pode ser obtido quando os diversos componentes de um corpo interagem e atuam de forma conjunta, para produzir um efeito desejado sobre si mesmos ou sobre outros elementos ou subsistemas. É importante diferenciá-lo do efeito mútuo, porque o efeito conjunto ocorre somente através da atuação conjunta dos diversos componentes ligados, jamais através da atuação individual de um deles.

Muitos efeitos conjuntos são desejados e, na verdade, a funcionalidade dos componentes só é obtida através deles. É o caso, por exemplo, do conjunto de componentes que formam uma porta. As dobradiças, a maçaneta e a folha da porta somente adquirem funcionalidade quando ligadas em um conjunto funcional. Não é possível imaginar qualquer destes componentes agindo de forma isolada. Outros componentes podem atuar de forma independente, embora seu efeito conjunto também seja importante. É caso, por exemplo, de diversas janelas em uma parede. O conjunto de janelas permitirá o nível de iluminação e ventilação desejados, embora cada janela possa atuar individualmente. Em alguns casos, as funções individuais e conjuntas podem estar sobrepostas, sendo impossível definir a relevância de uma e outra. Por exemplo, em um terraço são encontrados três componentes importantes: estrutura, isolamento térmico e impermeabilização. Estes componentes atuam individualmente; entretanto, também interagem, pois a impermeabilização impede que o isolamento térmico absorva água da chuva, perdendo sua capacidade isolante, enquanto o isolante térmico impede que haja condensação abaixo da impermeabilização, danificando a estrutura do telhado.

2.4.3.2.3.3 Propriedades emergentes

A interação entre os diversos componentes, através de suas ligações, permite que surjam propriedades chamadas emergentes, ou seja, propriedades que somente ocorrem através da atuação conjunta daqueles componentes. No exemplo da treliça espacial, as barras individuais e as ligações rotuladas individuais não possuíam a propriedade de formação de uma estrutura rígida, no plano ou no espaço. Entretanto, ao conectar três barras formando um triângulo, e seis barras, formando um tetraedro, estas propriedades emergem e são utilizadas na construção da treliça espacial. As propriedades emergentes são um aspecto fundamental na organização dos corpos, quando da definição de sua hierarquia interna. Os

níveis hierárquicos desta estrutura são determinados, em boa parte, pela obtenção de propriedades emergentes, quando da combinação dos componentes.

2.4.3.3 Processos híbridos

Embora a lógica dos processos indique que a montagem ocorra normalmente após a transformação, como já foi dito, existem situações de produção de componentes, em que algumas partes são montadas antes de outras serem moldadas, ou onde ocorre, simultaneamente, montagem, moldagem e, até mesmo, escultura. Evidentemente, muitos processos são uma combinação de duas ou, mesmo, das três formas de atuação. São chamados de processos híbridos. Entretanto, mesmo nestes casos é possível visualizar a forma de atuação predominante. Por exemplo, a fabricação de uma tesoura de telhado envolve escultura (os entalhes das peças de madeira), moldagem (a conformação da cola, entre as peças, e a conformação da madeira, na inserção dos pregos) e montagem (a junção das diversas peças que compõem a tesoura). Neste caso específico, fica claro que a principal forma de atuação é a montagem. Os outros processos são processos auxiliares.

3 O PARADIGMA ATUAL

3.1 O PARADIGMA COMO DEFINIDOR DA REALIDADE

Um paradigma é, essencialmente, uma estrutura mental de referência para a compreensão da realidade e para a forma de atuar sobre ela, que não é destacada dessa realidade, passando, muitas vezes, a significar a própria realidade. O conceito de paradigma foi popularizado por Kuhn, especialmente em seu livro “A Estrutura das Revoluções Científicas” (KUHN, 1970). No trabalho original de Kuhn, o termo paradigma significava um modelo de forma de pensar em um campo da ciência, ou seja, uma estrutura de pensamento que se aplica a todos os fatos investigados por uma determinada ciência. Mas, de acordo com Dooley (2000), embora o trabalho de Kuhn estivesse focado em paradigmas ligados à pesquisa científica, o conceito pode ser estendido a outras áreas, como uma atividade que é definida por uma comunidade que a pratica. Nesta tese, o conceito original de Kuhn teve o seu uso ampliado, em acordo com a reinterpretação de Dooley, para expressar o modo de pensar de uma comunidade deste tipo: a indústria da construção. Neste texto, o conceito de paradigma aproxima-se do que Fleck (1979) chamou de *‘thought collective’*, que pode ser traduzido como uma comunidade pensante ou uma coletividade em pensamento. E traz ainda características do conceito marxista de ideologia, vista como o pensamento dominante, que é de tal forma hegemônico que, mesmo sendo uma forma específica de compreender a realidade, passa a ser percebido como fazendo parte da própria realidade, uma lei eterna (MARX, 1845). Essencialmente, o paradigma pode ser pensado como uma estrutura intelectual de suporte, sobre a qual os fatos específicos da realidade se apoiam. Mas, para isto, estes fatos precisam ser transformados, ter o seu significado e seu valor adaptados, para poderem se ajustar à estrutura, que passa a não ser percebida separadamente. A teoria institucional refere-se aos paradigmas específicos de determinadas comunidades como disciplinas, as quais têm poder, através do controle de sistemas de crenças, compartilhados pelos integrantes daquelas comunidades. “Elas exercitam seu controle ao definir a realidade – criando estruturas ontológicas, propondo diferenciações, criando tipificações e fabricando princípios ou regras para a ação” (SCOTT; BACKMAN, 1990, p. 290). Além disto, “as disciplinas informam às pessoas sobre quais problemas

devem ser enfocados, como eles devem ser enfocados e como os resultados devem parecer. Deste modo, elas definem, tanto uma estrutura mental (cognitiva), quanto uma estrutura de ação (normativa)” (DOOLEY, 2000, p. 289).

Considerando o alcance dos paradigmas, tanto do ponto de vista da compreensão da realidade, como da atuação sobre ela, é razoável afirmar que paradigmas são definidores da realidade de disciplinas específicas, onde comunidades em ação (comunidades de praticantes) desenvolvem suas atividades. No caso específico da indústria da construção, esta comunidade envolve, desde as indústrias de extração de matérias primas, até engenheiros e arquitetos da indústria da edificação. Além disso, a academia compartilha do mesmo paradigma, o reproduz e o dissemina. Do mesmo modo, as instituições públicas absorvem o paradigma e definem suas ações e normas por ele, reforçando-o e perpetuando-o institucionalmente. Por outro lado, o paradigma normalmente não é percebido em sua inteireza por todos os membros da comunidade de praticantes de forma continuada. Ao contrário, são fragmentos do paradigma que despontam e servem de referência para as ações. Assim, tomando um exemplo pelo absurdo, não se conceberia, no atual paradigma da construção, uma casa que fosse construída molécula por molécula, ou que utilizasse açúcar na constituição de suas paredes. Entretanto, em outro paradigma, estas opções seriam perfeitamente viáveis.

3.2 IMPORTÂNCIA E FUNÇÃO DOS CONCEITOS

A análise do significado de uma área do conhecimento deveria ser iniciada pela clara definição dos conceitos utilizados para descrever a realidade concernente àquela área, pois é através desses conceitos que a sua compreensão e a atuação dos agentes sobre ela é operacionalizada.

Assim, para que a área da edificação seja compreendida, é necessário, inicialmente, elucidar os conceitos mais importantes que são comumente utilizados neste campo de atividade. De acordo com Botti e Rego (2008), “um conceito é a representação mental de um objeto, instrumento fundamental do pensamento, em sua tarefa de abstrair e generalizar impressões sensoriais, identificar, descrever e classificar os diferentes elementos e aspectos da realidade”. Claramente, os conceitos servem a um pensamento indutivo, em um primeiro momento, mas também a um pensamento dedutivo, em um segundo momento, de classificação dos fatos específicos da realidade. Os mesmos autores seguem, afirmando que um conceito “é uma construção lógica para simbolizar os fenômenos, criada a partir de impressões, percepções ou experiências complexas, e que só tem sentido dentro de um

quadro de referências estabelecido (um sistema teórico, uma teoria, um paradigma). Os conceitos, portanto, não têm significado definitivo, mas são construídos por suas relações com os fatos” (BOTTI; REGO, 2008). Conceitos nascem, portanto, dentro de uma estrutura mais ampla, um paradigma. No caso presente, de análise do paradigma atual da indústria da construção, a formulação precisa dos conceitos envolvidos é o primeiro passo para que seja revelada a verdadeira estrutura desse paradigma. Serve, também, para que a compreensão de suas características possa revelar as limitações intrínsecas das soluções geradas a partir dele. Esta formulação de conceitos deve ser feita a partir da sua utilização prática no universo da construção civil e não somente a partir de conceitos teóricos, que se baseiam em uma percepção incompleta ou idealizada da realidade. Assim, conceitos como material (ou material de construção), ao invés de serem formulados teoricamente, serão moldados a partir de sua utilização nos diversos momentos do processo produtivo da edificação.

Os mesmos autores indicam que “uma análise conceitual tem o papel de apontar as confusões e sobreposições de uso dos termos, bem como sugestões para tentar diminuir as dificuldades de comunicação. Deve ser clara e exige raciocínio preciso sobre o fenômeno e suas inter-relações” (BOTTI; REGO, 2008). De fato, tal análise é necessária, porque vários conceitos fundamentais do paradigma atual da construção permanecem sem uma definição precisa. Além disto, um olhar mais detalhado revela sobreposições nos significados dos diversos conceitos comumente utilizados, dificultando seu uso preciso em uma análise do paradigma. Conceitos como componente e elemento (produtos intermediários da construção), ou entre industrialização e pré-fabricação (do processo de produção), por exemplo, são frequentemente sobrepostos, mesmo em normas, dificultando sobremaneira a análise deste campo de estudo.

3.3 CONCEITOS BÁSICOS

Para o estudo do paradigma atual da construção, foram analisados conceitos básicos, que estruturam o edifício conceitual do paradigma. Estes conceitos básicos estão agrupados em três grandes grupos. Os dois primeiros grupos, relativos ao produto edificação e ao processo construtivo, já estão consagrados na literatura, tanto de normas, quanto de textos que analisam a construção de edificações. Também já foram, de maneira genérica, objeto de análise no capítulo anterior. O terceiro grupo de conceitos refere-se às características básicas do paradigma. Embora existam referências sobre estas características na literatura, como será visto mais adiante, a análise deste terceiro tipo de conceito é mais rarefeita.

No processo de definição dos conceitos consagrados pelo paradigma atual, será apresentada a correlação destes, com os conceitos gerais apresentados no capítulo anterior, mostrando que, tanto os produtos, quanto os processos definidos neste paradigma são casos específicos daqueles conceitos gerais.

3.4 O PRODUTO EDIFICAÇÃO

O produto edificação é o resultado final de um grande número de etapas, nas quais são produzidos diversos produtos intermediários característicos¹⁷. Uma taxonomia destes produtos intermediários é fundamental para a compreensão do resultado final, que é a edificação construída segundo o paradigma atual, bem como do próprio paradigma. Entretanto, não há uma sistematização universalmente aceita de conceitos desses produtos intermediários, ensejando um esforço de criação de uma taxonomia destes conceitos. Esta taxonomia tem por objetivo definir uma nomenclatura com conceitos que sejam coerentes e consistentes. Para tanto, três premissas deverão ser atendidas: os conceitos deverão ser mutuamente excludentes no objeto de sua descrição; o conjunto de conceitos deverá abranger todo o espectro da cadeia produtiva da construção de edificações, desde as matérias primas até o produto final, ou seja, deverão ser exaustivos em sua abrangência; e eles deverão ser apresentados, para maior clareza, em sua sequência lógico-cronológica, dentro do processo de produção de edificações.

3.4.1 Classificação dos produtos intermediários da edificação

A edificação é constituída através de uma composição – ou combinação – de diversas partes, as quais, por sua vez, podem ser o resultado da combinação ou transformação de outras partes ou corpos, em uma sucessão de processos produtivos. Todas estas partes identificáveis podem ser chamadas de produtos intermediários da edificação. Estes produtos intermediários já foram classificados de diversas formas e cada classificação representa o esforço do classificador em compatibilizar as classes por ele adotadas, com o enfoque ou argumento que ele elaborou (BLACHÉRE, 1973; ABNT, 1985; ROCHA, 2008; FGV, 2008; ABNT, 2010). Neste trabalho, os produtos intermediários foram classificados em ordem crescente de trabalho agregado, de tal modo que cada tipo de produto represente uma etapa neste processo de agregação. Além disto, os conceitos do produto devem

¹⁷ Mesmo uma tenda no deserto compreende um número considerável de etapas. A produção da membrana (normalmente um tecido de origem orgânica) implica na produção da matéria prima, quer ela seja vegetal ou animal, no seu beneficiamento, na preparação do corante, na tecelagem e no corte e costura da tenda. A estrutura, por sua vez, envolve um número semelhante de etapas.

observar uma correspondência com os conceitos dos processos pelos quais ele foi obtido, os quais serão vistos mais adiante, para que fique clara a relação entre os dois.

Desta maneira – e sem uma preocupação em demonstrar que esta classificação é intrinsecamente superior a outras – os produtos intermediários podem ser classificados na seguinte sequência, segundo a nomenclatura do paradigma atual: matérias-primas, materiais, componentes, elementos, subsistemas e sistemas construtivos. Todos os conceitos apresentados acima são utilizados de forma corrente e fazem parte da linguagem daqueles que trabalham com o processo construtivo, de maneira que, em um primeiro momento, seus significados podem ser apropriados de forma intuitiva e informal, como havia sido proposto em 3.2. Entretanto, diversos problemas de definição emergem, quando estes conceitos são examinados de forma mais rigorosa.

3.4.2 Produtos intermediários da edificação

A definição da forma, da constituição e da função, primeiramente das matérias primas e dos materiais, e depois dos componentes, elementos, subsistemas e sistemas, permite o atendimento das funções para as quais estes produtos intermediários foram pensados, em cada etapa. Por este motivo, as definições dos produtos seguem, como proposto em 3.4, uma sequência lógico-cronológica, onde cada etapa representa uma distinção qualitativa, tanto da função, quanto das características da constituição e da forma do produto, naquela etapa. Os produtos intermediários correspondentes às diversas etapas serão definidos e descritos com base em sua utilização, na sequência mencionada. Esta utilização implica em diferentes combinações nas alterações de forma, função e constituição.

3.4.2.1 Matérias primas

Embora as matérias primas sejam os primeiros produtos intermediários, é necessário, primeiramente, definir os corpos naturais de onde elas são extraídas. Um corpo natural é definido como todo o corpo que não foi alterado pelo homem (não sofreu ação humana), quer seja em constituição, forma ou posição. Portanto, ele ainda se encontra em sua condição original, com suas características naturais, sem ter sido transportado, deslocado ou modificado pela ação humana. A definição do termo corpo, que foi utilizada no capítulo 2 (item 2.3.1.1), necessita de uma qualificação. Nem sempre um corpo natural é um volume de matéria, com forma definida e destacável, ou seja, que pode ser percebido e individualizado como algo distinto do ambiente em que se encontra. Esta definição inicial, desenvolvida para ser empregada nos componentes da edificação, não serve para alguns corpos naturais, que tem utilidade para as atividades humanas. Assim, um banco de areia, um veio de minério, uma mina de argila, muitas vezes são contínuos em relação ao seu

meio. A definição de sua existência ocorre como decorrência de uma operação cultural, na qual a definição do corpo natural é cultural e não física.

Um corpo natural pode, também, surgir em função da atividade humana, como é o caso de árvores que são plantadas, ou de bancos de areia causados por assoreamento de cursos d'água, causados pela ação humana. Entretanto, mesmo nestes casos, os corpos devem ser considerados naturais, porque, embora sua existência seja decorrência da ação humana, sua formação não ocorre como resultado direto da atividade humana, que é causa necessária, mas não suficiente, desta existência. Além disto, tais corpos naturais formam-se pela ação de forças não controladas pelo homem, como é o caso da força vital nos seres vivos, a *Wille zum Leben* (Wille zum Leben), que faz a árvore crescer e desenvolver-se, como argumentou Schopenhauer (1836), ou das forças envolvidas nos ciclos naturais da água, que forma os rios onde ocorre o assoreamento.

Corpos naturais são classificados como úteis, quando suas características permitem que eles sejam submetidos a diversos processos de transformação, que resultarão na produção de edificações. Esta classificação é um processo mental humano, que projeta nos corpos naturais a utilidade que, futuramente, será obtida através de seu uso. Uma formação rochosa, uma árvore, um banco de areia, um veio mineral, são corpos naturais, cuja existência não tem função, não tem caráter teleológico. Eles simplesmente são.

Para que o homem se disponha a remover determinado corpo natural de seu local original, algumas condições devem ser satisfeitas. Estas condições estão relacionadas ao conceito (ainda vago e genérico) de material e suas correlações com os conceitos de forma e função. Assim, para que os corpos naturais possam ser utilizados, três condições devem ser atendidas: sua constituição deve ser adequada; sua forma deve ser utilizável; e sua função, para uma atividade ou uso humano, deve estar definida.

Pelo exposto acima, parece razoável afirmar-se que, tanto no processo construtivo, quanto no produto construção, as matérias primas são a primeira instância de efetiva transformação, visto que os corpos naturais, pela própria definição, encontram-se inalterados. Esta primeira transformação ocorre com o único e exclusivo propósito de remover os corpos naturais de seu local de origem. Algumas vezes isto ocorre sem alteração na forma destes corpos, como é o caso da areia, do seixo rolado e de algumas pedras de mão. Entretanto, estas são exceções do caso mais geral, que é a alteração de forma dos corpos, para permitir sua extração do meio em que se encontram, como ocorre, por exemplo, com a madeira e os minérios, em geral.

O conceito de matéria prima pode agora ser desenvolvido. Sendo ele o primeiro na sequência proposta, refere-se a corpos que foram retirados de sua condição natural e aos quais foi atribuída uma função. Ou seja, em termos de forma e constituição, uma primeira matéria prima ainda não recebeu qualquer tipo de transformação (beneficiamento), exceto, como foi dito, uma modificação na sua forma, em função de sua remoção do local onde estava originalmente.

Através de sucessivos processos, a matéria prima é transformada até, finalmente, tornar-se um material de construção. É necessário definir em que momento isto ocorre. Muitos economistas definem matérias primas como os recursos que são extraídos da terra e ainda não foram beneficiados (HAHLEN, 2005; EUROPEAN COMMISSION, 2011). Outros, entretanto, consideram matérias primas os metais já reduzidos e purificados, que serão utilizados na confecção de bens (KLINGLMAIR, 2009). Marx, por seu lado, definiu matérias primas como todo e qualquer insumo que é utilizado na fabricação de um bem, independente do estágio de beneficiamento ou de transformação que aquelas matérias primas já receberam, podendo passar “por uma série de diferentes processos e, em cada um deles, ele serve como matéria prima, mudando sua forma constantemente” (MARX, 1977, p.289). No presente trabalho, a definição de matéria prima deve ser coerente com os objetivos propostos, ou seja, com a intenção de avaliar a viabilidade do atual paradigma, para desenvolvimento de tecnologias sustentáveis na construção. Para tanto, a definição de matérias primas deverá considerar as características essenciais da próxima classe, a dos materiais, de forma a não haver uma sobreposição de conceitos. Por isso, um corpo será considerado uma matéria prima enquanto suas características de forma e constituição forem suficientemente genéricas, de modo que seja impossível caracterizá-lo como um material de construção. Ou seja, quando suas características ainda forem suficientemente genéricas, para que ele não possa ser vinculado funcionalmente a uma aplicação na construção. Tome-se, como exemplo, corpos de alumínio. O primeiro processo consiste na extração de bauxita, que está na forma impura. Este minério impuro é uma matéria prima para o processo seguinte, que é a concentração e purificação do minério. A seguir, o minério concentrado e moído é uma matéria prima para o processo de redução eletrolítica em células (processo de Hall-Heróult) (WORLD BANK, 1998). O metal assim obtido pode ainda ser considerado uma matéria prima, visto que ele não está limitado, nem por sua forma, nem por sua constituição, a ser utilizado para um fim específico (por exemplo, a construção). Esta definição de matéria prima se distingue claramente dos usos correntes do termo, como foram apresentados acima. Aqui, uma matéria prima deixa de existir, quando e somente quando, sofre uma alteração na sua forma, na sua constituição física ou na sua função, de tal forma que sua utilidade esteja direcionada para a construção civil. No exemplo do

alumínio, a matéria prima passa a ser um material quando o corpo que a constitui é extrudado e deste processo resulta um perfil de alumínio. O perfil pode ser altamente específico, como é o caso de um perfil para esquadrias, de uma linha produzida por algum fabricante. Mas também pode ser um perfil mais genérico, como um perfil U ou L. Independentemente disto, o alumínio contido nestes perfis não poderá mais perder a especificidade de sua forma e da função a ela associada. Em muitos casos, juntamente com forma e função, a constituição é alterada, com novas substâncias e/ou estrutura interna.

Além da obtenção de matérias primas, via extração de corpos naturais, é possível obtê-las através da utilização de resíduos de outros corpos, que já perderam sua utilidade (seu valor de uso na função para a qual haviam sido produzidos), ou corpos resultantes de processos onde foram separados das matérias primas comercialmente importantes, normalmente chamados de rejeitos ou subprodutos.

Diante do exposto, é possível definir com mais precisão matéria prima como sendo: corpo que resulta da coleta, remoção ou uso de um corpo natural, ou de parte de um corpo natural, bem como corpo resultante de resíduos, rejeitos ou subprodutos, e que sofre alterações de forma e/ou de constituição, desde que tais alterações não limitem as suas possibilidades funcionais¹⁸. Evidentemente, existe sempre um grau de arbitrariedade nesta definição, visto que, em alguns casos, qualquer transformação limita as possibilidades funcionais do corpo. Assim, a bauxita do exemplo anterior poderia ser utilizada para servir de aterro, o que não ocorre, na prática, com o alumínio produzido a partir dela. O intento na definição é salientar que existe um vasto arco de possibilidades funcionais e de processo, quando um corpo pode ser identificado com uma substância, ou conjunto específico de substâncias, que tenham múltiplas funções e nenhuma pode ser privilegiada pela sua forma ou constituição. Esta distinção ficará mais clara quando o conceito de material for apresentado.

Para finalizar, é importante salientar que a matéria prima também se distingue do corpo natural, porque sua existência denota uma definição de utilidade que foi imposta sobre o corpo natural, fruto do processo volitivo humano.

3.4.2.2 Materiais de construção

O segundo conceito na sequência lógico-cronológica de produtos intermediários é o de material de construção e é, provavelmente, aquele que apresenta as maiores dificuldades

¹⁸ Uma redução das possibilidades funcionais da matéria prima, de modo a caracterizá-la como utilizável especificamente na construção civil, ou na construção de edificações, a transformaria em um material de construção, como será visto mais adiante.

para uma definição clara. Uma pesquisa na bibliografia sobre materiais de construção revelará que diversos livros, que se propõem a discorrer especificamente sobre este assunto, não trazem uma definição do que significa o termo 'material de construção' (VOROBYEV, 1965; VERÇOZA, 1970; ROSEN, 1979; PETRUCCI, 1987; RIBA, 1994). Quando uma tentativa de definição é feita, ela nada acrescenta ao senso comum, além de ser imprecisa. Assim, a definição de material de construção, como sendo "todos os corpos, objetos ou substâncias que são usados em qualquer obra de engenharia" (SILVA, 1985), não traz luz ao assunto e confunde o leitor. Uma fechadura é um corpo (e um objeto) usado em obras de engenharia e não é um material, mas um componente; uma colher de pedreiro é um objeto usado em uma obra de engenharia e não é um material, mas uma ferramenta. E o dióxido de titânio, utilizado nas tintas, é uma substância usada em uma obra de engenharia e não é um material, apenas uma matéria prima que foi incorporada a um material. A norma brasileira pouco ajuda. Ela define um material de construção como "todo produto, natural ou elaborado, que se emprega na construção" (ABNT, 1977). Embora esta definição seja um pouco mais específica que a apresentada por Silva, ainda não é satisfatória, porque os materiais são apenas uma das etapas (a segunda), no processo de produção de uma edificação, como foi visto, significando que muitos produtos empregados na construção não podem ser classificados como tal.

Como foi dito, um material passa a existir quando uma matéria prima recebe algum tipo de beneficiamento, de maneira que – em geral – o material, resultado deste beneficiamento, possa ser utilizado em algum processo, utilização esta que não seria possível na sua condição de matéria prima.

Neste ponto, serão feitas duas proposições, cuja demonstração será apresentada mais adiante, porque o objetivo, aqui, é apenas apresentar as características fundamentais dos materiais de construção. A prova das proposições seria, neste ponto, digressão demasiado longa. Pede-se, assim, neste momento, que o leitor aceite *prima face* os conceitos, ficando a dívida de sua prova para ser resgatada quando da discussão sobre a centralidade do conceito de material, no atual paradigma.

Primeira proposição: do ponto de vista do processo e do produto, os materiais são mais importantes do que as matérias primas, porque é a partir dos materiais que o paradigma atual é estruturado, permitindo que sejam produzidos todos os componentes, elementos, subsistemas, sistemas e, por fim, a própria edificação.

De fato, a partir das matérias primas poderia ser desenvolvido outro paradigma, que não envolveria a utilização de materiais, utilizando, por exemplo, processos de produção bottom-

up, a partir das matérias primas beneficiadas (purificadas ou modificadas). Entretanto, o uso de materiais e, mais importante, o uso do conceito de material, como conceito estruturante do presente paradigma, é central para a compreensão deste paradigma. Este assunto será melhor compreendido após serem analisados os processos que caracterizam o paradigma atual. Será, então, possível demonstrar a centralidade do conceito de material.

Segunda proposição: Embora o uso corrente do termo material muitas vezes se refira exclusivamente à sua constituição, existe uma impossibilidade de definir materiais, de maneira independente de sua forma e função. Ao contrário, materiais têm, necessariamente, função definida, pois, de outra sorte, não teriam, também, utilidade e interesse. Também têm forma definida (quando sólidos) ou adaptabilidade de forma (quando fluidos), porque ela é fundamental para viabilizar a realização das funções a que se destina.

Por definição, um material surge, inicialmente, como resultado da transformação das matérias primas. A transformação pode ser de forma, função ou constituição, ou qualquer combinação das três. Este material será transformado em outro material, caso a forma, função e/ou constituição deste novo corpo também sofram alterações no processo construtivo. Este processo se repete tantas vezes quantas forem necessárias, até que a forma definitiva a ser utilizada na edificação emerja. Neste momento, o material deixa de existir para dar lugar a um componente. Fica claro, também, que um material não é mais uma abstração sem forma, quantidade ou função.

Com o exposto acima, o conceito de material pode ser enunciado assim: um material é um corpo, em uma ou mais fases, com função, forma (ou adaptabilidade de forma) e constituição definidas, sem que estas correspondam ainda à função, forma e constituição características de um componente. O conceito de material abarca todas as etapas de transformação da matéria, entre a matéria prima e o componente.

É importante, ainda aqui, definir como deveriam ser classificados alguns conceitos que comumente são referidos como materiais de construção, mas que não têm forma nem função definidas ou específicas. Dentre estes conceitos podem ser citados a madeira, o aço, o alumínio, o granito e o basalto, entre outros. De acordo com a classificação proposta neste texto, isoladamente estes conceitos não definem materiais de construção, porque lhes falta a definição de forma e função. São, portanto, conceitos que se referem a diversas constituições de distintos materiais. Assim, a madeira é a constituição de tábuas, caibros e ripas; o aço é a constituição de barras, perfis e chapas, e assim respectivamente. É interessante analisar o concreto. De acordo com os conceitos apresentados até aqui, o concreto é um material, porque apresenta uma constituição e uma forma que são

absolutamente específicas e, portanto, definem sua função: independente da forma final a ser adotada pelo componente a ser produzido com o concreto, este último pode ser caracterizado como uma mistura de minerais, que serão transformados em outros minerais, com o conseqüente endurecimento do corpo. Fica claro aqui que o material existe somente enquanto a mistura ainda não passou pelas transformações químicas e físicas, conhecidas como cura do concreto. Após estas transformações, o material deixa de existir para dar lugar ao componente. O concreto deste componente não é, obviamente, a mesma mistura do início do processo; portanto, não deveria ser chamado pelo mesmo nome. Entretanto, a linguagem coloquial, de forma equivocada, assim o faz. De fato, após a cura, o componente apresenta duas características: forma e constituição, que são diferentes do concreto vertido na forma. Nomear duas coisas distintas com o mesmo nome pode conduzir ao equívoco; mas é a linguagem coloquial utilizada, distinguindo-se apenas como concreto fresco e endurecido. Neste trabalho, o termo concreto foi reservado ao material de construção e refere-se à mistura fluida de cimento, agregado graúdo, agregado fino, água e aditivos. Esta classificação dos conceitos é completamente compatível com as definições apresentadas até aqui.

3.4.2.3 Componentes

Um componente é o produto resultante da transformação da forma e/ou da constituição e, conseqüentemente, da função, de um ou mais materiais de construção. Entretanto, para que o resultado da transformação seja um componente e não apenas outra instância de material de construção, o produto resultante da transformação deve ter forma, constituição e função definitivas. Isto é, uma vez definidos e produzidos, sua forma, constituição e função permanecem essencialmente inalteradas durante sua utilização na edificação. Evidentemente, cada componente pode sofrer ainda algumas alterações menores que, entretanto, não descaracterizam sua forma principal ou sua constituição. De modo geral, as únicas modificações permitidas a um corpo classificado como componente estão relacionadas às suas necessidades de conectividade. Por exemplo, uma folha de porta sofre entalhes, para a colocação das dobradiças e maçaneta, mas sua identificação, como folha de porta, já ocorria antes dos entalhes e permanece inalterada depois deles.

Os componentes são, portanto, a primeira instância do processo construtivo com características conectivas. O processo se limita, a partir de seu uso, a formar combinações mais ou menos complexas de partes já existentes. Por isso, os componentes caracterizam uma mudança fundamental no processo construtivo, mudança esta que se manterá, até que se complete o edifício. Eles são, portanto, as partes elementares do edifício, o nível mais baixo (de menor complexidade) de organização e composição funcional do edifício.

Por ser a primeira instância, cada componente precisa ser combinado com outros componentes, para que, em conjunto, sejam funcionais. Novamente, pode ser tomado como exemplo o caso da folha da porta, que tem função definida, mas que necessita da combinação com outros componentes, tais como dobradiças, maçaneta e marco, para ser efetivamente funcional. Isto é, para ser uma porta completa, que pode ser colocada em muitos lugares e funcionará de maneira igual, em todos eles, de maneira independente. Neste sentido, da funcionalidade, uma folha de porta é diferente de uma porta completa, pois somente funcionará quando montada juntamente com outros componentes da porta.

Além do exposto acima, é importante definir que um componente pode formar outros componentes, no canteiro ou fora dele. Ou seja, a combinação de componentes pode gerar, não somente partes mais complexas da edificação, como elementos e subsistemas, mas também pode agregar componentes, para criar componentes mais complexos.

Cada componente pode, então, ser classificado em simples, composto ou articulado. Estas definições são apresentadas abaixo.

3.4.2.3.1 Componentes simples

Um componente simples é aquele formado por um único corpo ou por um grupo de corpos com a mesma constituição, que não apresentam movimento relativo entre eles e cujo conjunto possa ser caracterizado por uma ou mais funções compartilhadas. No caso de vários corpos, cada corpo pode ser considerado, individualmente, também como um componente simples. Um exemplo de componente simples é o tijolo cerâmico, porque ele é uma peça única, que não apresenta funcionalidade independente, mas que mantém sua forma durante sua aplicação e durante a vida útil do edifício. A argamassa de assentamento de uma parede também é um componente simples, quando sua forma final é obtida, porque, independente da sua forma mais ou menos complexa, a argamassa é formada por apenas um material transformado e não apresenta função independente no edifício. Do mesmo modo, uma tesoura do telhado é um componente simples, embora possua muitas partes. Ela é um componente porque apresenta uma funcionalidade estrutural e, eventualmente, estética, mas esta funcionalidade não é independente dos outros componentes do telhado. Evidentemente, a tesoura se distingue do tijolo, por exemplo, porque a primeira é formada por diversas partes ligadas entre si, enquanto o tijolo é formado por uma única parte. Assim, é possível considerar uma única parte da tesoura, como o pendural, a perna ou o tirante, como um componente, porque, sozinhos, cada um deles tem caracterizada sua funcionalidade específica. Entretanto, um pendural sem a perna e sem o tirante é, simplesmente, um corpo de madeira, sem a especificidade da função. A funcionalidade das partes só emerge do seu conjunto. Da mesma forma, as terças são um componente do

telhado, assim como cada caibro é um componente e os caibros, em conjunto, formam um componente e as ripas formam outro componente.

3.4.2.3.2 Componentes compostos

Surgem casos em que o componente apresenta uma complexidade maior. É o caso, por exemplo, do caixilho móvel de uma janela de alumínio. É uma parte especializada do elemento janela. Entretanto, este componente é diferente dos componentes do telhado, porque é formado por componentes de diferentes constituições: o pano de vidro, o caixilho de alumínio, a vedação de SBR e os parafusos de aço. Em casos como este, o componente é considerado um componente composto. Outro exemplo de componente composto é uma placa cerâmica de revestimento, como um azulejo. Sua constituição é composta por diversas camadas, formadas através da transformação de diferentes materiais. Componentes compostos podem, ou não, ser desmontados. Nos exemplos dados, o caixilho pode ser desmontado nos componentes simples individuais, enquanto a placa de azulejo não pode.

3.4.2.3.3 Componentes articulados

Um componente articulado é formado por um conjunto de corpos que apresentam movimento relativo entre si. É o caso, por exemplo, da dobradiça da porta. Neste caso, as peças da dobradiça fazem, evidentemente, um conjunto funcional. Entretanto, não são ainda funcionalmente independentes; ou seja, uma dobradiça somente poderá ser funcional quando fixada a outros componentes ou elementos, como, por exemplo, uma porta, para permitir a rotação da folha da porta. Assim como a dobradiça, a fechadura da porta é um componente articulado. Aqui, é importante salientar que a definição de componente articulado serve tão somente para definir aquelas partes da edificação que, não apresentando independência funcional, são, ainda assim, complexas e não são compatíveis com o conceito de componente, como corpo único.

3.4.2.4 Elementos

O elemento é definido como a combinação de componentes, em um todo funcionalmente independente, inserido dentro da edificação. É o caso do telhado, de uma janela, de uma porta, do elevador, da escada, do conjunto de estacas com o bloco de coroamento, do conjunto pilares, vigas e laje de um pavimento, da cobertura de um telhado. A definição de funcionalidade independente é relevante e merece uma qualificação, porque, aparentemente, conflita com a noção de que uma edificação é um todo, que funciona pela atuação interdependente de suas partes. Em termos estruturais, por exemplo, a superestrutura suporta as cargas dos demais elementos e as transmite às fundações, que

transmitem essas cargas ao solo. Mas sem a superestrutura, a fundação não funcionaria e vice-versa. Isto se aplica também ao resto da edificação. Portanto, falar em funcionalidade independente requer uma definição adicional.

O conceito de funcionalidade independente refere-se à capacidade de um elemento de ter suficiência funcional para desempenhar uma função, que equivale à sua condição de ser um corpo projetado para atender determinado requisito do usuário. No exemplo das características estruturais da edificação, as fundações têm a exclusividade funcional de transmitir as cargas ao solo, porque elas possuem todos os elementos para responder integralmente ao requisito de apoio da edificação e de sua ligação efetiva com o solo¹⁹. Muitas vezes, esta suficiência funcional coincide com a percepção do usuário sobre a função de diversas partes da edificação. Uma porta, por exemplo, é percebida pelo usuário como um elemento funcional. Mas o usuário associa a funcionalidade ao conjunto formado pela folha da porta, o marco, as dobradiças e as maçanetas. Esta funcionalidade, ligada diretamente ao uso, distingue-se da funcionalidade dos componentes, que está ligada ao funcionamento do elemento do qual fazem parte. Assim, o usuário percebe que uma dobradiça tem função e pode, inclusive, definir o tipo e a quantidade de dobradiças em uma porta. Entretanto, para o seu uso, as dobradiças não funcionam independentemente do conjunto da porta, e seu uso somente ocorre quando a porta, como um todo, é utilizada, ou seja, quando a função que a porta atende é requerida. Uma porta, entretanto, é um conjunto que apresenta suficiência funcional, ou seja, é possível se decidir sobre a colocação de uma porta em determinada parede e este conjunto realizará, de maneira independente, as funções definidas para uma porta.

Deve ficar claro que a aplicação do conceito de funcionalidade independente carrega algum grau de arbitrariedade. Entretanto, esta arbitrariedade não retira o objetivo essencial de classificar elementos como qualitativamente distintos de componentes. Este objetivo refere-se ao processo de definição das características do edifício, de maneira a obter uma funcionalidade espacial, que atenda às necessidades dos usuários. Ou seja, os elementos da edificação são as unidades funcionais básicas à disposição do projetista, para que ele atenda àquelas necessidades. Evidentemente, o projetista pode se debruçar sobre um elemento e detalhar as características de seus componentes e, até mesmo, de seus materiais. Entretanto, estas definições não emprestam aos componentes e materiais a independência funcional característica dos elementos. Por exemplo, um arquiteto, ao

¹⁹ A exclusividade funcional refere-se apenas à suficiência funcional do elemento e não à sua limitação funcional. Assim, o radier, ao mesmo tempo em que é fundação e transmite as cargas da edificação ao solo, pode ser piso e acumular as duas funções.

projetar um edifício, pode decidir se, em determinada peça, deverá colocar uma janela ou duas e em que parede estas janelas deverão estar.

A definição de funcionalidade independente, ligada aos requisitos do usuário, pode ser aplicada sem dificuldade a outros elementos. Entretanto, existem alguns subsistemas que não são diretamente utilizados e, conseqüentemente, percebidos pelo usuário. Dentre eles, encontra-se, o caso citado da fundação da edificação. No caso destes subsistemas, a definição de componentes e elementos ocorre por analogia funcional com aqueles em que existe uma interação direta com o usuário da edificação. Ou seja, um elemento de fundação é definido como um conjunto funcionalmente independente de componentes. Por exemplo, um conjunto formado por estacas pré-moldadas, unidas por um bloco de fundação, poderia ser um elemento do subsistema fundação. Neste caso, este conjunto claramente cumpre uma função de fundação, independente dos outros conjuntos. Entretanto, uma estaca é apenas um componente, porque ela não pode atuar independentemente das outras estacas e, principalmente, do bloco de fundação. Este mesmo tipo de analogia pode ser utilizado na definição de elementos de outros subsistemas, como a estrutura, por exemplo, onde pilares, vigas e lajes são já caracteristicamente definidos como elementos funcionais deste subsistema.

3.4.2.5 Subsistemas

O subsistema é o conjunto de todos os elementos de mesma função, ou de funções complementares, na edificação. O Conseil International du Batiment (1982) apresentou um *master-format*, que explicita os subsistemas da edificação. O quadro abaixo lista os subsistemas constantes naquela norma. Cada subsistema exerce uma função mais abrangente do que os elementos individuais, com um efeito sinérgico entre eles. Por exemplo, as janelas, as paredes externas e o telhado formam o subsistema de vedação ou envelope da edificação. Embora tenham funções específicas diferentes, sua função mais abrangente é a de servir como envoltória da edificação. Estes elementos cumprem esta função mais abrangente através de funções especializadas complementares.

Quadro 3: Classificação de subsistemas da ISO (Fonte: ISO, 1982).

SUBSISTEMA	DIVISÕES DO SIBSISTEMA
Estrutura	Fundações Superestrutura
Envelope externo	Envelope abaixo do solo Envelope acima do solo
Divisores espaciais fora do envelope	Divisores externos verticais Divisores externos horizontais Escada externa
Divisores espaciais dentro do envelope	Divisores internos verticais Divisores internos horizontais Escada interna
Serviços	Distribuição e disposição de água Aquecimento e ventilação Distribuição de gás Elétrica Telecomunicações Transporte mecânico e eletromecânico Transporte pneumático e por gravidade Proteção

3.4.2.6 Sistemas construtivos

O sistema construtivo é, por definição, a somatória de todos os subsistemas que compõem a edificação. Portanto, não deveria ser considerado como um produto intermediário do processo construtivo. Em relação à terminologia, é preciso destacar a mudança de conotação que ocorre frequentemente, quando o termo sistema construtivo é utilizado. Como foi visto acima, o termo subsistema é empregado para descrever partes da edificação que englobam diferentes funções. Estas funções são genéricas e, a princípio, deveriam estar presentes em todas as edificações. Assim, o subsistema subestrutura (as fundações), o subsistema estrutura e o subsistema envoltória são nomes genéricos, que descrevem partes da edificação com funções específicas. Entretanto, o termo sistema construtivo refere-se, muitas vezes, a soluções tecnológicas específicas. É fato que algumas destas soluções englobam todos os subsistemas da edificação. Mas o termo também pode referir-se a soluções tecnológicas que envolvem alguns poucos subsistemas e, até mesmo, um único subsistema, como o subsistema estrutura, por exemplo. Para evitar confusões, estas

soluções não deveriam receber o nome de 'sistemas construtivos', mas de soluções construtivas.

À medida que os componentes vão sendo agregados em elementos, estes vão sendo agregados em subsistemas e os subsistemas são agregados para formar a edificação; a crescente complexidade dos conjuntos torna cada vez mais importante a questão da conectividade e da sinergia daí advindas.

3.4.3 Comparação com outras nomenclaturas

Na construção civil, a classificação de produtos intermediários não é universal. A norma brasileira NBR 5706 (ABNT, 1977), que trata de pré-fabricação, apresenta uma classificação bastante imprecisa. Mais grave ainda é o caso de outras normas que, além de imprecisas, invertem as definições normalmente aceitas de elemento e componente, como é o caso da NBR 8798 (ABNT, 1985), que trata de alvenaria estrutural. É razoável imaginar que esta imprecisão derive da utilização de conceitos intuitivos para a definição dos termos, como considerar que um elemento, por associação com a química, é a unidade básica e hierarquicamente inferior ao componente. Blachère (1977) apresentou uma classificação mais consistente, com um encadeamento lógico entre os diversos conceitos, mas que foram desenvolvidos para serem utilizados especificamente na sua abordagem sobre industrialização da edificação. Rocha (2008) produziu uma nova classificação, baseada nas duas classificações anteriores; porém, aquela apresentada por Blachère (1977) ainda parece ser a que retém maior consistência interna, pois distingue claramente o material (que complementa erroneamente, como será visto mais à frente, com o termo 'amorfo') dos componentes já acabados ou ainda semi-acabados. A Epusp e a Fundação Getulio Vargas também apresentaram classificações. Finalmente, é importante citar o trabalho de Salim Neto e Souza (2009), que adotou a mesma classificação básica deste trabalho, tomando como referência notas de aula de Sabbatini e Barros, de 2008, e a norma ISO 6341, de 1984. A classificação apresentada pela norma é, sem dúvida, a pior de todas, porque não separa claramente os termos. As diversas classificações são apresentadas no quadro 4, com a classificação apresentada neste trabalho, na última coluna, à esquerda. A comparação entre classificações não é perfeita, porque a aplicação dos conceitos sempre apresenta uma parcela de arbitrariedade, que deve ser entendida como uma manifestação da variedade de soluções e processos, que compõem os processos da edificação.

Quadro 4: Comparação entre nomenclaturas de produtos intermediários da construção.

Termo da classificação proposta nesta tese	NBR 15873 (ABNT, 2010)	NBR 8798 (ABNT, 1985)	BLACHÉRE (1976)	EPUSP (2009)	FGV (2009)	ROCHA (2008)	SALIM NETO e SOUZA (2009)
Corpo natural							
Matéria prima					Matéria prima		
Material de construção	Material simples, até elemento semi-terminado		Material amorfo e semiproduto	Material básico	Material	Material amorfo e elemento elaborado	
Componente	Elemento simples	Elemento	Componente	Componente	Material	Componente	Componente
Elemento	Elemento composto	Componente	Componente de catálogo	Elemento	Material	Elemento	Elemento
Subsistema	Conjunto funcional			Subsistema	Construção	Subsistema	Subsistema
Sistema					Construção		Sistema

3.5 O PROCESSO CONSTRUTIVO

O processo construtivo, baseado no paradigma atual, foi analisado utilizando os mesmos conceitos básicos apresentados no capítulo 2. Assim, serão discutidas as maneiras como os processos constitutivos e produtivos se apresentam e, dentro de cada tipo, as características específicas dos diferentes processos, na forma como eles se apresentam neste paradigma. Os processos energéticos não serão analisados, devido à sua grande diversidade dentro de cada processo produtivo.

3.5.1 Processos constitutivos

Os processos constitutivos *top-down* e *bottom-up* estão presentes em diferentes momentos do paradigma atual.

3.5.1.1 Processos *top-down*

Os processos *top-down* são os processos dominantes nas etapas de extração, beneficiamento e industrialização do paradigma atual. Estes processos ganham um relevo particularmente importante na industrialização, porque permitem uma alta produtividade das indústrias de materiais. Esta alta produtividade ocorre à custa de um maior número de níveis hierárquicos na estrutura interna, ou seja, com a simplificação estrutural dos materiais, como será visto, mais adiante, nas características básicas do paradigma.

3.5.1.2 Processos *bottom-up*

Os processos *bottom-up* são os processos dominantes na etapa de montagem do paradigma atual. Embora também existam casos de processos *bottom-up* na etapa de industrialização, caracterizados pela presença de auto-montagem, estes processos apenas contribuem para os processos principais de produção naquela etapa e não estão diretamente relacionados à definição da forma e nem sempre são diretamente controlados para a otimização do desempenho, em relação à função, como é característico dos processos *bottom-up*. Como exemplos destes processos *bottom-up* auxiliares, podem ser citados a produção de concreto e de aço, na formação de cristais característicos, no interior desses materiais.

3.5.2 Processos produtivos

Os processos produtivos utilizados dentro do paradigma atual privilegiam, nas primeiras etapas, os processos transformativos, que são seguidos pelos processos conectivos. Estes

processos são apresentados na figura 19, dentro de um esquema geral de processos adaptado daquele apresentado no segundo capítulo, na figura 17.

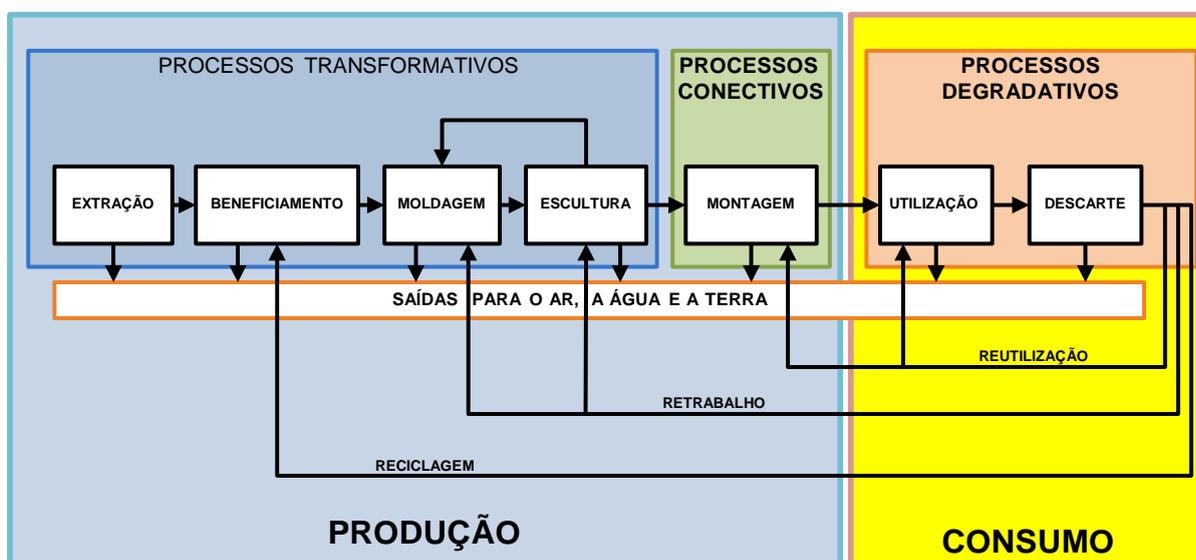


Figura 19: Esquema geral de processos, segundo o paradigma atual.

3.5.2.1 Processos transformativos

Tomando por base o esquema geral de processos, representado na figura 17, os processos transformativos comportam as etapas de extração, beneficiamento e industrialização.

Na etapa de extração, são obtidas todas as matérias primas, muitas delas ainda com múltiplas possibilidades de uso, como é o caso dos minérios metálicos (p. ex. minérios de ferro e alumínio). Algumas matérias primas, entretanto, principalmente os minérios não metálicos ou metálicos que não se destinam à redução metálica dos respectivos óxidos, são extraídos já com o objetivo de utilização em componentes com constituição mineral, tais como peças cerâmicas com função estrutural, de vedação e de revestimento. As exceções são a sílica, e outros compostos extraídos para a fabricação de vidros. A extração das matérias primas vegetais é importante, principalmente em função da utilização extensiva da madeira nas edificações, embora o percentual, em peso, das matérias primas vegetais, nas edificações brasileiras, seja limitado a menos de 10%, tomando-se por base os resíduos de construção e demolição gerados (NOVAES; MOURÃO, 2008).

Embora exista uma grande diversidade de composições minerais e vegetais espalhadas sobre e sob a superfície terrestre, os produtos intermediários da construção, bem como as tecnologias de produção, tendem a uma maior homogeneidade de constituição, à medida que processos industriais substituem processos artesanais. Além da constituição, a forma dos componentes também tende a uma homogeneização. Por exemplo, as paredes de

alvenaria utilizavam tijolos cerâmicos, com uma grande variedade de formas, cujas geometrias e escalas variavam conforme a sua região de produção. A mudança de tecnologia, utilizando placas de gesso acartonado, uniformizou, tanto as placas, como os perfis metálicos da *steel frame* de suporte. As implicações diretas desta tendência à homogeneização são várias. Em primeiro lugar, ela permite um acesso mais fácil das grandes corporações produtoras de materiais aos mercados locais, estimulando a concentração e, eventualmente, a oligopolização destes mercados (ROTH, 2003). Em segundo lugar, a utilização das mesmas tecnologias e produtos, de maneira progressivamente mais independente dos recursos locais, promove o maior deslocamento destas matérias primas ou de seus produtos, desde centros de extração, até centros de beneficiamento e, finalmente, até centros de industrialização, definidos segundo cálculos de ganhos de escala. Segue-se um processo de distribuição dentro de vastos territórios, até o consumo final dos produtos manufaturados. Estes processos obrigam a um consumo muito maior de energia para o transporte, bem como de toda a infraestrutura de transporte e movimentação de cargas. Estes custos são parcialmente compensados pelos ganhos de escala de produção, mas isto, certamente, não inclui todas as externalidades negativas que daí decorrem. Um porto, seja fluvial ou marítimo, por exemplo, causa diversos impactos no ambiente à sua volta, tanto na sua implantação, quanto na sua operação. Além, evidentemente, das externalidades causadas pelo consumo de energia, geralmente de fontes fósseis.

A extração de matérias primas, tanto de minerais para construção, quanto de minérios e de biomassa, para diversos usos, tem crescido de maneira exponencial. No caso específico dos minérios para construção, os volumes anuais evoluíram de aproximadamente 2 bilhões de toneladas, em 1950, para mais de 20 bilhões, em 2005 (UNEP, 2011). Isto implica em uma pressão sem precedentes sobre os recursos naturais e um grau de devastação, muitas vezes irreversível, nos biomas onde estes recursos estão localizados, causada, não somente para a extração propriamente dita, mas também para estradas, infraestrutura de apoio e edificações.

A etapa de beneficiamento das matérias primas ocorre, em muitos casos, próxima aos locais de extração, porque as matérias primas, especialmente de minérios metálicos, contêm quantidades significativas de substâncias que não apresentam interesse comercial. Este é o caso das extrações de minérios de alumínio, cobre e outros metais mais nobres, cujas concentrações nas porções extraídas são, em geral, inversamente proporcionais ao seu valor de mercado. Assim, ouro e prata geram mais de 99% de resíduos, enquanto o minério de ferro gera, aproximadamente, 60% de resíduos (MIRANDA et al., 2003).

A etapa de beneficiamento é, também, aquela em que os processos de separação física e química das substâncias comercialmente importantes geram diversos tipos de impactos ambientais. Dentre estes impactos, os mais severos são: deposição de resíduos em mananciais de água; drenagem ácida de água, que percola os resíduos do beneficiamento; vazamentos de depósitos líquidos; emissões de gases tóxicos e a exaustão de mananciais de água subterrânea (MIRANDA et al., 2003). Some-se a isso o dano à saúde humana, por diversos tipos de contaminação de resíduos tóxicos, particularmente de metais pesados. À medida que as jazidas com as maiores concentrações de minérios metálicos vão sendo exauridas, a exploração move-se para jazidas mais pobres, com a consequente geração de maiores volumes de resíduos e maior consumo de energia (UNEP, 2011).

No paradigma atual, a etapa de beneficiamento segue a mesma lógica da etapa de extração. A universalização de determinados produtos e tecnologias causa uma pressão de demanda sobre algumas matérias primas, especialmente os minérios metálicos, criando um desequilíbrio com a elasticidade da oferta (HUMPHREYS, 2010). Como consequência, os preços destas matérias primas quadruplicaram entre 2000 e 2005 (UNEP, 2011).

A terceira etapa dos processos transformativos, no esquema geral da figura 17, era a industrialização, que no paradigma atual é dividida em duas etapas, que normalmente ocorrem em sequência: a moldagem, que equivaleria, na maioria dos casos, à formação; e a escultura, que equivaleria à adaptação. Nesta etapa, de acordo com a nomenclatura utilizada pela comunidade da indústria da construção, as matérias primas deixam de existir, para dar lugar aos materiais. Estes materiais caracterizam-se, em primeiro lugar, por não serem mais considerados *commodities*, como as matérias primas. Assim, o aço, o alumínio, o cobre, os plásticos, o vidro e o cimento, dentre outros, são gradativamente transformados em produtos cada vez mais especializados, com forma e constituição adequados para atender às demandas específicas de usos, na construção de edificações.

Seguindo ainda as etapas da figura 17, às duas etapas do esquema geral de produção da figura 15 – a formação e a adaptação – correspondem indústrias distintas. As empresas que produzem os materiais fazem parte da etapa de formação, enquanto as indústrias que utilizam estes materiais na construção civil fazem parte da etapa de adaptação. As empresas do primeiro grupo podem ser as mesmas que processaram as matérias primas, como é o caso do alumínio e do vidro, ou podem obter estas matérias primas em graus variados de beneficiamento, como é o caso do aço e do cobre. Cada material é processado por indústrias, que formam cadeias produtivas dentro de segmentos distintos.

Nessas diversas cadeias produtivas existe uma correlação entre o grau de concentração de um segmento e o seu grau de industrialização: quanto maior a concentração, maior o grau de industrialização e a capacidade de inovação do segmento (FABRICIO, 2003). Assim, os segmentos que industrializam os materiais podem ser aglutinados em dois campos, conforme o grau de concentração dos seus respectivos mercados. No primeiro campo, encontram-se empresas em mercados altamente concentrados e com alto investimento de capital. Dentre os segmentos oligopolizados encontram-se aqueles que industrializam o aço e seus materiais (perfis, chapas e cabos); o alumínio e seus materiais similares aos do aço (perfis, chapas e cabos; exceto para funções estruturais); o vidro plano; o cimento; o cobre e seus materiais, especialmente os fios para condução de eletricidade; e, em certa medida, os revestimentos de cerâmica, especialmente para os mercados mais sofisticados, como os de porcelanatos e azulejos.

Quando um segmento apresenta alto grau de concentração, as empresas tendem a formar oligopólios não predatórios (NOLAN, 1999). Com isto, cada empresa tem maior capacidade de investir em P&D. Esta capacidade é reforçada pela melhor condição de extrair lucro da atividade em condições de oligopólio, do que em condições de concorrência pura (HAGA, 2008), pela óbvia tendência à formação de cartéis. Tal comportamento de cartel pode ser encontrado nos segmentos de tubulações plásticas (CREAMER, 2010); cimento (MENON; IYENGAR, 2012) e aço (WOJES, 2010), dentre outros. Deste modo, as empresas que compõem estes segmentos industriais investem pesadamente em tecnologias de processo e de produto.

Por outro lado, quando determinado segmento está pulverizado em muitas empresas que atuam em condições de concorrência pura, como no caso dos componentes cerâmicos de alvenaria (tijolos maciços e furados), o investimento em P&D, de cada indústria, é muito baixo e o avanço tecnológico é lento.

Além disto, em cada uma das cadeias do macrocomplexo da construção, o nível de industrialização pode variar de maneira significativa, ao longo da cadeia. Em segmentos onde existe uma grande concentração da indústria, a dinâmica da inovação tecnológica é normalmente controlada pela indústria de materiais de construção e não pela indústria da edificação (FABRICIO, 2003). A indústria de materiais se comporta como uma empresa sol²⁰, em torno da qual orbitam outras empresas, os planetas representados por empresas terceirizadas ou subempreiteiras. De fato, grandes conglomerados de materiais, como aço,

²⁰O conceito de 'empresa sol' já foi utilizado por Proença (1989, apud AMORIM, 1995), mas com significado diverso. Naquele caso, todas as empresas tinham a mesma atividade.

vidro e alumínio tendem a formar alianças estratégicas com seus fornecedores e distribuidores (LONDON, 2004). Esta dinâmica do desenvolvimento tecnológico e inovação pode ser observada em diferentes segmentos, apresentados no quadro 5, baseado nos setores de insumos da construção definidos por Haga (2008).

Quadro 5: Dinâmica do desenvolvimento tecnológico e inovação, nos setores de insumos da construção.

SEGMENTO (MATERIAL)	GRAU DE CONCENTRAÇÃO	GRAU DE INDUSTRIALIZAÇÃO	FONTE
Areia	baixo	baixo	FABRICIO, 2003
Cerâmica vermelha	baixo	baixo	FABRICIO, 2003
Cerâmica branca	médio	médio	FABRICIO, 2003
Tintas	medio	médio	SINDUSCON-SP, 1995
Alumínio	alto	alto	SINDUSCON-SP, 1995
Vidro	alto	alto	SINDUSCON-SP, 1995
Aço	alto	alto	REIS, 2010
PVC	alto	alto	SINDUSCON-SP, 1995

A segunda parte da etapa de industrialização consiste na adaptação dos materiais fabricados, caracterizada, no paradigma atual, por processos de escultura. A escultura é realizada através da aplicação desses materiais, que pode ocorrer de duas formas: diretamente na construção, como no caso de fios, tubulações de água e esgoto, telhas, vidros, revestimentos de pisos e paredes e madeiras, chapas de gesso e gesso acartonado, dentre outros; ou através da componentização destes materiais, como no caso de

esquadrias de alumínio, aço e madeira, portas, painéis de alvenaria ou concreto, estruturas de concreto e aço, dentre outros. Quando as empresas que produzem os materiais não os utilizam para produzir os componentes, esta componentização pode ser feita por empresas terceirizadas, de menor porte, ou por subempreiteiras, ou, ainda, pela própria empresa construtora. Nestes casos, a abordagem geral utilizada pelas empresas produtoras de materiais é o desenvolvimento de soluções de componentização, embutidas nos próprios materiais.

Entretanto, muitas vezes a produção de componentes e elementos é feita por empresas de grande porte. Isto ocorre quando os componentes apresentam um maior grau de sofisticação, expresso em uma combinação de forma, constituição e função, que tornam impossível a sua obtenção sem um alto grau de industrialização. É o caso dos componentes produzidos pelos setores elétrico (interruptores, tomadas e luminárias), de metais (torneiras, registros, maçanetas e dobradiças) e de revestimentos cerâmicos (semiporosos e porcelanatos). Existem ainda situações em que as empresas produzem, não apenas os componentes, mas elementos e subsistemas inteiros. Estes casos, entretanto, são mais raros e estas empresas normalmente acompanham o paradigma das indústrias mecânicas. Este é o caso dos subsistemas de condicionamento de ar e dos elevadores.

3.5.2.2 Processos conectivos

Os processos conectivos são a última etapa dos processos produtivos da edificação. Eles se caracterizam por atividades de montagem dos componentes, elementos e subsistemas. Estes processos podem ocorrer em diversos momentos, dentro da cadeia produtiva, de acordo com a tradição tecnológica de cada tipo de indústria, bem como de fatores econômicos e tecnológicos envolvidos, como será visto mais adiante.

Quando a montagem de componentes e elementos ocorre antes da sua colocação definitiva dentro da obra, ela é normalmente referida como pré-montagem. Entretanto, o termo não é utilizado em outros processos de pré-montagem, como no caso de metais sanitários, dobradiças e fechaduras, que são componentes compostos e/ou articulados.

Quando a montagem é realizada durante o processo construtivo da edificação, propriamente dita, ela não recebe nenhuma denominação especial, denotando que esta é a prática aceita como normal. Assim, se o telhado de madeira, referido no item 2.3.1.4, for executado segundo a tecnologia tradicional, sua montagem será executada na própria obra.

No paradigma atual, os processos de montagem, na construção de edificações, diferenciam-se dos mesmos processos em outros setores industriais, porque, normalmente, não são

segregados temporal e espacialmente de processos transformativos, tanto de moldagem, quanto de escultura. Ao contrário, a presença de processos híbridos (item 2.1.8) torna-se necessária, para permitir a adaptação dos materiais e componentes da indústria da construção. Este aspecto é de fundamental importância no processo construtivo e traz diversas implicações. Ele decorre da própria estrutura industrial e tecnológica do macrosetor da construção, que será analisada no item sobre a hegemonia da indústria de materiais. Assim, a colocação de um piso cerâmico, por exemplo, que seria caracteristicamente um processo de montagem e funcionalmente equivalente à colocação do carpete de um automóvel, utiliza, concomitantemente ao assentamento das peças, processos de escultura, para a realização de todos os recortes necessários às adaptações do piso ao perímetro interno das peças de uma edificação (figura 20), bem como de moldagem, para o espalhamento e conformação da argamassa de assentamento.



Figura 20: Escultura de peças cerâmicas de piso, durante o processo de montagem.

Este processo de montagem difere radicalmente do processo de montagem do carpete do automóvel, que é recebido na linha de montagem previamente recortado e, em alguns casos, com adesivo. No caso do automóvel, como em outros segmentos, tais como eletrônicos, eletrodomésticos, equipamentos mecânicos, existe uma segregação temporal e espacial dos processos conectivos de montagem, em relação aos processos transformativos de escultura e moldagem. Dentre as implicações desta segregação, podem ser citados: a incompatibilidade entre o paradigma atual da construção e princípios de sustentabilidade: proposição de novo paradigma

maior produtividade, pois todas as atividades são conduzidas com equipamentos altamente eficientes e dedicados, dentro de um processo produtivo bem encadeado e racionalizado; o melhor controle de qualidade, porque nos processos industriais existe o efetivo controle de todos os passos para a execução das tarefas e não há margem para improvisação; a menor geração de resíduos, porque as eventuais sobras são recicladas dentro do processo industrial, muitas vezes tornando-se a matéria prima em um ciclo fechado, dentro da própria fábrica. A General Motors do Brasil, por exemplo, está implantando o programa Zero Aterro, visando a reciclagem de 100% dos resíduos gerados no seu processo industrial; e o menor custo, consequência das três implicações mencionadas acima.

A racionalização, dentro do setor de edificações, foi buscada através de diversas abordagens, dentre elas a modulação, a racionalização, a industrialização e a pré-fabricação. Entretanto, nenhuma destas soluções tornou-se prevalente nos processos produtivos da edificação. Os motivos serão analisados mais adiante, quando forem discutidas a hegemonia da indústria de materiais e a centralidade do conceito de materiais, no paradigma atual.

3.6 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DO PARADIGMA ATUAL

Foram identificadas três características básicas do paradigma atual. São elas: a dicotomia na edificação, a hegemonia tecnológica da indústria de materiais e a centralidade do conceito de material.

3.6.1 A dicotomia na edificação

A descrição detalhada dos produtos e processos da construção, segundo o paradigma atual, feita nas duas seções anteriores (3.3 e 3.4), deixa antever a dicotomia existente neste paradigma.

A primeira característica fundamental desta dicotomia é que ela ocorre concomitantemente nos produtos e nos processos, na transição de materiais para componentes. Assim, de um lado desta dicotomia coincidente, estão as matérias primas e os materiais, submetidos, essencialmente, a processos transformativos, enquanto, de outro lado, estão os componentes, elementos e subsistemas, submetidos, basicamente, a processos conectivos. Esta concomitância também ocorre em relação aos processos constitutivos, já que os processos *top-down* coincidem com os processos transformativos, enquanto os processos *bottom-up* coincidem com os processos conectivos. Isto significa que os processos *top-down*

referem-se às matérias primas e aos materiais, enquanto os processos *bottom-up* referem-se aos componentes, elementos e subsistemas.

A segunda característica, como será visto em maior detalhe mais adiante, é a disparidade entre os níveis tecnológicos dos dois lados da dicotomia. De um modo geral, o nível tecnológico dos processos transformativos é muito mais elevado que o nível tecnológico dos processos conectivos. Esta diferença tem importantes consequências para a estrutura da indústria da construção e para a sua capacidade de absorver e implementar princípios de sustentabilidade. A dicotomia tem um significativo impacto sobre a estrutura da indústria e sobre a dinâmica de sua evolução tecnológica e parece ter causas, a partir de duas origens distintas: origem cultural e origem econômica. Serão vistas primeiro as causas de origem cultural.

3.6.1.1 Causas culturais

As causas de origem cultural referem-se a três fatores. O primeiro fator foi a limitação das primeiras tecnologias de construção, em sua capacidade de manipular a matéria. A maneira como estas limitações impregnaram as soluções tecnológicas, que se disseminaram nas práticas de produção de edificações, podem ser percebidas no grau de precisão obtido nos diferentes processos de produção. Na indústria de edificações, diferentemente de outras áreas da engenharia, onde os processos disponíveis foram gradativamente reduzindo a escala da efetiva manipulação e da precisão e tolerância, a precisão na engenharia civil permaneceu na escala do centímetro (inclusive nos projetos). De fato, enquanto em outras áreas a escala de manipulação economicamente viável passou do nível meso (milimétrico), para o nível micro, na segunda metade do século passado (SULLIVAN, 1980) e, em alguns casos, mesmo do nível micro, para o nível nano, na última década (EHMANN et al., 2002; SCHULENBURG, 2004; RAMSDEN, 2009), na construção civil nenhum avanço foi possível na produção final da edificação, criando a cultura de adaptação e ajuste, incorporada à prática da indústria e aplicada durante o processo produtivo da edificação (AMORIM, 1995). Esta prática também permite que componentes sejam produzidos com baixo nível tecnológico, visto que apenas com uma maior exigência por tolerâncias menores seria possível impulsionar o uso de processos industrializados mais sofisticados.

O segundo fator foi a resistência das pessoas em comprar casas que, de alguma maneira, parecessem menos sólidas ou com menor confiabilidade do que aquelas com as quais já estavam acostumadas e que o tempo comprovou serem duráveis. Isto significa utilizar materiais e tecnologias que apresentam limitações severas, em relação a um maior grau de industrialização. Esta resistência deve-se, tanto ao fato de serem as casas o maior investimento na vida da maioria das pessoas, como é também, acima de tudo, o abrigo, a incompatibilidade entre o paradigma atual da construção e princípios de sustentabilidade: proposição de novo paradigma

proteção das pessoas, contra toda sorte de ameaças, tanto naturais, quanto antropogênicas. Portanto, ficou assim caracterizado, na cultura dos povos, que este abrigo tem que ser sólido e durável. Esta inércia cultural poderia ser vencida com um enfoque no desempenho das soluções, ao invés de uma abordagem prescritiva do que seria sólido e durável, baseado em tentativa e erro e no conhecimento acumulado por gerações. Entretanto, as tecnologias de avaliação das soluções tecnológicas também foram, por muito tempo, inexistentes ou incipientes. Essa histórica incapacidade de avaliação retardou, por muito tempo, a introdução de produtos e processos mais modernos na construção, deixando aos fabricantes de materiais o ônus do desenvolvimento tecnológico. Somente no século XX, mormente em sua segunda metade, institutos de pesquisa e avaliação se disseminaram e expandiram, em todo o mundo (BENDER, 1976), principalmente nas nações industrializadas, com a capacidade de avaliar o desempenho das soluções tecnológicas, criando, entre outras, simulações de carga e envelhecimento, que permitiram uma avaliação mais eficiente do comportamento das soluções em protótipos e em um curto período de tempo. Um dos primeiros importantes resultados desta nova abordagem foi a criação do *Agrement Technique* francês (RESENDIZ-VAZQUEZ, 2011).

O terceiro fator cultural determinante para a dicotomia na construção de edificações é o papel historicamente reservado aos arquitetos, no processo de produção de edificações, onde cada edificação está vinculada a um projeto distinto e onde a originalidade de cada projeto é fator de sucesso e prestígio na profissão. A abordagem utilizada pelos arquitetos, privilegiando a singularidade de cada solução, em detrimento da repetitividade e dos ganhos de escala, auxiliaram a fazer da indústria de edificações uma indústria sem repetições, apropriadamente chamada uma indústria de protótipos (GALLON, 1990). Isto exige uma flexibilidade quase infinita de utilização de componentes e, principalmente, de materiais, estimulando muitas cadeias do complexo produtivo a passarem ao largo da etapa de customização, em larga escala, de componentes no processo produtivo.

Os três fatores culturais, tomados em conjunto, tornam a edificação uma singularidade, tanto como processo produtivo, quanto como produto. Eles estimulam a utilização de tecnologias já sedimentadas e adaptadas a uma dicotomia entre processos transformativos – presentes até a produção dos materiais – e processos conectivos, ao induzir a precisão e a padronização dos componentes, individualmente, através de processos transformativos altamente industrializados, enquanto permitem e até estimulam a flexibilidade na utilização dos componentes, gerando, com isso, baixos níveis de precisão e padronização nos processos conectivos. Esta flexibilidade e singularidade do processo de fabricação do produto final estão associadas a um comportamento conservador dos usuários, que é

reforçado pela cultura dos arquitetos e pela ausência de processos de avaliação e controle do produto final, gerando um grande número de manifestações patológicas nas edificações. A questão da singularidade, culturalmente tão valorizada, traz outras implicações do ponto de vista ambiental. A impossibilidade de testar-se protótipos para avaliar o desempenho do produto edificação criou uma cultura de coeficientes de segurança, que aumentam substancialmente o custo das edificações, com um consumo muito maior de material e energia na sua fabricação, além de não garantir o seu desempenho. Não se imagina que alguém construirá um protótipo de um edifício como, por exemplo, o Burj Khalifa para testá-lo.

Esta quase exigência de singularidade reforça a prática da indústria de materiais, de otimizar e padronizar seus processos e produtos, em detrimento da otimização e padronização do produto final – a edificação – como será visto a seguir.

3.6.1.2 Causas econômicas – a dinâmica do desenvolvimento tecnológico

As causas econômicas estão relacionadas com a estrutura do setor da construção, como um todo. Em primeiro lugar, surge a importância da indústria de materiais, na definição das tecnologias adotadas pela indústria de edificações. Esta importância será discutida mais abaixo, com o enfoque na hegemonia da indústria de materiais. Em segundo lugar, surge a centralidade do conceito de material, no paradigma atual. Estas duas causas estão intimamente relacionadas, porque essa centralidade surge como decorrência e, ao mesmo tempo, reforça a hegemonia mencionada. As causas econômicas são, também, duas características básicas do paradigma atual.

3.6.2 A hegemonia tecnológica da indústria de materiais

Nas causas econômicas, é preciso compreender a dinâmica do desenvolvimento tecnológico do setor, identificando quem domina o processo de desenvolvimento de novas tecnologias. Isso é importante porque a inovação tecnológica tem o potencial de estimular ou inibir a dicotomia de processos e produtos. A análise começa com a compreensão de como e porque ocorre a transição entre os processos transformativos ‘top-down’, para os processos conectivos ‘bottom-up’, no momento em que materiais são transformados em componentes. Para compreender esta situação, é necessário, primeiro, compará-la com o que ocorre em outras indústrias de transformação.

3.6.2.1 Outras indústrias de transformação

A produção de bens de maior complexidade (isto é, com muitos componentes utilizando diversas constituições e níveis hierárquicos) está baseada na existência de cadeias

produtivas, constituídas de um grande número de produtores de bens intermediários, que estão articulados para a produção do produto final. O conceito de cadeia produtiva está presente em diversos setores econômicos industriais, como o automobilístico, o aeronáutico e o eletrônico. Nestes setores, existe, claramente, uma coordenação de toda a cadeia, que é exercida pela indústria que produz ou monta o produto final (SHIN et al., 2009), também chamada de indústria líder de suas respectivas cadeias de produção. Esta hegemonia da indústria que produz o produto final parece natural, visto ser ela quem define quais características são interessantes ou importantes para o seu produto, em relação às necessidades do usuário do bem produzido. Estas indústrias se caracterizam, ainda, pela intensa industrialização, manifesta nos altos graus de mecanização e automação de processos produtivos e utilização de tecnologias de ponta (GIRMSCHEID, 2005). A coordenação do processo envolve três aspectos essenciais: o processo de decisão sobre a introdução de novas tecnologias; a customização dos componentes; e a padronização das conexões e interfaces, tanto de hardware, como de software.

O termo customização é utilizado, aqui, com o significado de adequar-se ao *customer* (cliente, em inglês). Não tem o significado de personalizar um produto, ou seja, de adequá-lo às exigências ou especificações do usuário (consumidor) final. Para este processo, este texto utiliza o termo personalização. Estes termos serão discutidos em maior profundidade no capítulo 4, pois são considerados como princípios de sustentabilidade, vinculados à ideia de eficiência.

Com relação ao primeiro aspecto, embora muito do desenvolvimento tecnológico ocorra nas indústrias de suprimentos (materiais e componentes), para a indústria líder, esta última estimula aquelas inovações que lhes interessam e coordena, juntamente com as indústrias de materiais e componentes, o processo de incorporação de inovações no seu produto final. Isto faz com que este produto final absorva o nível tecnológico dos componentes, mesmo que estes tenham sido desenvolvidos com tecnologia que não é controlada pelo fabricante do produto final. Esta absorção se expressa na sinergia entre as características da nova tecnologia e as características do produto final, como um todo. Por exemplo, um motor mais potente exige uma carenagem com desenho mais aerodinâmico, pneus com maior capacidade de tração, suspensão capaz de manter a estabilidade do carro em curvas de alta velocidade, dentre outras características. Além disto, o diferencial tecnológico é apresentado como uma característica do produto final e, não, de um componente. É o caso da incorporação de novas tecnologias, como o uso de hidrogênio, como combustível, ou a comunicação entre o painel do carro e um *tablet* ou *smartfone* (BARROS, 2011). Esta integração, que oculta o fabricante do componente ou do material é a regra geral, com

poucas exceções, que surgem quando o componente é icônico e valoriza o produto final, como, por exemplo, um chip Intel em um computador.

A customização dos materiais e componentes ocorre por demanda da indústria líder e visa, essencialmente, otimizar a eficiência do processo produtivo, a qualidade e o desempenho do produto final. Os primeiros candidatos à customização são os componentes, porque sua interação é vital para o produto final. Mas também é comum a customização de materiais, tais como adesivos e tintas, resinas plásticas e ligas metálicas, que consistem, essencialmente, em proporções específicas de determinadas matérias primas.

A padronização das conexões e interfaces visa os mesmos objetivos da customização, mas pressupõe a necessidade, ou vantagem, em manter a intercambiabilidade entre produtos de diferentes fornecedores. Esta padronização pode ser específica do setor industrial envolvido (como as bordas de contato dos pneus com o aro da roda) ou pode ser de uso universal (como o passo das roscas dos parafusos). Entretanto, a padronização não elimina a customização. Assim, os pneus são fixados em rodas customizadas, de cada fabricante, e os parafusos para a fixação das rodas têm a cabeça customizada.

A combinação de novas tecnologias, customização e padronização, permite que o produto final tenha uma relação custo/desempenho competitiva, em relação ao mercado.

3.6.2.2 O setor de construção de edificações

O setor de construção e, mais especificamente, o segmento de edificações, também é formado por diversos segmentos, que se articulam para a produção da edificação. Cada um destes segmentos forma uma cadeia de suprimentos, com uma densidade tecnológica variável, ao longo da cadeia. Entretanto, como será visto ao longo desta seção, a liderança do processo de incorporação de inovações não pertence à indústria do produto final, que é a edificação, como seria de esperar caso houvesse um paralelismo com outros setores industriais. Segundo Isatto e Formoso (2006), nenhuma indústria detém o poder, ou a habilidade, de coordenar toda a cadeia de suprimentos da indústria da construção. De fato, as características específicas desta indústria a tornam, juntamente com a indústria de materiais e de serviços para a construção, um macrocomplexo industrial, composto de várias cadeias interagindo entre si (ABIKO, 2003). Este sistema de múltiplas cadeias de suprimento fornece materiais, mão de obra e informação para a produção da edificação (IRELAND; TOWNSEND, 2006). Mas, se a coordenação do processo não pertence à indústria da edificação, como seria de esperar, é importante que seja feito um retrato desse macrocomplexo, mostrando a dinâmica de seu desenvolvimento tecnológico. Mais especificamente, é necessário descobrir como o processo de inovação tecnológica ocorre e

é incorporado ao produto final, como a customização acontece e quando ela acontece e, finalmente, qual o grau de padronização das conexões e interfaces entre os diversos componentes, elementos e subsistemas que constituem a edificação.

A análise do setor industrial da construção, apresentada a seguir, inicia-se pela verificação dos diferentes graus de industrialização, ao longo das diversas cadeias produtivas

3.6.2.3 Diferentes graus de industrialização nas cadeias produtivas

Ao observar-se os diversos segmentos que compõem as cadeias de produção da indústria da construção e comparar seus respectivos níveis de densidade tecnológica, fica evidente que existe uma enorme variabilidade no nível de industrialização entre cadeias de suprimentos (MASCARÓ; MASCARÓ, 1981). Esta variabilidade oscila desde cadeias com características totalmente artesanais, até cadeias totalmente mecanizadas e automatizadas. Em um extremo, encontram-se cadeias com sistemas de produção que remontam à antiguidade, como é o caso da produção de pedras de cantaria, que podem, até, incorporar alguns elementos de modernidade, como a perfuratriz de rochas e o uso de explosivos, mas cujo maior volume de trabalho ocorre com o uso de ferramentas manuais. No outro extremo, encontra-se a produção de componentes eletrônicos, para o controle de equipamentos eletromecânicos, ou a produção totalmente automatizada de vidros, pelo processo de flutuação (*float glass*). Entre estes dois extremos, encontra-se um vasto arco de segmentos industriais, com variados graus de industrialização, inclusive dentro de um mesmo segmento, como é o caso da indústria de componentes cerâmicos de alvenaria. Nesse caso dos produtos cerâmicos, por exemplo, podem ser encontradas, desde olarias com tecnologia defasada, baixa produtividade e qualidade inconstante, até indústrias cerâmicas de blocos, utilizando equipamentos modernos, com controle de qualidade e alta produtividade.

O macrocomplexo da construção não se submete docilmente a uma única fórmula explicativa, a ser aplicada a todos os seus segmentos. Ao contrário, cada segmento foi forjando sua estrutura econômica ao longo do tempo, com soluções que variam, de acordo com as características do material produzido, do seu valor unitário e do grau de concentração do segmento. Apesar disto, é possível identificar uma característica comum aos segmentos que apresentam maior nível de industrialização. Estes segmentos se comportam de maneira relativamente uniforme, com relação aos três aspectos encontrados em outros setores industriais: coordenação tecnológica, customização de componentes e padronização de interfaces.

Com relação à coordenação tecnológica, fica evidente que as indústrias de materiais, principalmente os segmentos oligopolizados, desenvolvem ou incorporam suas inovações tecnológicas de forma totalmente independente da indústria da construção. As empresas do segmento desenvolvem suas soluções, conduzem os procedimentos de avaliação, homologam os produtos e, uma vez concluído o processo, os oferecem às empresas de construção ou ao mercado em geral, normalmente via mídia. Ou seja, a hegemonia do processo de desenvolvimento tecnológico pertence às indústrias de materiais (AMORIM, 1995). Cabe às empresas da indústria de edificações, individualmente, aceitar ou não, as soluções. Em alguns casos, podem ser oferecidos cursos rápidos de treinamento, manuais explicativos ou outra forma de disseminar a inovação introduzida. Entretanto, jamais ocorre a interação com uma ou mais empresas da indústria de edificações, no processo de desenvolvimento, de maneira a criar uma parceria, que resultará em um produto customizado, que será incorporado por uma empresa que produz o produto final. Esta dinâmica de desenvolvimento de soluções parece ser estimulada pela grande pulverização do segmento de produção de edificações, visto que as cem maiores empresas representam 72% do total produzido pelo setor²¹, excetuando-se, ainda, a autoconstrução, confirmando a baixa concentração do setor, em relação a outras indústrias, já identificada em outros estudos (KOEDEL, 2004). Entretanto, existe já uma escala de empresa que permitiria um processo diferenciado de desenvolvimento. As maiores empresas do setor representam entre 1 e 2% da produção total do setor, com faturamento na mesma ordem de grandeza das maiores indústrias automobilísticas do país. Em 2010, por exemplo, a Gafisa e a GMBrazil tiveram, respectivamente, faturamentos de R\$ 3,7 bilhões (GAFISA, 2011) e de R\$ 18,5 bilhões (AUTOMOTIVE BUSINESS, 2011).

Com relação à customização, é interessante separar o tratamento dado a materiais de construção daquele dado a componentes (considera-se, aqui, material de construção como um dos produtos intermediários da indústria da construção, conforme foi definido no item 2.2.2.2). A indústria de materiais normalmente define os padrões de seus produtos em processo decisório independente da indústria de edificações, tanto em relação à forma, quanto à função e à constituição. Em relação à forma, os materiais são fornecidos em um padrão de tamanhos pré-definidos pela indústria. Assim, os tubos de PVC são fornecidos em barras de 6 m; os vergalhões de aço, em barras de 12 m; os vidros, em chapas de 3,21m x 2,20 m ou 2,40 m; os perfis de alumínio, em barras de 6 m, e assim sucessivamente. Em relação à função, os materiais são caracteristicamente

²¹ O cálculo do percentual foi feito com base na produção das maiores empresas de construção (ITCNET, 2011), o valor do CUB (CBIC, 2011) e o faturamento total das empresas de construção de edificações (IBGE, 2008).

monofuncionais. Ou seja, um perfil de alumínio serve exclusivamente para uma determinada linha de janelas; um vergalhão serve exclusivamente para fazer armaduras de concreto armado, e assim sucessivamente. Atualmente, alguns materiais começam a agregar outras funções. Assim, surgiu o vidro autolimpante (PILKINGTON, 2012) e alguns materiais (ainda em fase experimental) têm a capacidade de absorver calor, na forma de calor latente de fusão, mas são casos raros. Surgem, também, os materiais compostos, que podem incorporar mais funções, com mais facilidade; mas, a grande maioria dos materiais utilizados na construção, permanece monofuncional e são fornecidos desta maneira, sem variações. A monofuncionalidade, por sua vez, é derivada da outra característica dos materiais do paradigma atual: sua homogeneidade constitucional. Os materiais são homogêneos e esta homogeneidade é definida nas indústrias de materiais, sem alterações em função dos clientes. Algumas exceções podem ser encontradas na indústria de tintas; mas a customização, neste caso, não foi uma exigência da indústria de edificações, mas uma estratégia mercadológica das indústrias de tintas e atende, indiscriminadamente, todos os consumidores, grandes ou pequenos.

Com relação às interfaces e conexões, existem duas situações distintas, onde ocorre uma padronização. A primeira situação é aquela em que cada empresa preocupa-se, exclusivamente, com as interfaces e conexões entre os materiais e componentes que ela mesma produz, como é o caso dos perfis de alumínio, onde a indústria desenvolve soluções específicas, que permitem o encaixe dimensional perfeito e o desempenho funcional sinérgico entre as partes. Também este é o caso das peças pré-moldadas de concreto, para a produção de pavilhões, e de telhas de cerâmica vermelha. A segunda situação é aquela em que o segmento industrial, de um determinado material, preocupa-se com as interfaces e conexões de sua indústria, como é o caso das conexões de PVC e dos componentes elétricos. Entretanto, no caso mais geral, as empresas não têm nenhuma preocupação, com qualquer tipo de padronização das interfaces e conexões entre materiais e componentes de sua empresa, segmento industrial ou de seus produtos, com aqueles de outros segmentos. Neste caso mais geral, as peças são coladas com a cola universal da construção - o cimento - extremamente barato e eficiente na adesão de componentes minerais, ou são pregadas ou parafusadas. Entretanto, esta falta de padronização de interfaces gera um grande número de problemas de construtibilidade, que vão se refletir em problemas de qualidade e de manutenção, além de problemas de resíduos causados por adaptações pontuais, como já foi mencionado. Em qualquer dos casos apresentados, a padronização das interfaces não é definida em conjunto com uma empresa (e, nem mesmo, com o segmento) de construção. Ela é decidida, unilateralmente, pela indústria de materiais e

segue a lógica da otimização das relações de custo/benefício, de cada empresa, desta indústria.

3.6.2.4 A metabolização dos materiais de construção

A indústria da edificação não pode utilizar diretamente muitos dos materiais de construção, devido à falta de customização de forma, constituição e função, bem como da ausência de soluções de interface entre elementos de diferentes fabricantes. Por isso, faz-se necessário aplicar, sobre os materiais adquiridos, processos transformativos (corte, moldagem, etc.) e conectivos (montagem), para a obtenção de componentes, que serão utilizados na edificação. A estratégia geral adotada pela indústria de materiais consiste em estimular o surgimento de processadores intermediários, entre ela e a indústria de edificações. Estes processadores intermediários podem ser terceiros, como no caso da indústria de esquadrias, ou podem ser subempreiteiros, como no caso das empresas de execução de tubulações hidrossanitárias (AMORIM, 1995). Estas empresas (terceirizados e subempreiteiros) formam um segmento intermediário, de baixa tecnologia e de baixa intensidade de capital, entre a indústria de materiais e a indústria da edificação, fazendo com que esta última não aumente a demanda por customização para os produtos da primeira. A função precípua deste segmento intermediário é metabolizar os materiais oferecidos pela indústria de materiais e entregá-los, na forma de componentes ou semicomponentes, para a indústria da construção. Para que isto aconteça, todas as questões formais e funcionais de emprego dos materiais são previamente resolvidas pela indústria de materiais. Ou seja, a indústria de materiais incorpora funções e características formais em seus produtos, que facilitam sua posterior componentização. Assim, a indústria de perfis de alumínio para esquadrias, por exemplo, desenvolve todas as soluções de encaixe e ajuste, de maneira que é necessário para a indústria de esquadrias, que vai utilizá-los, munir-se apenas de um arco de serra e uma chave de fenda, para produzir uma janela de alumínio. Uma janela de PVC requer um pouco mais de investimento para a colagem das peças; porém, ainda um investimento extremamente baixo e uma tecnologia totalmente definida pelo fabricante dos perfis de PVC. O resultado desta estratégia são componentes produzidos de forma artesanal, apresentando uma perda grande de qualidade, em relação aos materiais que são empregados na sua manufatura, além de uma alta geração de resíduos. Assim, embora um perfil de alumínio tenha precisão de décimo de milímetro, uma janela pode aceitar erros de até um centímetro, além de problemas de esquadro. Tanto é assim, que a prática usual dos fabricantes de esquadrias é exigir das construtoras um vão na parede que seja, ao menos, 3 cm maior, em cada dimensão, que a esquadria que será instalada. Este procedimento deve-se, em parte, certamente, porque existem imprecisões na execução de paredes, mas, em parte, porque pretende-se evitar a

perda de esquadrias que estejam alguns milímetros fora das dimensões estipuladas. Por outro lado, os segmentos de materiais com baixa tecnologia incorporada (olarias e madeireiras, por exemplo), produzem materiais e componentes de qualidade muito variável e baixa confiabilidade. Além disto, não incorporam soluções de componentização em seus produtos. As olarias permitem que as indústrias de edificação desenvolvam suas tecnologias de aplicação, enquanto as madeireiras fornecem seus produtos sem, praticamente, nenhuma tecnologia incorporada, exceto quando produzem componentes mais sofisticados, como portas sanduíche laminadas.

Em alguns casos, quando o material tem baixo valor agregado, a própria indústria produtora do material pode criar um setor interno, que transforma os materiais em componentes, absorvendo, gradativamente, esta função. Este é o caso da indústria de vergalhões de aço: primeiro, foram produzidas as telas soldadas, que agregaram valor ao vergalhão que era utilizado para fazer as armaduras das lajes; depois, as barras passaram a ser cortadas e dobradas, de acordo com o projeto do cliente, para a execução de pilares e vigas. Esta foi a primeira indústria que customizou completamente os materiais (exceto pela bitola e constituição). Algumas indústrias de vidros fornecem o comprimento de acordo com o pedido do cliente, caso exista um grande volume a ser atendido, mas estes casos são raros. A maioria das empresas fornece medidas padronizadas. Entretanto, nenhuma medida específica para um cliente da construção é comparável ao grau de customização dos componentes que esta mesma indústria (Pilkington, por exemplo) fornece para outras indústrias, como a automobilística, onde a peça de vidro é entregue cortada na dimensão e forma finais, laminada e pintada, ou seja, um componente pronto.

O mesmo processo de metabolização ocorre, também, em relação aos componentes produzidos pelas indústrias de diversas cadeias de suprimentos. Dentre estas, podem ser citadas as indústrias de: materiais elétricos, que fornecem componentes desenvolvidos de forma independente da indústria de edificações e cuja característica também é a fácil aplicação; metais e louças hidrossanitários; condicionadores de ar, que demandam um pouco mais de treinamento, mas cuja tendência é a simplificação da aplicação, via integração de todos os componentes em pacotes completos; e metais de portas. A única exceção a esta situação é a instalação de elevadores, executada sob coordenação direta da própria indústria fabricante e cuja relação com a indústria de edificações será discutida mais adiante.

3.6.2.5 A indústria de edificações como polo passivo de tecnologia

A autossuficiência tecnológica das indústrias de materiais de construção, delegando às empresas do setor intermediário a tarefa de metabolizar os materiais por elas produzidos,

faz com que os processos transformativos avancem, até mesmo, para dentro da indústria de edificações, cujas tecnologias são adaptadas às condições impostas por aquelas indústrias de materiais. Ou seja, a indústria de edificações desenvolve os projetos utilizando as definições relativas à forma, constituição e função que são, cada vez mais, fornecidas pelas indústrias de materiais (BENDER, 1976). Neste processo, a adequação dimensional e funcional dos materiais, às soluções específicas de cada projeto, dá lugar a uma prática de recortar e adaptar, universal no processo construtivo, gerando os desperdícios, que são resíduos de produção gerados longe do local onde os materiais são produzidos e que devem ser descartados, ocasionando aumento de custos e queda da produtividade na construção, além da baixa qualidade endêmica do setor. Além da necessidade de adaptação de forma e função, a indústria de edificações deve adaptar os materiais e componentes, uns aos outros, porque, em geral, não existe uma coordenação entre os diversos segmentos, no que tange à conectividade dos componentes e elementos. Esta falta de coordenação ocorre, até mesmo, em situações onde a conexão entre componentes é óbvia e inevitável, como a ligação entre fechadura e folha da porta. Mesmo em casos assim, o único processo disponível à indústria de edificações é uma rudimentar escultura na folha da porta, para permitir o encaixe da fechadura. Isto ocorre porque cada empresa de fechaduras desenvolve seus desenhos específicos, sem padronização da interface com a folha da porta. Caso houvesse esta interface, um processo industrial automatizado poderia criar, em cada folha de porta, na fábrica que as produz, todos os recessos necessários à instalação da fechadura. Como foi visto acima, este quadro precário, em relação à padronização de interfaces, só é alterado em algumas situações, quando os componentes são produzidos por uma mesma empresa ou, até mesmo, por um mesmo segmento. Contudo, mesmo nos casos em que cada empresa resolve internamente as questões tecnológicas de aplicação de seus materiais, como o caso da indústria de perfis de alumínio, as soluções adotadas não permitem alterações ou adaptações que possam ser utilizadas apenas por uma única empresa da indústria de edificações. Em outros casos, como na indústria de tubulações de PVC, foram desenvolvidos diversos padrões que facilitaram as conexões de seus produtos e tornaram os componentes intercambiáveis. Mas, novamente, é um projeto hermético, sem a participação da indústria de edificações. De modo geral, as indústrias de materiais, com um alto grau de tecnologia agregado aos seus processos e produtos, apresentam soluções coordenadas, de forma a permitir que os materiais e componentes produzidos por elas apresentem o grau de padronização que deveria estar presente no processo de produção de edificações, mas que, na condição do paradigma atual, está restrito a ilhas formadas por empresas individuais, como no caso da indústria de perfis de alumínio, ou a ilhas formadas por segmentos, como nos casos das indústrias de vergalhões de aço, de tubulações de PVC e de fios e cabos elétricos. Nesta situação, a

indústria de edificações é apenas uma observadora passiva do processo (GRADVOHL et al., 2011), não conseguindo coordenar as atividades dos participantes das cadeias de suprimentos, em grande parte devido a uma falta de metas comuns, prevalência de interesses individuais, relutância e oportunismo (VRIJHOEF; KOSKELA, 2000). Nas indústrias com baixa densidade tecnológica, como a indústria de componentes de cerâmica vermelha, o caos está instalado em relação à conectividade entre componentes (com a exceção de blocos cerâmicos, que requerem mais tecnologia). Nesta indústria, apesar da norma NBR-8041 (ABNT, 1983), que trata das dimensões e tolerâncias dos tijolos, cada olaria inventa suas dimensões, a qualidade dos materiais oscila bastante e as tolerâncias são compensadas na argamassa de assentamento. Finalmente, cabe citar o caso, talvez único, de interação direta entre a indústria de um subsistema e a indústria de edificações. É o caso da indústria de elevadores. Neste caso, a indústria de elevadores impõe à indústria de edificações um projeto extremamente rígido, acompanhado de um caderno de encargos, que a indústria de edificações deve atender rigorosamente, sob pena de não ver instalado o elevador que adquiriu. Neste caso, é possível observar a distância que existe entre a precisão dimensional da indústria mecânica e da indústria civil. Em uma situação normal de outras indústrias de transformação, as tolerâncias seriam negociadas entre as partes e a indústria do produto final (neste caso, a edificação) exigiria da indústria de componentes uma precisão dimensional, que fosse adequada ao seu processo de produção e fosse compatível com a precisão de outros componentes. Entretanto, neste caso é a indústria de elevadores que se autodetermina e define qual a precisão de seus produtos e, mais, determina qual a precisão que deve ser encontrada por ela, no poço do elevador, que ela deverá instalar. Uma situação semelhante, mas não tão dramática é encontrada na instalação de esquadrias, já mencionada, onde a indústria de esquadrias determina qual a folga que deverá ser deixada, pela construtora, no vão onde deverá ser instalada a esquadria. Novamente, nestes casos se observa o papel passivo que é reservado à indústria de edificações.

3.6.3 A centralidade do conceito de material

As características apresentadas até aqui – dicotomia da indústria de edificações e hegemonia da indústria de materiais – concorrem para afirmar uma última característica deste paradigma, essencial na sua estruturação: a centralidade do conceito de material de construção. Esta centralidade deriva de dois fatos: primeiro, os materiais são o produto da indústria que controla o desenvolvimento tecnológico do setor da construção, tanto em direção, quanto em velocidade. Consequentemente, os segmentos das cadeias produtivas antes, e, principalmente, depois desta indústria, adéquam seus produtos e processos em função do que ela define em termos tecnológicos; segundo, o conceito de material e, no

caso específico da engenharia civil, o material de construção, como ele é definido atualmente, contribui para a definição das atribuições, dos conhecimentos e da prática dos profissionais envolvidos no processo construtivo, desde os trabalhadores das indústrias de matérias primas, em uma ponta, até arquitetos e engenheiros civis, na outra. Isto significa que o conceito de material ajuda a definir o que é conhecimento neste setor, ou seja, ajuda a definir a realidade – ou a visão da realidade – que a comunidade do setor compartilha.

A análise destes dois fatos exige, em primeiro lugar, que o conceito de material de construção seja definido com uma precisão maior do que a que foi colocada até aqui neste texto e do que, normalmente, é encontrado em textos desta área de conhecimento. Esta definição deve permitir compreender toda a extensão de seu significado, no paradigma atual.

3.6.3.1 O conceito de material, como ideologia

Neste texto, dizer que o conceito de material é ideologia significa interpretá-lo segundo a ideia marxista de ideologia, conforme definido em 3.1. Ou seja, extrair o significado de material, conforme ele existe dentro do paradigma atual. Neste processo interpretativo, é interessante utilizar a perspectiva de Gramsci, em relação aos conceitos e sua utilização dentro da cultura. Ele chama os conceitos que são formados historicamente, dentro de uma classe hegemônica, como conceitos organicamente organizados. Estes mesmos conceitos são absorvidos por outras classes não hegemônicas, de maneira fragmentada e, muitas vezes, contraditória. Estes conceitos, assim absorvidos em um processo histórico, são chamados senso comum. A diferença entre a utilização dos conceitos dentro da classe hegemônica e as outras classes é a correlação entre o conceito e a prática, que deveria utilizá-lo. Na classe hegemônica, não existe contradição entre teoria e prática, enquanto, nas outras classes, esta contradição ocorre, sem que seja percebida por aqueles que utilizam os conceitos desta forma fragmentada (GRAMSCI, 1985).

Tanto a formação dos conceitos, quanto sua utilização, não podem ser compreendidas de uma maneira maniqueísta ou conspiratória. Elas surgem da necessidade de uma base teórica para a prática de uma determinada coletividade. À medida que um determinado grupo, dentro desta coletividade, torna-se hegemônico, os conceitos são gradualmente adaptados para tornarem-se compatíveis com sua prática. Portanto, é preciso compreender, inicialmente, como o conceito de material foi elaborado, ao longo do tempo, até adquirir o significado que hoje possui.

A existência dos materiais se justifica como resultado de uma evolução histórica, que se iniciou quando as comunidades humanas não possuíam tecnologias, nem para

compreender e avaliar todos os modos possíveis de organização da matéria, nem para estruturar a matéria de outras maneiras que não aquelas obtidas de corpos naturais. Mais especificamente, a organização da matéria em vários níveis hierárquicos, a partir do nível atômico, não estava no horizonte tecnológico destas comunidades. Os seus construtores podiam produzir suas soluções, em processos *bottom up*, somente a partir do nível macroscópico, de manipulação, no sentido mais literal, e precisavam chegar a este nível utilizando a constituição (isto é, substâncias e estrutura interna) de corpos naturais, tais como pedras, árvores, palha e terra, encontrando formas e funções que fossem compatíveis com eles (ASHBY; JOHNSON, 2011). Esta evolução consolidou um processo construtivo que estimulou, sob todos os aspectos, a utilização de corpos com constituição definida e conhecida. A evidente facilidade com que estes corpos eram identificados, de acordo com sua constituição, estimulou as diferentes culturas a estipular e consagrar usos específicos para os corpos com determinadas constituições, definindo as formas e as funções, de acordo com as possibilidades destas constituições. Vitruvius, por exemplo, menciona diversos materiais: argila, areia, cal, pozolana, pedra e madeira (VITRUVIUS, 2006), caracterizando-os e mostrando os usos e limitações de cada um. É evidente seu esforço em explicar as causas do comportamento destes materiais, a partir do paradigma dos quatro elementos (terra, fogo, ar e água), mostrando que, no século I antes de Cristo, já havia uma preocupação para dar um embasamento teórico às atividades de construção, ao associar a manipulação da matéria, que era extremamente limitada, com os processos que ocorriam no interior dos corpos. No seu livro *De Architectura*, ele chega a propor algumas misturas e materiais compósitos, como o *stucco*, mas a limitação tecnológica da época fez com que as soluções fossem baseadas, essencialmente, na manipulação macroscópica das matérias primas, obtidas, basicamente, de fontes naturais, embora reações químicas, como a obtenção de cal e a reação cal-pozolana, estivessem em seu receituário (VITRUVIUS, 2006).

Assim, a pedra trabalhada (faceada), por exemplo, material mais nobre, era normalmente reservado aos edifícios mais importantes das diversas culturas, tais como a egípcia, grega e romana. Esta quase exclusividade devia-se à dificuldade de trabalhar este material, exigindo ferramentas adequadas e mão de obra especializada e em grande volume, para trabalhar por longos períodos. Todos estes fatores encareciam e tornavam as construções em pedra inacessíveis à maioria da população. Por isso, tais construções eram templos, palácios, fortificações e túmulos. Ela poderia ser utilizada, estruturalmente, apenas nos elementos verticais (pilares), enquanto a madeira poderia ser utilizada, também, como elemento estrutural horizontal, na construção de telhados. Por outro lado, a madeira sofria severas limitações, como elemento de fundação, enquanto a pedra respondia excepcionalmente

bem a esta função. Evidentemente, em várias circunstâncias, o gênio humano e a necessidade de soluções desprezaram estas regras gerais. Templos egípcios, gregos e romanos utilizavam vigas de pedra de grande altura para vencer pequenos vãos no telhado e, como verga, enquanto fundações de madeira eram utilizadas em edificações, em várias partes do mundo, inclusive na Europa (KLAASSEN et al, 2005), na antiga Roma (VITRUVIUS, 2006) e na Índia. Os arcos foram um avanço significativo obtido pelos romanos, porque permitiram o uso de pedra e tijolos para vencer vãos maiores, sem os problemas de decaimento da madeira, mostrando que a interação entre constituição e forma poderia gerar resultados que somente a constituição não proporcionava. Entretanto, se a forma podia ser alterada, para compatibilizar-se com a função dos diversos componentes, o mesmo não ocorria com a constituição dos corpos. Consequentemente, a cultura da construção aprendeu a dissociar a constituição de uma forma específica. Assim, a pedra era cortada da pedreira e poderia assumir infinitas formas, compatíveis com a função dos componentes e com a constituição da pedra utilizada. O ápice desta dissociação talvez tenha sido, na Europa, o período gótico das catedrais europeias (figura 21a); no sudeste asiático, os templos budistas, como o Angkor Wat (figura 21b) e na América, os templos Astecas e Maias (figura 21c).

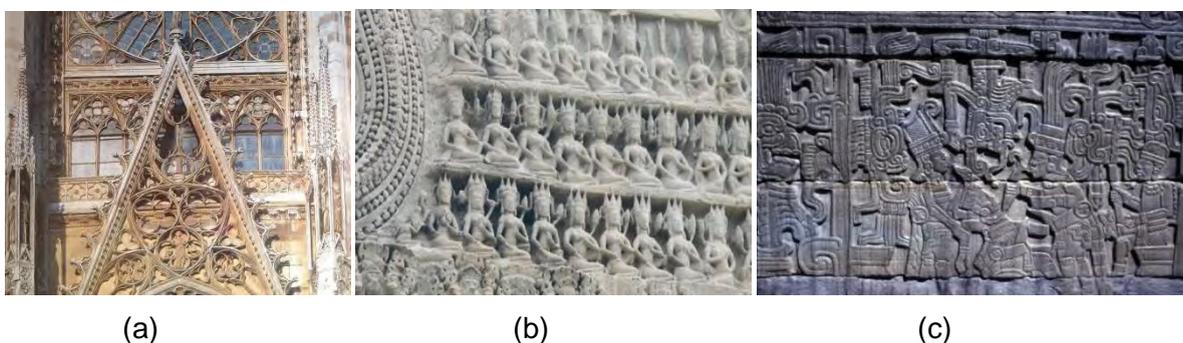


Figura 21: Uso de pedra, em diversos templos. (a) - fachada da catedral de Notre-Dame, de Rouen (Fonte: OUDOIRE, 1998); (b) - detalhe do templo Angkor Wat (Fonte: UNESCO, 2012);(c) - mural do templo de El Tajin (Fonte: ALETO, T., 2007).

Mas se a tecnologia mais rudimentar obrigava a retenção da constituição natural dos corpos utilizados nas edificações, a evolução tecnológica permitiu, a seguir, a produção de corpos com constituição artificial, tais como ligas metálicas, cristais e cerâmicas e, por fim, concreto. Entretanto, a cultura já havia consolidado o hábito de associar a constituição característica de um determinado corpo (madeira, granito, bronze, aço) a uma definição de material. Este hábito foi reforçado com a crescente importância de mestres construtores e, posteriormente, de arquitetos, que, em diversas civilizações, versaram sobre as características dos materiais. Este enfoque, que foi culturalmente constituído ao longo da história, permanece até hoje. Um dos atuais expoentes do estudo de materiais, Ashby, os

entende como a substância da qual os corpos são feitos. Mas a sua noção é traída, quando ele relaciona espumas e fibras como materiais configurados (ASHBY; JOHNSON, 2011). A espuma refere-se à estrutura interna de um corpo, enquanto a fibra refere-se à sua forma. E, de fato, como já foi visto em 2.3 e será novamente visto mais adiante em maior detalhe, todos os materiais apresentam, necessariamente, estrutura interna e forma.

3.6.3.2 O material, como um ente abstrato universal

No paradigma atual, o conceito de material pode ser expresso como a matéria sem forma e sem função. Ou seja, o conceito de material tende a expressar somente a constituição dos corpos. Idealmente, materiais seriam homogêneos (ISAIA, 2007) e isotrópicos (HOHENEMSER; PRAGER, 1932). Este conceito de material pode ser considerado como referindo-se a um ente abstrato universal. Abstrato, porque evidentemente não existem corpos sem forma, absolutamente homogêneos e isotrópicos. Universal, porque o conceito de material faz referência a um conjunto de características, que deveriam estar presentes no universo de corpos que recebessem aquela denominação. O conceito de madeira, por exemplo, não se refere a nenhuma espécie vegetal específica, nem às condições físicas do corpo (densidade, cor, umidade), nem traz informações sobre o uso; ou seja, sobre as funções possíveis daquele corpo, tais como estrutura, vedação, piso, isolamento e outras. A madeira, como abstrato universal, não existe como um corpo físico, mas como um conceito, que expressa algumas características genéricas de constituição, isto é, de substância e estrutura interna.

Embora o conceito de material de construção pareça natural e inevitável, para alguém imerso no paradigma atual – alguém que participa da comunidade de pensamento mencionada por Fleck –, ele é, na verdade, a parte central de uma solução específica, de um caso particular do caso mais geral de produção de edificações, descrito no capítulo 2. Dito de outra forma, materiais de construção não precisariam existir para que edifícios fossem construídos. Mas, no paradigma atual, sua existência determina como os edifícios são construídos e como eles são constituídos. Para quem está imerso no paradigma, esta é a única possibilidade tecnológica, tomando o caso específico como caso geral.

O conceito de material como um abstrato universal, sem forma e sem função, define as possibilidades e as limitações que cobrem todo o arco de indústrias, atividades e conhecimentos, que formam o complexo industrial que é o setor da construção. Dizer que o conceito de material é parte da ideologia forjada historicamente pela indústria da construção significa dizer que, de fato, todo o material, entendido aqui conforme a definição do item 3.4.2.2., possui uma forma e uma função associadas à sua constituição, embora a constituição seja a única característica que parece ser consensual.

Para expor o caráter ideológico do conceito de material e comprovar a afirmativa acima, é necessário definir, com clareza, a correlação entre os conceitos de material, forma, função e constituição.

3.6.3.3 Relações entre os conceitos de material, forma, função e constituição

No capítulo sobre a definição de material de construção, foram feitas duas proposições: a primeira afirmando a importância dos materiais, o que será visto ao longo deste tópico; e a segunda, afirmando a necessidade de conceituar-se material, como tendo constituição, forma e função. Naquele momento, solicitou-se ao leitor que aceitasse as proposições *prima face*, para uma posterior prova das mesmas. Esta prova é apresentada agora. Para a demonstração daquelas assertivas, cinco proposições serão formuladas, relativas às relações entre os conceitos de material, componente, forma e função. Os conceitos serão investigados a partir da análise de alguns exemplos, em diversas escalas dimensionais²².

Primeira proposição: O conceito de material é forma-dependente, ou seja, um material somente se caracteriza como tal após atingir uma forma que seja compatível com sua utilização. Na ausência desta forma, o material deixa de ser reconhecido como tal e, portanto, de existir.

Essa primeira proposição refere-se à relação entre material e forma. Embora já se tenha mencionado que todos os materiais têm forma, é necessário demonstrar que a noção comum intuitiva, de que os materiais são definidos independentemente da forma que assumem, ou seja, considerar-se que o material não está relacionado a uma forma específica, podendo assumir inúmeras formas, de acordo com a necessidade, é uma noção falsa, ideologicamente formada. Esta noção tornou-se um hábito mental, especialmente entre os engenheiros, tornando-se cotidiano o uso do conceito com esta conotação.

Considere-se uma árvore, como exemplo. Ela, definitivamente, não seria considerada como um material de construção em circunstâncias normais. Por definição, uma árvore não tem utilidade direta em uma edificação. Entretanto, se a árvore for cortada em tábuas, a madeira destas tábuas estará constituindo um material de construção. A madeira já existia na árvore e este é o motivo da utilização da própria árvore. Alguém poderia argumentar que a árvore,

²² Normalmente, as escalas de estudo de materiais são referidas como: macro (de objetos diretamente manipuláveis, situados na ordem de grandeza do metro); meso (de objetos no limite da observação, normalmente manipuláveis somente com o auxílio de equipamentos, exceto quando o são em grande número e não individualmente, situados na ordem de grandeza do milímetro); micro (de objetos que não podem ser observados ou manipulados diretamente, situados na ordem de grandeza do micrometro); e nano (de objetos no limite da manipulação e da observação com equipamentos sofisticados, situados na ordem de grandeza do nanômetro) (TEAGHE, 1999).

ao ser submetida a um processo de corte, sofreu uma alteração e que o material é consequência deste processo sobre a árvore. É absolutamente verdade, mas o corte teve a finalidade de alterar apenas a forma em que a madeira da árvore se apresentava (alteração da forma de tronco, para a forma de tábua), sem alterar a constituição do material, em si. Então, alterando-se a forma de um corpo, o mesmo passa a ser um material de construção, porque aquela forma lhe empresta funcionalidade. Isso também pode ser observado, tomando-se um penedo como exemplo. Em sua forma natural, não é um material de construção. Entretanto, moído em pequenos pedaços irregulares, passa a ser brita, um material de construção. Nada foi alterado nas características das substâncias ou da estrutura interna que constituíam o penedo, e que agora formam a brita, exceto a forma. Novamente, a forma obtida com a moagem empresta funcionalidade ao corpo, que antes não era utilizável, em funções de material de construção.

Com base nos exemplos acima, fica demonstrada a primeira proposição. Em alguns casos, a forma de utilização pode já estar presente no corpo natural, como é o caso da areia, mas, na maioria dos casos, o corpo natural deve sofrer transformações de forma, para ser identificado como um material. Evidentemente, muitas vezes a constituição original do corpo natural também deve sofrer transformações para que um material seja obtido, mas ele sempre deve ter uma forma que seja compatível com sua utilização.

Segunda proposição: o conceito de material é função-dependente, ou seja, um material é identificado como tal quando lhe é designada função que delimita seu modo de utilização.

A maioria dos materiais de construção vem sendo utilizada há décadas (p. ex. o gesso acartonado e os perfis de alumínio); séculos (p. ex. os perfis de aço e o vidro plano), ou mesmo milênios (p. ex. as pedras de cantaria e os tijolos de argila queimada). Essa existência histórica dificulta a percepção de que tais materiais necessitam ter sua função definida para serem considerados com tal. Isto é, a identificação desses e de outros materiais, com sua utilidade, tornou-se automática e a percepção da necessidade de definição da função passou a ser desnecessária. Entretanto, a função do material está sempre presente e necessita ser caracterizada, para que o corpo seja identificado como um material. Para demonstrar esta afirmativa, é necessário observar o processo que ocorre com um material definido recentemente. Tal é o caso da microssílica (sílica ativa), classificado como um material pozolânico (SILVA, 2007). Este material de construção entra na categoria dos materiais cimentícios suplementares (HOLLAND, 2005), comumente chamados de aditivos para o concreto. Embora a substância sílica amorfa fosse reconhecida como promotora do aumento da resistência do concreto, já em 1944, através de um pedido de patente de James W. Sharp e, mais tarde, através de estudos de C. J. Bernhard, em 1952

(FIDJESTØL; DÅSTØL, 2005), o material microssilica foi o resultado combinado de duas circunstâncias: primeiro, a necessidade de coletar as partículas de sílica, que eram liberadas no processo de produção de silício; segundo, o desenvolvimento de superplastificantes, na década de 1980 (HOLLAND, 2005). O estudo da microssilica, como material de construção, teve um crescimento exponencial da década de 1980 em diante. A partir do corpo de conhecimentos gerados, foi possível definir, ou mais precisamente, criar a função de aditivo que a microssilica desempenha. O verbo criar é utilizado com propriedade, porque na criação da função foram definidos procedimentos, dosagens, limites, tolerâncias, desempenho esperado e todas as outras especificações, que caracterizaram o uso do material, bem como suas características físicas de constituição e forma, embora estas não sejam alteradas no processo de obtenção e uso da microssilica. De fato, o que ocorreu foi a criação de uma função para um resíduo industrial. A partir deste momento estava completamente caracterizado o material de construção.

Terceira proposição: Alterar a escala da estrutura interna do material modifica as suas propriedades. Portanto, cada escala pode representar um material diferente.

Considere-se um material como a madeira. Na escala macro, uma porta formada por peças de madeira maciça, coladas entre si, será considerada como constituída por dois materiais: madeira (material principal) e cola (material auxiliar de conexão). Entretanto, a mesma madeira transforma-se em outro material, já na escala mesoscópica. Por exemplo, a madeira compensada ou laminada, também constituída de madeira e cola, é considerada um material diferente da madeira maciça. Deste modo, uma porta feita de partes de madeira laminada colada é considerada como sendo feita de um material distinto da madeira maciça. Com mais convicção ainda, uma porta feita com uma lâmina de MDF é considerada como sendo executada com um material totalmente distinto da madeira maciça, embora tenha havido, do mesmo modo que nos exemplos anteriores, apenas o acréscimo de uma cola às fibras da madeira. Entretanto, como a madeira foi decomposta em partes muito menores do que aquelas que compõem a porta de madeira maciça, uma lâmina de MDF apresenta características e, conseqüentemente, propriedades distintas daquelas da madeira cortada em grandes peças. Dentre estas características, podem ser mencionadas as seguintes: visualmente, o MDF tem uma coloração completamente homogênea, sem os veios e nós característicos da madeira; ele é menos suscetível ao ataque de cupins; pode ser obtido em lâminas de grandes dimensões; não apresenta os problemas de stress das madeiras laminadas, decorrente de corte e secagem; não apresenta deformação e não descola lâminas; entretanto, é mais sensível à degradação física por umidade, que a madeira maciça. Do ponto de vista funcional, ele é um material com um isotropismo muito mais

acentuado que aquele da madeira; maior, inclusive, que o das lâminas de madeira compensada. Esta série de características torna o MDF um material distinto da madeira, e esta diferenciação ocorre em função de um rearranjo das partículas de madeira e cola no nível meso, ou seja, uma alteração na estrutura interna do material. Entretanto, em todos os casos, as constituições dos materiais originais utilizados foram as mesmas: madeira e cola. A única alteração ocorrida relaciona-se à forma das partes de madeira e da proporção entre madeira e cola, embora esta última alteração possa ser questionada, visto que na porta com partes de madeira maciça, teoricamente é possível utilizar tanta cola quanto no MDF.

Outro exemplo é o concreto. Imagine-se que alguém fabrique uma laje maciça de concreto, utilizando um determinado traço. Se outra laje, de seção alveolar²³, for executada com o mesmo traço de concreto, provavelmente todos concordarão que o material é o mesmo, apenas a forma foi alterada. Considere-se, agora, que o mesmo traço seja utilizado para a produção de concreto celular. Embora seja feito com as mesmas matérias-primas dos concretos anteriores, a formação de grande quantidade de minúsculos alvéolos (ou células) altera suas características, as quais lhe emprestam propriedades distintas, tais como baixa densidade, baixa resistência, baixa condutibilidade térmica e acústica. Além disto, essas características permitem que estes concretos sejam manipulados e trabalhados de forma distinta do concreto convencional. Neste caso, todos tratarão, com razão, o concreto celular como um material distinto. Na verdade, assim como na madeira transformada em MDF, a constituição do material não foi alterada, apenas a sua forma. É possível, ainda, fazer com que o volume de vazios, na laje alveolar, em relação ao volume total da laje, seja idêntico àquele da laje de concreto celular, mas diferente – evidentemente – do volume da laje maciça. Isto significa que a definição de material, de fato, depende da sua estrutura interna, como havia sido proposto anteriormente, não sendo independente dela, como é comumente assumido.

Quarta proposição: Alterar a geometria e/ou a escala da forma modifica o modo de utilização do material e, portanto, a sua funcionalidade. Cada escala na forma pode representar um material diferente.

Inicialmente, deve ser chamada a atenção para o fato de que a proposição menciona as duas características essenciais da forma - geometria e escala - e afirma que a alteração de apenas uma delas já é suficiente para a diferenciação de materiais que compartilham da mesma constituição.

²³ Laje com alvéolos no sentido longitudinal, com perfil característico de lajes pré-moldadas.

Para comprovar esta proposição, três exemplos serão suficientes. Em cada um dos exemplos, serão referidos materiais cuja constituição deve se manter inalterada, em todas as situações referidas. Os chamados materiais naturais, como rocha e madeira, têm suas constituições mantidas (exceto pela variação no percentual de água), desde sua extração. Outros materiais, como tubos e lâminas de alumínio, têm sua constituição alterada, enquanto ainda são classificados como matérias primas, mas esta constituição deve permanecer inalterada, enquanto são classificados como materiais.

Primeiro, com relação à geometria da forma, imagine-se um penedo de granito. Este penedo, ao ser extraído do maciço rochoso onde se encontra, será dividido, para que sua utilidade como material de construção seja manifesta. A divisão do penedo pode ser feita com a utilização de diversas tecnologias, tais como detonação, moagem, corte manual e corte mecânico. Cada tecnologia permitirá a obtenção de diferentes corpos de rocha, com diferentes formas. Assim, o corte manual é ideal para a obtenção de pedras de cantaria, cujas dimensões variam, de um lado, dentro dos limites ergonômicos, isto é, limitação de peso e volume que tornam as pedras passíveis de serem manipuladas pelos operários e, de outro lado, dentro dos limites de praticidade e economia, visto que quanto menores as pedras, menor a produtividade e maior o custo. Da mesma maneira, a moagem produz pedra britada de diversos tamanhos, que, normalmente, podem ser utilizadas como brita ou pó de pedra. Finalmente, o corte mecânico produz peças fatiadas planas bidimensionais, cuja principal utilidade é o revestimento de alvenarias e pisos. Esta breve descrição demonstra que, de um mesmo corpo natural, extrai-se matéria prima para a produção de diversos materiais de construção, cujas composições são, obviamente, as mesmas. A única variação ocorreu com geometria da forma.

Segundo, com relação à escala da forma. Considere-se um maciço de basalto, cuja extração ocorre por detonação. Os blocos extraídos são irregulares e, para facilidade de exposição do argumento, imagine-se que não existe variação de geometria nos corpos resultantes do mesmo processo tecnológico. Considere-se, ainda, que este processo tecnológico é a moagem dos corpos extraídos do maciço. Esta moagem produzirá corpos cujos diâmetros médios estarão em três escalas distintas: 1 dm, 1 cm e 1 mm. Na escala do decímetro, os corpos podem ser utilizados como pedra de assentamento, como mostrado na figura 22a. Na escala do centímetro, os corpos podem ser utilizados como agregado graúdo (brita) no concreto, como mostrado na figura 22b. Na escala do mm, os corpos podem ser utilizados como agregado fino (areia de britagem), mostrado na figura 22c. Observa-se que estes três materiais apresentam, como diferenciação, apenas a escala de seus corpos, mas suas funções na construção são absolutamente distintas. Uma breve análise destas funções

permitirá observar que tais funções não são intercambiáveis; ou seja, o corpo, na escala do decímetro, não pode tomar a função dos outros corpos em outras escalas e vice-versa. Fica, assim, demonstrada a segunda parte da proposição.



Figura 22: (a) pedra de assentamento; (b) brita; (c) areia de britagem. (Fontes: (a) JORNAL DO OESTE, 2011; (b) e (c) CONGRESUL, 2012).

Finalmente, um terceiro exemplo, com alteração de geometria e de escala, mas sem alteração na constituição. Tome-se um lingote de aço carbono. Este lingote tem uma determinada constituição, com uma combinação de substâncias e uma estrutura interna definidas. Este lingote é considerado como uma matéria prima, porque sua forma ainda não é precisa o suficiente para defini-lo como um material de construção. Imagine-se, agora, que este lingote é dividido em três segmentos. O primeiro segmento é transformado em um tubo; o segundo, em uma chapa e o terceiro, em um filamento. Estes corpos, agora, podem ser considerados como materiais de construção, visto já terem suas formas definidas, a ponto de poderem ser suas utilidades caracterizadas. O tubo poderá ser utilizado em uma treliça espacial; a chapa poderá ser utilizada em uma telha e o filamento poderá ser utilizado para a produção de fibras de aço a serem misturadas no concreto. O segmento de tubo cortado, a telha e a fibra de aço são, apropriadamente, chamados de componentes, segundo a classificação proposta neste trabalho, visto que suas características de constituição e forma estão definidas. Assim, enquanto os materiais apresentam a mesma constituição, apenas suas características de forma são diferenciadas, a partir de um mesmo lingote de aço. Fica, assim, demonstrada a terceira parte desta proposição.

Quinta proposição: O modo de utilização de um material define a percepção da forma deste material. Assim, sempre que um material é utilizado individualmente (um único corpo) para determinada função, sua forma individual é identificada com o material. Inversamente, quando o material não é utilizado individualmente, sua forma individual perde o significado e o material é considerado sem forma definida.

A primeira parte desta proposição afirma a tendência, entre aqueles que utilizam determinado material (a comunidade que produz as edificações) é de associar uma forma

característica de determinado material com o próprio material. Assim uma pedra de cantaria tem uma forma prismática (paralelepédica) que está associada ao uso do material de maneira individual, ou seja, cada pedra é utilizada individualmente. Essa associação é suficientemente forte para que a pedra de cantaria ser definida como um material.

A demonstração da segunda parte da proposição é mais extensa e é apresentada a seguir. No segundo capítulo foi feita uma menção à forma dos materiais que não são tratados como sólidos monolíticos e que, portanto, não tem sua forma considerada como definida, conforme descrito naquele capítulo (2.1.1.5 Forma, p. 34). Considere-se um corpo constituído por grãos de areia. Este corpo pode ter o volume de 1m^3 , para efeitos de argumentação. Evidentemente, ao ser movimentado, este corpo assume, de maneira imperfeita, a forma, segundo os esforços a que é submetido e ao entorno que o contém. Assim, se o corpo estiver em um recipiente, sua forma se adaptará a esse recipiente. A forma do corpo não é a forma de cada grão. É uma forma indefinida. Ou, mais precisamente, é uma forma cuja definição é circunstancial, não definitiva. Neste caso e em outros, como no caso do cimento, por exemplo, a forma de cada grão ou partícula não é levada em consideração, nas questões que envolvem a manipulação do corpo, embora sua forma (do grão) seja essencial para o desempenho das funções às quais o material se destina. Grãos de areia esféricos ou lamelares teriam comportamento completamente diverso dos grãos de forma cúbica, normalmente encontrados. O mesmo raciocínio pode ser aplicado a uma tinta. A tinta, por ser fluida, não tem forma definida, embora as moléculas e mesmo as micelas, em outro nível da sua estrutura interna, tenham forma definida. Na sua escala de manipulação, a tinta é fluida, necessária para que ela possa desempenhar sua função de recobrimento de superfícies. Ou seja, a característica de forma da tinta pode ser referida como fluida. O problema de ter partículas com forma, mas esta forma não ser percebida no corpo, decorre, justamente, da percepção do corpo como sendo o conjunto de partículas, porque esta é a escala de manipulação. O fundamental, aqui, é a percepção de que, mesmo nestes casos, o corpo do material tem forma (a forma das partículas) e que esta forma é essencial para o desempenho das funções daquele material.

3.6.3.4 Seis conceitos complementares aplicados aos materiais

São apresentados os seis conceitos complementares, discutidos no item 2.3.2 (Conceitos complementares ou qualitativos), aplicados aos materiais. Eles ajudarão a compreender como se operacionaliza a inserção desses materiais no paradigma atual. Estes conceitos são: homogeneidade, monofuncionalidade, constância formal, isotropia, dispersão e tolerância. Cada uma destes conceitos aplicados é a condição limite de um espectro de possibilidades de uma propriedade dos produtos intermediários da construção. Elas

compõem o que é considerado, no paradigma atual, como o conjunto de características do material ideal. Evidentemente, estas propriedades não se referem a um material específico. De fato, alguns materiais necessitam apresentar propriedades que são exatamente o oposto desta condição ideal para desempenhar suas funções. Assim, um semiconductor necessita ser anisotrópico; uma lâmina de madeira de revestimento necessita ser heterogênea; uma maçaneta ergonômica necessita ter uma forma variável, e assim sucessivamente. Os conceitos aqui referidos formam a descrição do que seria um material abstrato universal, conforme enunciado em 3.5.3.2.

3.6.3.4.1 Homogeneidade

Atualmente, as tecnologias de projeto consideram cada material selecionado, conceitualmente como uma substância homogênea, ao menos a nível macroscópico ou funcional. Dizer que, para o projetista um material é conceitualmente homogêneo não significa que a maior ou menor complexidade de sua estrutura interna não seja conhecida e levada em consideração, em diversos momentos. Significa que aquele material, simples ou complexo, deve apresentar determinadas características, pois foi em função dessas características que ele foi selecionado ou projetado (ISAIA, 2007). Além disto, o projetista considera o material como sendo idêntico, em qualquer ponto de sua extensão; ou seja, suas características são idênticas, em qualquer parte do material. Esta simplificação conceitual deve-se à constatação de que seria uma tarefa bem mais complexa considerar variações de características dos materiais, ao longo dos componentes, embora tal variação pudesse ser utilizada com o intuito, por exemplo, de otimizar o volume de material ou a energia consumida. Por exemplo, imagine-se um perfil “I” de aço. Sabe-se que as fibras nas mesas são muito mais solicitadas que aquelas da alma, e que existe uma gradação contínua de tensão nas fibras, crescendo à medida que se afastam do centro de giração da seção. Agora, imagine-se um processo de otimização de projeto em que as fibras tivessem resistência crescente (através de uma maior densidade aparente, por exemplo), à medida que se afastassem do centro de giração. Imagine-se também que a seção variasse ao longo da peça, com mais massa na seção de maior momento. Tais variações em características são próprias do que se convencionou chamar de Materiais Funcionalmente Graduados ou MFG (em inglês, *Functionally Graded Materials* ou FGM). Em termos estruturais seria perfeito, em termos econômicos haveria também uma otimização, porque a menor densidade poderia ser obtida através de uma menor quantidade de material. Imagine-se agora que a peça apresentará uma variação, não somente na sua forma, mas também na sua constituição, variando as substâncias que são utilizadas, ao longo da peça e ao longo de cada seção, melhorando o desempenho da peça ou a sua relação massa/resistência à flexão. A pergunta é: tamanha heterogeneidade seria exequível com as tecnologias de

projeto de hoje (sem mencionar as tecnologias de produção)? As tecnologias atuais não foram desenvolvidas para projetar soluções heterogêneas. Elas foram desenvolvidas para trabalhar com a homogeneidade.

A homogeneidade é fundamental, também, para a noção de qualidade do material, a qual somente poderá ser avaliada e confirmada se todos os pontos do material utilizado em determinado componente apresentarem as mesmas características, dentro de uma variação pré-definida. Da mesma forma, é necessário que todos os componentes produzidos com aquele material apresentem as mesmas características, ou seja, deve existir uma replicação infinita (ou muito grande) da mesma ideia de homogeneidade, para que o padrão de qualidade seja aplicável. Mas, como será visto adiante, o processo produtivo não assegura, intrinsecamente, que o material terá as características desejadas, em cada ponto de cada componente. A solução para este problema é a adoção de tecnologias que controlem o grau de perda de homogeneização, dando um tratamento estatístico ao processo, definindo tolerâncias máximas para os desvios do padrão definido. Entretanto, como foi dito, os materiais, na verdade, não são homogêneos, e esta construção mental – a homogeneidade – não somente apresenta dificuldades de implementação, como traz consigo consequências importantes para todo o processo. Em primeiro lugar, a homogeneidade leva à rigidez (ou obrigatoriedade da repetição) dos processos e produtos, rigidez esta necessária à garantia da qualidade pré-estabelecida, da qual depende todo o processo da edificação. Esta rigidez se expressa, tanto no controle das substâncias a serem empregadas no material, quanto no processo de produção do mesmo, visto que o arranjo dos átomos e moléculas não obedece a um processo autoinformativo²⁴, mas de simples sobreposição e acumulação.

Processos de cristalização, quando ocorrem, têm um caráter randômico. Em segundo lugar, a necessidade de homogeneidade impede que as substâncias sejam arranjadas de forma mais complexa, com ordenamentos em diversos níveis da estrutura interna do componente. A rigidez, que exige uma identidade do material em todos os pontos, inibe a possibilidade de estruturas intermediárias. Em terceiro lugar, a homogeneidade exige um consumo do material maior do que seria necessário para que seja desempenhada adequadamente a função a que se destina, devido à impossibilidade de variações locais no componente. Em quarto lugar, a homogeneidade impede variações de composição, de acordo com as condições locais de produção. Tendo o material um papel passivo no processo produtivo – e não, adaptativo, como nos corpos gerados a partir de processos biológicos (a madeira, por exemplo) – não existem mecanismos inseridos nestes processos que lhe permita variações.

²⁴Uma análise das características do paradigma da biossíntese mostraria que este processo de autoinformação é central àquele paradigma.

Quando estas variações ocorrem, existem duas opções: aceita-se a heterogeneidade dos produtos, como é o caso das rochas, por exemplo, ou corrige-se as variações, removendo-se ou compensando-se as variações, como é o caso do cimento e do aço. Esta necessidade de homogeneidade evidentemente impõe custos adicionais de transporte para criar a disponibilidade de materiais exatamente (ou ao menos aproximadamente) nas mesmas proporções, em todos os locais de produção, situação agravada quando os materiais são sintéticos e obedecem a um processo de produção bastante controlado, como no caso dos polímeros. Em outros casos, como na fabricação de aço, a homogeneidade impõe custos adicionais para o aproveitamento de material reciclado, com a necessidade de incorporação de material virgem para compensar os desvios na composição daquele material, com perda de qualidade (NAKAMURA et al, 2012).

A homogeneidade impõe-se, até mesmo, sobre materiais que originalmente não apresentam esta característica. Dois casos devem ser mencionados, por serem emblemáticos.

A primeira situação ocorre na homogeneização dos materiais naturais não homogêneos, quer sejam de origem orgânica, como a madeira; quer sejam de origem inorgânica, como as rochas. Nestes casos, as características não podem ser alteradas ou homogeneizadas sem que haja uma destruição (parcial, ao menos) do material original. Esta destruição ocorre, justamente, com o objetivo de, literalmente, reconstruir os materiais, para que se possa obter uma homogeneização que permita o controle das características do novo material assim obtido. Esta alteração das características ocorre, por exemplo, na produção de madeira compensada e no MDF. Nesse caso, a complexa estrutura da madeira é – em grau maior ou menor – destruída, destruindo-se, também no processo, todas as variações internas do composto natural, para que surja, em seu lugar, com controle de qualidade, um material com propriedades mais homogêneas. Do mesmo modo, a rocha natural, com variações de granulometria e estrutura, é moída e seus fragmentos são selecionados (brita 0, 1 e 2) e utilizados como agregados, na produção de concreto, uma rocha artificial, com propriedades conhecidas e mais homogêneas que as da rocha original. Evidentemente, nesses casos fica claro que tais tecnologias são possíveis e economicamente viáveis, porque uma grande quantidade de energia, relativamente barata e manipulável, está disponível, emergindo, aqui, a questão da externalidade (que será vista no próximo capítulo). Aqui não ocorre somente uma teleologicidade tardia, mas uma função é imposta ao material, mesmo ao custo de ter que destruí-lo no processo.

A segunda situação ocorre com materiais que adquiririam propriedades interessantes justamente se perdessem sua homogeneidade. Dois exemplos podem ser citados: as ligas de aço e os solos estabilizados. No primeiro caso, a adição de pequenas quantidades de

alguns elementos transforma as características do aço. Entretanto, não haveria necessidade de manter tais características em toda a extensão do material. Por exemplo, o carbono aumenta a dureza, mas reduz a ductilidade. A dureza é importante para que o material possa resistir aos esforços pontuais, sem sofrer deformação, propriedade útil se estiver presente, por exemplo, na cabeça e no fio da rosca de parafusos sextavados. Mas é nociva se todo o parafuso for composto do mesmo material, pois a peça ficaria frágil. Hoje, a tecnologia que mais se aproxima, de forma econômica, deste tipo de solução é a cementação. Entretanto, este processo é oneroso e não é perfeito, porque atinge igualmente toda a superfície, com a mesma espessura de material cimentado. Portanto, uma solução intermediária é obtida, fazendo um parafuso não tão resistente e não tão frágil. O segundo exemplo envolve a estabilização de solos, para a construção de paredes. O solo necessita de estabilização somente nos pontos em que entra em contato com a água, e estes pontos situam-se somente na superfície dos componentes (tijolos de adobe, por exemplo). Entretanto, como as tecnologias atuais não conseguem produzir um solo-cimento com percentuais variáveis de cimento, todo o material carrega uma quantidade igual do mesmo, com grande desperdício e aumento de custo e energia incorporada. A homogeneidade, que à primeira vista parece a única solução, é, na verdade, muitas vezes, a solução da força bruta e da ignorância. Onde a ciência acredita que avançou com todos os seus controles e processos finamente regulados, na verdade, ali, ela impõe aos materiais uma condição de baixo desempenho e de alto custo.

Evidentemente, existem exceções à regra geral da homogeneidade. Dentre estas, algumas devem ser destacadas por serem bastante comuns. A primeira situação ocorre com materiais que desenvolvem alguma característica especial, através do uso. É o caso das superfícies metálicas (comumente aços inox, alumínio, cobre e alguns tipos de aço carbono), cujos óxidos, que se formam na superfície, protegem o restante do metal. A segunda situação ocorre por alterações localizadas, principalmente em metais, como no caso de têmperas e cementações, que alteram a superfície metálica ou uma parte do componente, emprestando-lhe um caráter específico. É também o caso de esmaltações em superfícies cerâmicas e metálicas.

3.6.3.4.2 Monofuncionalidade

Uma edificação é construída através da montagem de um grande número de componentes e elementos pré-fabricados, bem como da moldagem e escultura de vários materiais *in loco*. Como regra geral, à medida que o nível hierárquico aumenta, de material para componente, daí para elemento, e assim sucessivamente, aumenta de maneira correspondente o número de funções de cada produto intermediário da edificação. Neste acúmulo progressivo de

funções, é importante conhecer qual o número de funções que os níveis hierárquicos mais baixos atendem, de maneira que os níveis superiores possam atender um maior número de funções utilizando menos matéria e energia. No paradigma atual, o número de funções de um material é normalmente baixo, havendo muitos materiais monofuncionais. A monofuncionalidade não é uma característica buscada, como a homogeneidade, por exemplo. Entretanto, ela se faz necessária pela maneira como os materiais são desenvolvidos e como são selecionados por aqueles que decidem sobre sua aplicação. A monofuncionalidade está inserida dentro do processo mais amplo de definição de funções dos materiais, neste paradigma. Portanto, sua análise se inicia pela compreensão deste processo e suas implicações.

As funções de um elemento podem ser definidas de dois modos. Em um primeiro caso, o elemento é projetado (pelo arquiteto ou designer), para sua aplicação específica em uma edificação, de maneira a cumprir uma função. Para que a função seja cumprida, é necessário que o projetista conheça, de antemão, quais as propriedades (ou características) do material utilizado em cada componente. Ou seja, o material é selecionado a partir do seu comportamento, definido por sua constituição e sua forma. O material é, então, transformado em um componente, que irá atender a uma ou mais demandas dos usuários. Neste caso, a seleção de materiais está em concordância com o processo enunciado por Isaia (2007), onde a estrutura e composição dos materiais faz com que ele tenha determinadas propriedades, as quais serão utilizadas para definir as aplicações utilitárias no elemento, após passar por processos de transformação. Neste caso, o fabricante do material não sabe, no momento da produção, quais as funções que serão dadas ao material. Como consequência, este material deve ter características bastante genéricas e a tendência é que sejam selecionados para atender apenas uma função, ou seja, que sejam monofuncionais. Por exemplo, barras de aço têm a exclusiva função de reforço estrutural. Perfis de alumínio têm a exclusiva função de caixilho de esquadria.

Em um segundo caso, o fabricante do material decide incorporar funções em seu produto. Neste caso, tais funções devem ser compatíveis com o uso normal daquele material e, de maneira geral, não devem conflitar com as decisões e definições que o arquiteto ou projetista normalmente reserva para si. Por exemplo, a Pilkington (2012) desenvolveu diversas tecnologias incorporadas aos seus vidros, que reduzem a entrada de radiação infravermelha, são auto-limpantes, aumentam a resistência ao impacto, entre outros atributos. Um vidro pode ser multifuncional, mas apenas com funções que estejam diretamente relacionadas à sua função original. Esta multifuncionalidade restrita não é propriamente uma multifuncionalidade, no sentido mais amplo do termo, como seria o caso

se, por exemplo, o vidro fosse também um transformador de energia solar em energia elétrica.

A monofuncionalidade não deve ser confundida com aplicabilidade restrita. O cimento, por exemplo, é monofuncional. Serve apenas para ligar as partículas que envolve. Entretanto, esta função tem múltiplas aplicações.

De acordo com Isaia (2007), a engenharia está entrando em uma nova fase, em que os materiais não são mais selecionados, são projetados. Entretanto, esta nova abordagem não afeta o argumento apresentado neste texto, pois tal enfoque permanece dentro do paradigma atual, que requer que os materiais sejam monofuncionais.

A funcionalidade é tratada de maneiras diferentes para os corpos naturais e para os corpos antropogênicos, conforme foi visto no 2.3.1.8. Ou seja, no caso dos corpos naturais, é necessário dar-lhes uma função, um propósito que eles originalmente não possuíam. É somente após dar esta finalidade aos corpos naturais que terá sentido apropriar-se, de fato, deles para transformá-los fisicamente, alterando sua constituição e sua forma. Uma vez que esta transformação ocorra, aquele corpo pode, então, ser renomeado: ganha o nome de matéria prima e, depois, de material de construção. Ou seja, os corpos naturais foram transformados, após ganharem uma finalidade. Esta transformação de uma coisa sem finalidade, para um material com finalidade, ou seja, esta função ou propósito mencionados no início deste capítulo, que são adicionados às coisas que existem, deve ser chamada de finalidade *ex post facto*, porque esta função é adicionada às coisas quando elas já existem. Elas não foram criadas para aquele propósito, mas são justificadas *a posteriori* por ele. Mesmo árvores plantadas com o objetivo de produzir madeira têm esta característica, porque a árvore não se desenvolve com esta finalidade (e com nenhuma finalidade, exceto a de existir). Além disto, como esta finalidade não é definida pelo material em si, nem visa o seu benefício, mas de quem se apropria dele, esta finalidade é extrínseca. Este material, conceitualmente isolado de todas as circunstâncias envolvidas em sua formação ou criação, bem como do entorno onde foi encontrado, adquire uma função e um significado associados ao seu emprego futuro. Este processo, que ocorreu, primeiramente, com os materiais naturais (pedra, madeira e terra), ocorre, igualmente, com os materiais transformados (madeira serrada, pedra britada, cerâmica queimada, dentre outros), bem como os sintéticos (polímeros, ligas metálicas, dentre outros). Para aquele que se apropria do material, a operação mental que incorpora uma característica teleológica permanece igualmente válida, independentemente da origem do material ou do grau de industrialização ou sofisticação do mesmo. O material não tem significado ou razão de existência em si, nem interessa a quem se apropria dele, se ele cumpre alguma função definida pelo organismo do qual fazia parte

(como a madeira, por exemplo), ou do ambiente onde foi constituído (como uma rocha, por exemplo). Interessa-lhe, apenas, o objetivo da sua aplicação. Evidentemente, aquele que se apropria do material pode conhecer as circunstâncias em que ele foi criado, mas esta informação não tem para ele nenhuma relevância, pois não haverá uso para ela nos processos a que será submetido²⁵. O material passa a ser uma *commodity*, ou o mais próximo possível disto. O corolário desta característica do paradigma é a percepção de que o material deve ser submetido à vontade humana, e que um padrão de qualidade e uma forma devem ser impostas a ele, para que possa cumprir sua finalidade. Este conceito de finalidade está, evidentemente, mais próximo da ideia de Kant do que da de Aristóteles (ver nota de rodapé da página 37, referente à ideia de existência teleológica). Esta percepção está claramente exposta nos livros sobre materiais, que definem os quatro componentes da disciplina de ciência e engenharia dos materiais: processamento, estrutura, propriedades e desempenho. Aqui, o primeiro passo é a imposição da vontade humana sobre o material, através da ação do processamento deste material, que irá dotá-lo de uma estrutura, a qual permitirá que apresente algumas propriedades, que servirão para que tenha um desempenho especificado (CALLISTER, 2000). Esta forma de abordar os materiais tornou-se progressivamente mais viável na idade moderna, graças aos conhecimentos acumulados em química e física e às novas tecnologias de utilização de energia, que permitiram uma manipulação intensa das substâncias. Mesmo autores com consciência de que a tecnologia atual não está adequada e deve ser substituída por outra mais compatível com a sustentabilidade, utilizam a teleologia como uma característica do paradigma. Assim, Van der Ryn e Cowan (1996), arquitetos engajados à causa da sustentabilidade, definem *design* “como a modelagem intencional do material, energia e processo, para atingir uma necessidade ou desejo percebido” (p. 26).

Alguém poderia alegar que a definição de uma função é normal, e mesmo necessária, à utilização de materiais, para a produção das edificações. Entretanto, adotar este pressuposto traz diversas implicações: a) as propriedades das substâncias simples e compostas não são utilizadas no seu potencial máximo, mas de acordo com parâmetros de custo e desempenho, compatíveis com o interesse de quem as manipula. Assim, se o custo

²⁵ A validade desta afirmativa poderia ser questionada com o exemplo de alguns tipos de rochas. Por exemplo, o mármore de Carrara. Na verdade, esta referência ao local de origem é utilizada tão somente para estabelecer que as características conhecidas deste mármore estarão presentes no material específico sendo apropriado. Imagine-se, por exemplo, que um mármore, originado em Carrara não possua tais características. Certamente, emergiria o argumento de que não importa a origem, importa a qualidade. Ou digamos que o mármore de Carrara apresentasse uma enorme variação de qualidade, em todos os parâmetros utilizados. Alguém ainda usaria como referência a sua origem? Certamente não, pois a origem não diria absolutamente nada com relação à qualidade do material.

da energia é muito baixo, mas o custo do capital, traduzido em tempo de processo, é muito alto, será interessante gastar muita energia em pouco tempo de processo, mesmo que isto implique em uma subutilização das potencialidades das substâncias envolvidas. Um exemplo disto seria a comparação entre o concreto (na sua qualidade de rocha artificial) e o nacre (um composto organo-mineral). O concreto é produzido através da formação de cristais hidratados de sais e óxidos diversos, em um arranjo essencialmente aleatório – um processo *top down* – sem uma organização a nível atômico, resultando, disto, uma resistência muito inferior (principalmente à tração) àquela encontrada em outros cristais constituídos em um processo *bottom up*, como é o caso dos cristais de aragonita, formados no nacre, na madrepérola (BRUET et al., 2005); b) as limitações e disponibilidades do lugar onde o material é produzido são desconsideradas como condições de produção. Produto e processo são definidos em função de um objetivo pré-determinado, que leva em consideração, exclusivamente, as questões intrínsecas da tecnologia. As questões de localização são consideradas apenas como custo, normalmente refletindo aspectos de logística e legislação, principalmente aquela que exige controles e cuidados em relação ao meio ambiente, passivo no processo. Um exemplo disto são as ligas metálicas, mormente as de aço e alumínio, que utilizam quantidades de metais desproporcionais àquelas encontradas nos locais onde os componentes que as incorporam são produzidos e utilizados. Esta prática acarreta, entre outras consequências, um consumo extremamente alto de energia, um uso de metais incompatível com a sustentabilidade e, posteriormente, uma dispersão dos metais, que afeta, de forma ainda não totalmente conhecida, os ecossistemas onde tais componentes são descartados; c) as substâncias e estruturas naturais – e as orgânicas, em especial - já existentes, são deslocadas de sua condição inicial, onde havia uma clara articulação entre intenção e solução. Por exemplo, a madeira é constituída organicamente com um determinado fim, em perfeita sintonia com as necessidades da árvore da qual faz parte. Quando esta madeira é cortada e utilizada para uma estrutura de telhado, as características apresentadas por ela não são as características ideais do elemento estrutural ao qual é destinada. Este uso deriva, exclusivamente, de uma imposição volitiva do homem sobre uma estrutura deslocada de sua intenção inicial, à qual estava perfeitamente adaptada. Consequentemente, a madeira precisa ser superdimensionada, para compensar as diferenças das demandas estruturais do seu uso original e do seu uso final; d) a teleologicidade *ex post facto* impõe ao material a aplicação, em componentes cuja vida útil é definida pela sua capacidade de permanência em uso, que ultrapasse o momento do completo retorno do capital investido. Assim, através de uma série de tecnologias, uma durabilidade estendida é obtida, trazendo como consequência a defasagem entre o desuso e a degradação. Esta defasagem só é permitida através de uma

externalidade dos custos de degradação. Este é o caso, por exemplo, de peças plásticas, cuja defasagem entre desuso e degradação pode ser medida em séculos.

Ao impor sua vontade sobre os materiais, o homem atinge, com intensa transformação de energia, aquilo que os processos biológicos obtêm com intensidade muito menor de transformações energéticas. Por isto, partir de um único ponto, que é o processamento, sem entender as características da matéria, impede a indústria humana de utilizar o potencial que outra abordagem permitiria, com muito mais eficiência. Poder-se-ia dizer que, de acordo com esta característica do paradigma, os processos transformadores dos materiais, que fazem parte da tecnologia moderna, não são inteligentes. São exteligentes²⁶, ou seja, toda a inteligência vem de fora do material, sendo ele quase totalmente passivo no processo.

A análise apresentada acima permite que se possa avançar na compreensão do paradigma atual. Nele, a utilização de um material é, normalmente, realizada por uma entidade distinta daquela que o produziu. Desta maneira, embora a finalidade de um material exista antes de sua existência física, a função específica a ser exercida por ele somente poderá ser definida por quem o utilizará, após sua fabricação. Este conceito se identifica com a ideia de alienação do trabalho, de Marx (1977). Aqui, entretanto, não é somente o trabalho que se aliena de seu produto, mas a unidade produtora, como um todo. Este é o caso de materiais que utilizam matérias primas com pouca transformação, como é o caso de rochas e madeiras, por exemplo. Mas também é o caso de cimento e aço, entre outros, porque, quem produz estes materiais pode até imaginar uma utilização genérica para ele, mas o uso específico e a função específica somente podem ser determinados por aquela entidade que utiliza o material e lhe dá uma forma final, coerente com essa função. Isto significa que, à medida que o material avança no processo de elaboração do produto final, suas formas e suas funções têm seu significado alterado. Veja-se, por exemplo, o caso do cimento. Os minerais que são misturados no forno têm significado para quem produz o cimento. Entretanto, após sua mistura, embora estejam presentes, como tal, antes das reações que os transformam em cimento, seu significado desaparece (ou é dissolvido) dentro do conceito do material, que é a mistura crua (moagem de cru). Quando o cimento é formado, ele é constituído por diversas substâncias originadas das reações que ocorreram no forno,

²⁶ Evidentemente, o vocábulo exteligente é um neologismo, significando uma inteligência externa ao sistema ou organismo, utilizada para definir e direcionar as ações daquele organismo ou sistema. Este vocábulo também já foi utilizado na língua inglesa (*extelligent*), porém com um significado diferente: exteligência significando todo o conhecimento acumulado externamente aos seres humanos (COHEN; STEWART, 2001).

entre as substâncias originais. Mas estas novas substâncias não são considerados materiais distintos. Isto ocorre porque, na etapa anterior, os materiais eram manipulados individualmente, enquanto, agora, o são coletivamente. Da mesma forma, o cimento tem significado para quem produz uma laje pré-moldada, por exemplo, mas seu significado desaparece dentro do significado do concreto que constitui a laje. Para o construtor, o significado do concreto desaparece dentro do significado da laje (que é um objeto contendo concreto e aço), que ganha um significado de material único. Finalmente, para o usuário final, o significado da laje desaparece dentro do significado do piso, que é, para ele, o objeto de uso. Embora intelectualmente este usuário final possa saber que o piso contém a laje, que contém o concreto, que contém o cimento, que contém os minerais, em termos de sua funcionalidade, tudo isto é absolutamente irrelevante e, como tal, desprezado. Ou seja, a cada passo existe um processo de redefinição, que faz desaparecerem os materiais, formas e funções anteriores, substituindo-os por novos, que são úteis, isto é, funcionais para cada usuário. Deve-se, ainda, notar que estas observações estão de acordo com a proposição de que o conceito de material é função-dependente.

3.6.3.4.3 Isotropia

Materiais isotrópicos são, por definição, aqueles que apresentam o mesmo comportamento, em todas as direções, em relação a determinada propriedade. O termo comportamento denota a questão da funcionalidade, enquanto a ideia de constância desse comportamento, independentemente da direção analisada, traz a questão da homogeneidade. Por isso, a isotropia é uma característica ligada à homogeneidade e à monofuncionalidade. De fato, materiais isotrópicos são, no nível funcional, para aquela propriedade, homogêneos. Por exemplo, o concreto é considerado um material isotrópico. Embora ele seja evidentemente heterogêneo, em determinada escala, essa heterogeneidade desaparece quando o material é considerado funcionalmente, uma escala acima. Tomando isso em consideração, as normas estabelecem exatamente como devem ser medidas as propriedades dos materiais (dimensões do espécime, em relação às dimensões de seus constituintes). Assim, no concreto, a influência do agregado graúdo, por exemplo, deve ser dispersa na matriz cimentícia, para que a resistência à compressão possa ser corretamente avaliada.

A isotropia dos materiais industrializados é possível, justamente, através do processo de homogeneização. Entretanto, materiais naturais, tais como madeira e alguns tipos de rochas, são anisotrópicos, independentemente da escala em que forem considerados.

3.6.3.4.4 Constância formal

A forma, combinada com a constituição do material, define sua função. Embora a forma do material não seja a forma definitiva que o componente irá assumir; ela apresenta algumas características no material, que são fundamentais para a centralidade deste, no paradigma atual.

Em primeiro lugar, a forma traz, ao mesmo tempo, possibilidades e limitações. Ao definir, por exemplo, a forma de um perfil de alumínio, o fabricante cria a possibilidade de utilização do perfil em uma janela, de maneira simples e direta, com redução de trabalho. Mas, ao mesmo tempo, limita a utilização daquele perfil à linha de janelas que possui outros perfis, que são dimensionalmente e funcionalmente coordenados com aquele primeiro. Poder-se-ia definir estas formas como formas dedicadas, à semelhança de equipamentos dedicados, que aumentam a produtividade, mas limitam a gama de usos possíveis.

Em segundo lugar, as formas incorporadas aos materiais devem apresentar compatibilidade com o processo produtivo dos materiais e com o processo produtivo que se seguirá a este, incorporando o material a um componente ou diretamente ao edifício. Para tanto, de um lado, as formas devem ser padronizadas, de maneira a permitir uma massificação na produção. De outro lado, devem apresentar uma versatilidade, para adaptar-se às necessidades de customização da indústria da construção. Ou seja, as formas devem ser compatíveis com processos altamente industrializados e com baixo grau de industrialização.

Estes dois aspectos, a pré-definição da funcionalidade do componente e a compatibilidade com os diversos processos produtivos, levam a uma necessidade de constância da forma. Esta constância pode ocorrer em uma, duas ou três dimensões e é acompanhada de variabilidade nas outras dimensões. A constância de uma dimensão é exemplificada nas chapas de compensados, MDF e chapas laminadas de metais; a constância de duas dimensões é expressa, por exemplo, nas seções utilizadas por fabricantes de perfis de aço alumínio, bem como tubos de PVC; finalmente, a constância de três dimensões é expressa em pós e granulados, tais como cimento, gesso, areia e brita. A resolução das dimensões que permitirão a adaptação customizada é, normalmente, arbitrada pelo fabricante do material, sem interação com a indústria de edificações, nem com a indústria de metabolização destes materiais. Assim, as chapas de compensados, em tamanhos de 2,2 x 1,1 metros; as chapas de vidro, em tamanhos de 3,21 x 2,20 ou 2,40 metros; os perfis de alumínio, aço e PVC são oferecidos em barras de 6 metros; os vergalhões em barras de 12 metros; e o cimento classe 32 é oferecido em granulometria que deve reter menos de 12% na peneira 75 μ m, o mesmo ocorrendo com outros materiais. Evidentemente, os fabricantes

sempre argumentam que as dimensões são definidas em função do seu uso. Os perfis de alumínio facilitam a montagem, as chapas de vidro são as mais econômicas e fáceis de transportar e a granulometria do cimento é a ideal, pois evita a hidratação muito rápida ou muito lenta. Não poderia ser de outra forma, visto que o fabricante não iria produzir algo que dificultasse os processos que utilizam o material. Entretanto, continua o problema de definição. Ela é feita, exclusivamente, pela indústria de materiais, que é hegemônica no processo e define as formas de seus produtos, de maneira totalmente autônoma. Evidentemente, a indústria não pode produzir produtos com características de forma e constituição que os tornem disfuncionais. Assim, a indústria do cimento acrescenta gesso ao cimento como retardador de pega, para permitir seu uso de maneira mais eficiente. No caso do vidro, como já foi mencionado anteriormente, existe uma grande diferença entre o tipo de interação da indústria com a indústria de edificações e aquele que ocorre com a indústria automobilística, onde a indústria de vidros entrega um componente totalmente customizado. Seria também diferente, caso a indústria de cimento fornecesse um cimento com composição (a constituição do material) e granulometria (a forma do material) customizadas para a indústria de edificações ou para a indústria de componentes. Este tipo de relação poderia trazer grandes benefícios ao processo, como um todo, mas a indústria de materiais é impermeável a qualquer tentativa de redefinir seu papel e sua interação com a indústria de edificações.

A conclusão do argumento apresentado é que a constância da forma, quer seja em uma, duas ou três dimensões, é fundamental para a indústria de materiais e caracteriza sua relação, tanto quanto a homogeneidade da constituição, com a indústria de edificações. Uma consequência desta situação é a enorme geração de resíduos, gerados pela sobra de chapas, perfis e – em menor escala – particulados finos, durante seu processamento, para a produção de componentes ou do próprio edifício. Como cenário alternativo, poder-se-ia imaginar a indústria de materiais produzindo com formas definidas, de comum acordo com a indústria de edificações, seguindo a liderança desta indústria. Haveria uma substancial redução de sobras e resíduos a serem descartados, com um impacto bem menor da indústria ao meio ambiente.

3.6.3.4.5 Universalidade

Estudiosos das questões ambientais, oriundos de diversos campos de atividade, tais como engenharia, química e arquitetura, têm sistematicamente enfatizado a necessidade de pensar em soluções locais que envolvam as tradições tecnológicas, culturais e sociais de cada região, e que utilizem os recursos disponíveis no entorno da edificação, na realização dos projetos (VAN DER RYN; COWAN, 1996; PEARSON, 2000; MC DONOUGH;

BRAUNGART, 2002). Essa preferência por um intenso envolvimento com o local é comumente justificada pela preocupação com a preservação de dois aspectos importantes, no processo da edificação: energia e valores culturais. De fato, a energia gasta com o transporte, por longas distâncias, de materiais e componentes, aumenta sensivelmente a energia incorporada à edificação, com todas as consequências ambientais que isto acarreta. Além disso, a manutenção dos valores locais é um eficaz inibidor de um processo de homogeneização cultural, que ocorre atualmente. Existe, entretanto, outro aspecto fundamental na questão do uso de materiais que é, no mínimo, tão importante quanto as que foram mencionadas acima. Trata-se do fenômeno da dispersão de materiais²⁷, uma característica do paradigma atual, que é derivada das características mais primárias de teleologicidade, homogeneidade e constância.

No centro do problema está a questão da tecnologia. Existe uma forte tendência a uma hegemonia de algumas tecnologias, dentro do campo da construção, hegemonia, esta, inserida no caráter oligopolístico de diversos segmentos que produzem materiais e componentes de construção. Os ganhos de escala obtidos com a concentração da produção em poucos locais estimulam estes setores a adotarem tecnologias idênticas, para uma grande variedade de condições de aplicação encontradas. Tais tecnologias são otimizadas, para a utilização de um número reduzido de determinadas substâncias, as quais são processadas em unidades localizadas, em boa parte dos casos, próximas de onde são obtidas (como o caso do cimento, perto de jazidas, ou de polímeros, perto da unidade produtora de eteno e outras matérias primas). Em outros casos, as unidades processadoras estão localizadas próximas aos maiores centros consumidores, ou onde outras vantagens comparativas minimizam o custo final. Em qualquer dessas situações, prevalece o princípio de que a grande escala da unidade produtora trará vantagens, em relação a uma produção dispersa e com diferentes tecnologias de produção, que utilizem matérias primas locais. Essa condição pode conduzir, eventualmente, à adoção de uma única tecnologia para o processamento das mesmas substâncias, em todas as fábricas, bem como de uma única proporção destas substâncias para a produção de determinado material ou componente, aplicado em todas as circunstâncias. Esse cenário, que despreza as condições locais de oferta de matérias primas e tecnologias, gera, como consequência, a dispersão das substâncias utilizadas, levado a efeito em três etapas.

Na primeira etapa, as substâncias são retiradas de jazidas, minas e outros mananciais, para serem levadas aos diversos centros de processamento. Neste momento, ocorre, muitas

²⁷Ele não deve, entretanto, ser confundido com o fenômeno de dispersão de valores nas características dos materiais, descrita da próxima característica.

vezes, a dispersão, em maior ou menor grau, dos resíduos ou subprodutos da extração das matérias primas. Fenômenos de desmatamento e erosão são frequentes em áreas de exploração de jazidas, além da lixiviação de grande quantidade de resíduos, formadas pelo descarte de processos de mineração e concentração. Acrescente-se a isto, os acidentes com vazamentos de matérias primas ou resíduos. Os processos de produção, muitas vezes, têm, como externalidade, a dispersão de substâncias nos locais de produção. Acidentes exacerbam estas situações. Um exemplo da extensão e gravidade da dispersão que pode ocorrer, foi o vazamento de 1 milhão de metros cúbicos de lama vermelha, na Hungria, que comprometeu uma grande área agriculturável daquele país (figura 23). A lama vermelha é um resíduo alcalino da produção de alumínio, pelo processo Bayer.



Figura 23: Na esquerda, vista aérea da área afetada, antes do vazamento. Na direita, a mesma área, após o vazamento. (Fonte: INDEX, 2010).

Na segunda etapa, os materiais e componentes são levados diretamente (ou através da rede de comercialização) ao local da edificação, ou para indústrias auxiliares para serem metabolizados. No momento da utilização dos materiais, novamente ocorre uma dispersão, causada pelos resíduos e sobras destes materiais, originadas, tanto no erro de produção e ajustes, quanto no próprio processo, que envolve descartes (como das madeiras de formas, por exemplo) e, principalmente, das sobras e resíduos gerados pelo corte e ajuste de materiais, que são fornecidos em tamanhos padronizados pela indústria. Esta é, provavelmente, a maior fonte de resíduos desta etapa. Os resíduos gerados serão descartados, de forma aleatória, no entorno das fábricas ou edificações produzidas ou, na melhor das hipóteses, em aterros. São muito poucos os casos de reciclagem e reaproveitamento de resíduos da construção, principalmente no Brasil, embora em outros países, como o Japão, este tipo de reaproveitamento já ocorra. Os resíduos gerados nesta etapa serão dispersos, de forma mais ou menos intensa, no ar (corte de materiais e componentes não metálicos), na água (lavagem de ferramentas, tintas, resíduos de cimento e cal, entre outros) e na terra (deposição em aterros).

Na terceira etapa, os materiais usados são removidos da edificação que está sendo demolida ou reformada; são levados a locais de descarte, como aterros e lixões, além do

processo natural de desgaste, que causa uma dispersão contínua ao longo da vida útil do componente, como é o caso do óxido de ferro e das substâncias voláteis (VOCs) utilizadas em tintas e colas, bem como das próprias tintas e materiais de revestimentos sujeitos a desgaste. Existe, ainda, uma quarta forma de dispersão, que ocorre em acidentes (incêndios) e outras formas não intencionais de destruição dos edifícios, como a implosão das torres do World Trade Center. Naquele caso, parte do amianto, que havia sido utilizado nas torres, foi disperso em uma grande região da Baixa Manhattan, além de sílica, portlandita e outros minerais e substâncias orgânicas tóxicas (NYCHEALTH, 2002).

Esses processos de dispersão têm, como consequência, uma deposição dos elementos químicos contidos nas substâncias utilizadas, ou mesmo, das próprias substâncias, alterando sua concentração natural na camada superior da crosta terrestre (incluindo-se, aí, os mananciais hídricos). Essa alteração de concentração tem, ao longo do tempo, causado efeitos devastadores em alguns sítios, principalmente no que se refere a metais e compostos halogenados. Além disso, a dispersão nas etapas que são economicamente interessantes (mineração/exploração, produção de materiais, produção de componentes, produção de edificações), acarreta um consumo insustentável de energia e de matéria. Essa situação perdura graças às externalidades geradas pelo sistema de produção²⁸. Caso essas externalidades fossem computadas no custo total da edificação, certamente as soluções tecnológicas adotadas gerariam um grau bem menor de dispersão do que é observado hoje. Entre as externalidades mais importantes, está o impacto da acumulação, sobre a crosta terrestre, de metais e compostos halogenados, em concentração diferente daquela em que os diversos organismos desenvolveram seus processos bio-sintéticos. Todos os processos biológicos utilizam os elementos em proporções compatíveis com a sua concentração na camada superior da crosta terrestre. Nesses processos, os metais são utilizados de forma extremamente parcimoniosa, mormente os metais mais pesados, cujo emprego em processos biológicos praticamente não existe. Esta característica pode ser observada em moléculas orgânicas, que contêm metais, restringindo-se, na maioria das vezes, a 1 ou 2 átomos desses elementos em moléculas, que, muitas vezes, ultrapassam os milhares de u.m.a.²⁹. Isso se deve ao fato de que os metais apresentam características muito específicas na sua eletrosfera, o que os torna particularmente reativos nas interações com outros átomos e moléculas. Quando as concentrações dos diversos metais estão alteradas (especialmente para mais) nos locais (dentro ou fora dos organismos) onde ocorrem as

²⁸O conceito de externalidade será visto em maior detalhe no próximo capítulo.

²⁹u.m.a. significa unidade de massa atômica e é igual a um doze avos da massa do isótopo 12 do elemento Carbono.

reações bioquímicas ou suas precursoras, essas características interferem nos diversos processos biológicos, de diversas maneiras, algumas delas bastante nocivas.

Processos de dispersão, além de causar alterações na constituição da camada superior da crosta terrestre, consomem volumes insustentáveis de recursos finitos não renováveis.

3.6.3.4.6 Tolerância ao erro

Ao longo de todo o processo de obtenção, transformação e aplicação do material, uma grande quantidade de padrões são utilizados. São empregadas unidades básicas de medida: massas, distâncias, tempos, e todas as unidades derivadas: velocidade, peso específico e força, entre outras. Esta universalização das medidas é necessária para traduzir a vontade ou intenção de quem transforma o material, bem como para verificar se esta vontade ou intenção está sendo expressa no material. Ao final, as quantificações são cristalizadas na constituição e na forma do material ou dos componentes, elementos, subsistemas e sistemas. A forma é definida pela geometria e a geometria adquire significado preciso, através da quantificação dos objetos geométricos. Assim como a forma, a constituição é verificada através da quantificação da resposta (geralmente do comportamento) do material, diante de processos de avaliação. Outras medidas referem-se à quantificação dos processos de utilização do material. Assim, é necessário proceder, através da quantificação dos processos, desde o planejamento, projeto, produção, manutenção, até o desuso das edificações. Na verdade, à primeira vista, surge a percepção de que a única forma de controlar o processo de edificação e obter os resultados desejados é através da quantificação de todos os aspectos, de cada etapa do processo. De fato, este é o caso neste paradigma e tal percepção somente poderá ser contraposta quando um novo paradigma for discutido.

No atual paradigma, a quantificação é o tradutor das outras características básicas do material (função, constituição e forma), implementadas com o auxílio dos conceitos de teleologicidade, homogeneidade e constância. Embora a dispersão também seja medida, ela não é incorporada no processo, porque está associada à idéia de externalidades. No caso da função, a quantificação retoma o processo de definição, a cada etapa, e redefine quais sejam as características do material que passam a ser importantes. Na homogeneidade e na constância, a quantificação define, não somente o que deve ser o material, mas também o que lhe é permitido ser, através das tolerâncias.

Nos processos de quantificação são utilizadas duas abordagens: determinística e probabilística. A abordagem determinística é utilizada em dois momentos distintos: no projeto, quando as características do material e do componente são definidas; e no controle,

quando é verificado o resultado das ações, dentro do processo de edificação. A abordagem probabilística também é utilizada em dois momentos: para informar ao projeto o grau de controle que o agente da ação tem sobre o processo (incluindo-se aí, desde a qualidade dos materiais, até as medidas da edificação); e para definir o grau de dispersão das características (desde os materiais, até a edificação), em torno de padrões definidos.

A quantificação determinística reflete, essencialmente, a exteligência do homem sobre o mundo físico. Ela é a expressão medida e precisa de sua vontade, no processo teleológico a que o material é submetido. Evidentemente, este determinismo tem um caráter platônico³⁰, no sentido da idealização daquilo que deverá ser construído. Por outro lado, a quantificação probabilística reflete a limitação da tecnologia utilizada, no sentido da impossibilidade de conformar, precisamente, o material à vontade de quem dele se apropria. A definição e aplicação das tecnologias têm, como condição de contorno, o custo do processo, porque a capacidade de identificação do material real resultante do processo, com o idealizado, tem um custo energético proporcional à redução da dispersão dos resultados. Em outras palavras, a obtenção do estreitamento da dispersão de uma variável está relacionada à melhoria dos diversos processos tecnológicos. Tomando o cimento como exemplo, é fácil perceber que, para que ele tenha uma determinada formulação, é necessário obter as matérias primas em proporção adequada ao resultado desejado. Quanto mais estreita a dispersão (quanto menor o desvio padrão, ou em outras palavras, quanto mais homogêneo for o cimento) e mais idêntico à formulação ideal, maior o esforço despendido para separar das matérias primas a serem utilizadas, aquelas frações indesejadas; portanto, mais energia é gasta. Da mesma forma, para uma determinada granulometria, quanto menor a dispersão em torno do valor médio, maior o número de partículas que devem ser rejeitadas; portanto, maior a energia despendida. Outro exemplo refere-se à pureza das matérias primas. Quanto maior a pureza desejada ou necessária, maior o esforço de purificação; portanto, maior a energia despendida no processo.

Existe uma evidente tensão entre as quantificações determinística e probabilística, no atual paradigma. Esta tensão decorre do caráter teleológico – e, portanto, determinista - do processo, que obriga os materiais a seguirem determinados caminhos, confrontado com as limitações das tecnologias utilizadas, para se obter os resultados com a precisão desejada, limitação que expressa a dispersão dos resultados, de caráter probabilístico. Além dessa tensão, é necessário lembrar que a escala das quantificações determinísticas é

³⁰ O caráter platônico refere-se à noção de formas ideais existentes em um mundo verdadeiro, cujos reflexos formariam a realidade sensível. Este conceito é apresentado por Platão, na sua famosa alegoria da caverna.

macroscópica, enquanto a escala das quantificações probabilísticas, embora seja macroscópica nas questões relacionadas aos resultados mensuráveis das ações, tanto no processo (por exemplo, no peso dos componentes de um determinado traço de argamassa), como no produto (por exemplo, nas dimensões de um componente de madeira), é microscópica (por exemplo, na dispersão de grãos de cimento em um concreto) e, mesmo, nanoscópica (por exemplo, na formação de cristais do mesmo concreto) nas questões de processo e produto, no que se refere às interações entre as diversas substâncias utilizadas para a produção dos componentes. O quadro 6 mostra as diferenças das quantificações para processo e produto.

Quadro 6: Diferenças das quantificações, para processo e produto.

	Processo		Produto	
	FORMA	MATÉRIA	FORMA	MATÉRIA
DETERMINÍSTICA	Definição macro de forma (projeto)	Definição macro de matéria		
PROBABILÍSTICA	Conformação micro/nano dos constituintes	Distribuição micro/nano dos constituintes	Resultado macro de forma	Resultado macro de matéria

A dicotomia entre quantificações determinística e probabilística surge como uma necessidade, no atual paradigma, pelo seu caráter descontínuo. O processo prossegue com incrementos discretos, condição expressa na recorrente alienação de cada etapa, em relação à anterior, como já foi abordado. Um processo contínuo de acumulação de matéria, em uma única etapa, desde o nível atômico (em uma condição ideal), até o nível macro, em um processo *bottom up*, se bem conduzido, poderia levar à eliminação da dicotomia. Isto será visto, em maior detalhe, no próximo capítulo.

Finalmente, é importante mencionar a importância da natureza dos materiais produzidos, combinada com as técnicas de produção, para observar como a dicotomia ocorre. Tome-se, como exemplo, o vidro. Na produção através de laminação, surgem ondulações (variações de espessura), que comprometem o desempenho do vidro, com relação à qualidade das imagens que passam através dele, criando distorções. O vidro produzido pelo processo *float* elimina este problema, reduzindo a dispersão do erro de espessura, com um evidente ganho de qualidade. O exemplo do vidro é paradigmático, em relação a todas as indústrias que conseguiram concentração oligopolística e alta densidade tecnológica. Entre elas, podem ser listadas as indústria de perfis de alumínio, com precisão de 0,1 mm na seção; de tubulações de PVC e de cobre, com a mesma precisão; de fios e cabos elétricos; de

cimento, com controle de granulometria na faixa dos micrometros; e de placas cerâmicas. Por outro lado, indústrias que trabalham em mercados concorrenciais e apresentam baixo índice de industrialização, apresentam problemas de dispersão muito maiores. De um lado, a falta de investimento em pesquisa e em equipamento adequado de produção e, de outro, as próprias características dos materiais utilizados colaboraram para tornar o processo de produção de edifícios o mais impreciso de todas as engenharias, sem exceção.

Com relação aos processos de fabricação, os materiais da construção dividem-se em três classes, segundo os processos transformativos a que são submetidos: a) São da primeira classe os materiais e componentes moldados a partir de pastas de minerais (argilas, quartzo, calcáreo, etc.) e água, tais como componentes de argilas vermelhas, de argilas brancas, concretos (tanto pré-moldados, quanto moldados no local) e louças sanitárias. Caracterizam-se por perder água, no processo de fabricação, gerando tensões e deformações; b) Na segunda classe estão aqueles que são cortados e montados a *posteriori*. A imprecisão do corte, normalmente realizada por empresas que metabolizam os materiais, e a posterior montagem, feita a partir de diversos tipos de ligações (entre superfícies, materiais e componentes – ver seção 2.3.3.2.1, com relação à natureza das conexões), de forma geralmente rudimentar, é própria da componentização de perfis de alumínio, tubulações de PVC, perfis de aço, placas cerâmicas de piso e parede e vidros de caixilhos e fachadas; c) Finalmente, a terceira classe corresponde àqueles materiais que já passaram por um processo de componentização, dentro de processos industriais adequados, mantendo a precisão ao longo de todo o processo. Entre os materiais desta classe estão aqueles que são utilizados em sistemas de condicionamento de ar, componentes elétricos e eletrônicos e elevadores. Esta última classe destoa claramente das duas primeiras, porque é a única que consegue manter uma coerência entre o nível de precisão dos materiais produzidos e os componentes e elementos resultantes de seu uso. A grande dispersão de valores, tanto com relação à homogeneidade, quanto com relação à constância, obrigam a indústria da construção a adotar estratégias de acúmulo de erros e sequências de construção, que, normalmente, não fariam sentido.

4 PRINCÍPIOS DE SUSTENTABILIDADE

4.1 REVISÃO DA LITERATURA

Diversos autores apresentaram conjuntos de conceitos, que consideraram necessários e suficientes, para caracterizar os princípios que deveriam guiar atividades sustentáveis ou, mais genericamente, o desenvolvimento sustentável. Moser (1996) criou conceitos com o objetivo de auxiliar no processo de desenvolvimento de soluções sustentáveis, que fossem soluções de engenharia ecologicamente saudáveis e tecnicamente viáveis. Ele batizou seus princípios de eco-princípios, que considerou necessários para a criação de um novo paradigma tecnológico, que chamou de eco-tech.

Moser elegeu os seguintes conceitos como princípios a serem seguidos:

1. diversidade (de espécies para manter a complexidade e capacidade de auto-organização da eco-esfera);
2. interdependência (das espécies em redes altamente complexas, promovendo a estabilidade);
3. ciclos de materiais (contínuos, com biodegradabilidade)
4. fluxo de energia (utilizando somente energia solar)
5. flexibilidade (com um balanço entre competição e cooperação, criando variabilidade e maior adaptabilidade);
6. coevolução (através de um balanço entre criação e adaptação mútua da eco-esfera e da antroposfera);
7. área ocupada (com equilíbrio entre culturas agrícolas e florestas, áreas de produção e áreas selvagens);
8. natureza dual dos sistemas vivos (expressa em um balanço entre diversas dualidades: auto interesse versus integração, conservação versus expansão, competição versus cooperação);

Incompatibilidade entre o paradigma atual da construção e princípios de sustentabilidade: proposição de novo paradigma

9. durabilidade/sustentabilidade (com a aplicação dos princípios, a engenhosidade da evolução e a sabedoria da natureza promoverão a sustentabilidade indefinidamente)
10. elementos caóticos são sempre parte da natureza (perturbando, mas não modificando completamente os sistemas).

Thomas J. Hahn (2008) também propôs uma nova abordagem, com um enfoque especificamente voltado para o projeto de edificações, tomando a natureza como referência. Para tanto, propôs a utilização de três tipos de processos da natureza, que deveriam ser imitados e utilizados no desenvolvimento de soluções e tecnologias: holísticos, integrativos e redutivos. Os processos holísticos referem-se à maneira como todos os sistemas e processos naturais se integram e se completam sinergicamente, em oposição à forma iterativa em que os materiais e componentes são desenvolvidos e aplicados nas tecnologias atuais. Os processos integrativos promovem a síntese e a multifuncionalidade dos componentes e sistemas utilizados, ao contrário da abordagem dessecativa atual. Finalmente, os processos redutivos buscam a minimização de consumo de matéria e energia, ao invés dos processos aditivos utilizados atualmente. A utilização destes três processos levaria a soluções integradas com o meio ambiente e geraria soluções com uma “sofisticada complexidade e elegância inata” (HAHN, 2008, P. 200).

Este tipo de abordagem é extremamente importante, mas não é suficiente, porque não é possível, simplesmente, imitar as soluções naturais. Neste sentido, o próprio autor reconhece a dificuldade de implementação destes conceitos e admite que são ideias a serem desenvolvidas. Além disto, existem muitas outras considerações a serem feitas para viabilizar uma visão de desenvolvimento sustentável no campo da engenharia civil.

A EPA (*Environmental Protection Agency*), do governo dos Estados Unidos, também promove uma lista de nove “Princípios de Engenharia Verde” (EPA, 2011). Estes princípios foram formulados por um grupo de mais de 65 engenheiros, reunidos na conferência “*Green Engineering: Defining the Principles*”, que ocorreu em Sandestin, Florida, em maio de 2003. Os princípios foram desenvolvidos para serem utilizados por engenheiros, como guia no desenvolvimento de “produtos e processos, dentro das restrições ditadas pelo mercado, governo e sociedade, tais como custo, segurança, desempenho e impacto ambiental”. Os princípios divulgados pela EPA (2011) são apresentados na forma de atividades, a serem implementadas com o objetivo de desenvolver produtos e processos mais sustentáveis:

1. “Desenvolva processos e produtos de forma holística, use análise sistêmica e integre ferramentas de avaliação de impacto ambiental.”

2. “Conserve e melhore os ecossistemas naturais, enquanto protege a saúde humana e o bem estar.”
3. “Use a abordagem de ciclo de vida em todas as atividades de engenharia.”
4. “Assegure-se de que todo o material e energia que entra e sai do sistema são tão inerentemente seguros e benignos quanto possível.”
5. “Minimize a extração de recursos naturais.”
6. “Empenhe-se para prevenir desperdícios e resíduos.”
7. “Desenvolva e aplique soluções de engenharia, enquanto sendo consciente da geografia, aspirações e cultura locais.”
8. “Crie soluções de engenharia além das tecnologias correntes ou dominantes; melhore, inove e invente (tecnologias) para atingir a sustentabilidade.”
9. “Envolva ativamente as comunidades e interessados no desenvolvimento de soluções de engenharia.”

Os princípios propostos pela EPA apresentam algumas semelhanças com os princípios a serem propostos aqui. Mas os princípios listados acima têm um claro viés de comportamento, de atitude, frente ao trabalho do engenheiro, em geral. É preciso, juntamente com esta atitude, desenvolver princípios que estejam diretamente relacionados com as tecnologias a serem desenvolvidas e que, preferencialmente, possam ser convertidos facilmente em parâmetros quantitativamente mensuráveis.

Por fim, vale a pena mencionar os doze Princípios de Engenharia Verde (*Principles of Green Engineering*), desenvolvidos em Yale, no Center for Green Chemistry and Green Engineering (YALE, 2011). O centro, coordenado por Paul Anastas e Julie Zimmerman, desenvolve pesquisas, principalmente no campo da engenharia química, voltadas para a sustentabilidade. Os princípios propostos pelo centro são:

1. “Inerente, ao invés de circunstancial – materiais e energia que entram e saem do sistema devem ser tão inerentemente não perigosos quanto possível.”
2. “Prevenção, ao invés de tratamento – é melhor prevenir resíduos do que tratar ou limpar o resíduo depois de formado.”

3. “Projetar para a separação – operações de separação e purificação deveriam ser projetadas para minimizar o consumo de energia e o uso de materiais.”
4. “Maximize a eficiência – Produtos, processos e sistemas deveriam ser projetados para maximizar a eficiência de matéria, energia, espaço e tempo.”
5. “Puxados pelo que sai, versus empurrado pelo que entra – produtos, processos e sistemas deveriam ser puxados pelo que sai e não empurrados pelo que entra, através do uso de energia e materiais.”
6. “Conserve a complexidade – a entropia e a complexidade inseridas devem ser vistas como um investimento, quando são tomadas decisões de projeto em reciclagem, reuso ou deposição benéfica.”
7. “Durabilidade, ao invés de imortalidade – durabilidade definida, não imortalidade, deveria ser uma meta de projeto.”
8. “Atenda a necessidade, minimize o excesso – o desenvolvimento de soluções com capacidade ou capacidade desnecessária (por exemplo, um tamanho serve para tudo) deveria ser considerado um erro de projeto.”
9. “Minimize a diversidade de materiais – A diversidade de materiais em produtos multicomponente deveria ser minimizada, para estimular a desmontagem e a retenção de valor.”
10. “Integre fluxos de material e energia – o projeto de produtos, processos e sistemas deve incluir a integração e a inter-conectividade com os fluxos de matéria e energia disponíveis.”
11. “Projete para um uso comercial depois da vida útil – produtos, projetos e sistemas deveriam ser desenvolvidos para um desempenho comercial depois da vida útil.”
12. “Renovável ao invés de consumidor – as entradas de material e energia deveriam ser renováveis, ao invés de consumidores.”

Os princípios apresentados estão claramente focados em processos, talvez porque a área original do grupo seja engenharia química. Existe um forte viés de contemporização, de fazer o que é possível, dentro de uma estrutura de mercado existente. O princípio 9, particularmente, é oposto a um que será enunciado aqui, relativo à customização dos produtos.

Todos os esforços no sentido de elaboração de princípios, apresentados até agora, trazem pontos importantes. Muitos dos conceitos estão relacionados com aqueles que serão apresentados aqui, com um coincidente, de Moser, em particular: **coevolução**, embora com um foco de aplicação diverso e, neste caso, mais estrito. Os princípios gerais de Hahn também serão utilizados, como base para os três princípios básicos a serem propostos. Entretanto, alguns conceitos fundamentais estão ausentes em todos eles, como será visto nos princípios apresentados abaixo.

Para formar os princípios de sustentabilidade propostos nesta tese, foram enunciados, primeiramente, os conceitos subjacentes, formados a partir das listas de princípios apresentados pelos diversos autores.

4.2 CONCEITOS SUBJACENTES

Os pontos convergentes entre as diversas listas de princípios podem ser sumarizados no que se poderia chamar de conceitos subjacentes, que permeiam estas listas, com maior ou menor frequência. Eles são: eficiência (no uso de matéria e energia), reciclagem (da matéria que entra no sistema), sustentabilidade (no longo prazo), bio-soluções (inspiradas em organismos ou ecossistemas), complexidade (das soluções e das inter-relações) e, finalmente, integração (da tecnologia com outras dimensões). Estes conceitos são apresentados no quadro 7 (abaixo), na coluna da esquerda, ao lado dos conceitos das diversas listas, que se relacionam com cada um.

Quadro 7: Conceitos adjacentes encontrados nas diversas listas de princípios de sustentabilidade.

CONCEITO SUBJACENTE	Moser	Hahn	EPA	Anastas
<i>Eficiência (no uso de matéria e energia)</i>		Processo redutivo.	6) empenhe-se para prevenir desperdícios e resíduos; 9) crie soluções, melhore, inove, invente.	2) prevenção ao invés de tratamento; 3) projetar para a separação; 4) maximize a eficiência; 5) produtos puxados pelo que sai; 8) atenda a necessidade, evite o excesso.
<i>Reciclagem (da matéria que entra no sistema)</i>	3) ciclos de materiais.	Processo holístico.	3) use a abordagem de ciclo de vida; 6) prevenção de desperdícios e resíduos.	9) minimize a diversidade de materiais; 11) projete para um uso depois da vida útil; 12) renovável ao invés de consumidor.
<i>Sustentabilidade (no longo prazo)</i>	4) fluxo de energia solar; 9) durabilidade/sustentabilidade	Processo integrativo.	2) conserve e melhore os ecossistemas naturais; 4) assegure-se de que materiais e energia são seguros e benignos; 5) minimize a extração de recursos naturais.	1) materiais e energia inerentemente não perigosos; 7) durabilidade ao invés de imortalidade.
<i>Biossoluções (inspiradas em organismos ou ecossistemas)</i>	8) natureza dual dos sistemas vivos.	Processos holísticos, integrativos e redutivos.	3) use a abordagem do ciclo de vida	
<i>Complexidade (das soluções e das inter-relações)</i>	1) diversidade; 5) flexibilidade; 10) elementos caóticos como parte da natureza.	Processos holísticos.		6) Conserve a complexidade.
<i>Integração (da tecnologia, com outras dimensões, tais como cultura e economia)</i>	2) interdependência; 6) coevolução; 7) área ocupada.	Processos holísticos e integrativos.	1) desenvolva processos e produtos de forma holística; 7) soluções de engenharia com consciência da geografia, aspirações e cultura locais; 9) envolva ativamente as comunidades no desenvolvimento de soluções.	10) Integre fluxos de matéria e energia.

4.3 CONCEITOS ESTRUTURANTES

A busca do desenvolvimento sustentável na indústria de edificações requer que o enfoque de sustentabilidade seja operacionalizado através de um grupo de princípios básicos. Estes princípios foram chamados, aqui, de conceitos estruturantes, porque sua função é, exatamente, a de estruturar o campo de utilização do enfoque sustentável, na busca de soluções tecnológicas para a indústria de edificações.

Os conceitos estruturantes devem ser, ao mesmo tempo, claros e objetivos. Isso permitirá sua fácil tradução no processo de desenvolvimento de soluções tecnológicas para aquela indústria. Devem ser, também, suficientemente abrangentes, para englobar todos os aspectos relacionados com este objetivo.

Os conceitos apresentados aqui não são homogêneos em sua amplitude. Eles foram desenvolvidos a partir de uma grande variedade de fontes, que utilizaram diversos enfoques (arquitetônico, tecnológico, econômico, da teoria dos sistemas, dentre outros). Entretanto, isto não permite a ilação de que eles não possam ser reunidos, para formar uma visão consistente e significativa do que deverão ser as linhas mestras de um novo paradigma para a indústria de edificações, como um setor sustentável.

Os conceitos apresentados no quadro 8, chamados de conceitos subjacentes, serviram de base para a definição dos conceitos estruturantes, originalmente propostos por este autor e colaboradores, em um trabalho apresentado em 2009 (AZAMBUJA *et al.*, 2009). Estes conceitos foram desenvolvidos a partir de uma abordagem sistêmica, considerando-se a cidade como sistema e o meio-ambiente não urbano como seu entorno. Nesta abordagem, a tradução dos conceitos foi feita tomando como referencia a literatura, onde foram identificados conceitos que atendam as condições de generalidade e operacionalidade, necessárias para o desenvolvimento de novas soluções. A tradução dos conceitos é apresentada no quadro 8, abaixo.

Quadro 8: Tradução dos conceitos subjacentes em conceitos estruturantes.

CONCEITOS SUBJACENTES	CONCEITOS ESTRUTURANTES
Eficiência	Otimização
Reciclagem	Reciclagem
Sustentabilidade	Estado estável, mínimo aumento entrópico
Biossoluções	Desenho biologicamente inspirado
Complexidade	Estruturas multinível
Integração	Coevolução

Além dos seis conceitos estruturantes, apresentados acima, outros três foram acrescentados, para que as soluções desenvolvidas fossem totalmente compatíveis com a perspectiva de sustentabilidade. Estes três conceitos são: banimento de metais, emergência e desenvolvimento *bottom-up*. Eles foram identificados através da leitura da bibliografia, em diversas áreas relacionadas à sustentabilidade e ao desenvolvimento de soluções. Os nove conceitos estruturantes foram considerados como fundamentais, no sentido de que nenhum deles poderia ser automaticamente derivado de outros, isoladamente ou combinados, e cada um deles recebeu uma seção dedicada à sua análise. Os nove conceitos são: mínimo aumento entrópico, reciclagem, emergência, soluções biologicamente inspiradas, estruturas de alta energia, banimento de metais, estado estável, desenvolvimento *bottom-up* e coevolução. Os conceitos apresentados naquele trabalho estavam todos no mesmo nível hierárquico. Uma segunda formulação dos conceitos estruturantes, organizados hierarquicamente, é apresentada nesta tese.

Os conceitos estão inter-relacionados de diferentes formas e apresentam diferentes níveis de aplicabilidade, o que significa que alguns deles terão uma forma de aplicação direta no desenvolvimento de soluções de produtos e processos construtivos, enquanto outros terão uma influência mais indireta sobre as soluções e decisões de desenvolvimento. Espera-se que o seu uso combinado produza o que o EPA chamou de soluções holísticas. Muitas destas soluções não são viáveis neste momento, por diversas razões, tanto de ordem cultural, como econômica e tecnológica. Entretanto, em muitas universidades e centros de pesquisa, bem como na iniciativa privada, os resultados começam a surgir, no desenvolvimento de tecnologias, desde o nível de matérias primas, até o de planejamento urbano, que contemplam, em um ou mais aspectos, os princípios aqui apresentados. Para desenvolver estas tecnologias de forma integrada e eficaz, é necessário, antes, definir com

clareza os conceitos que permitirão a formulação de um novo paradigma. Assim, primeiramente, os conceitos serão descritos, seguindo-se uma discussão sobre as principais relações entre eles. Os conceitos foram organizados hierarquicamente e divididos entre conceitos básicos e aplicados. Os conceitos aplicados foram divididos conforme a sua aplicação, se ela estava relacionada com o meio ou com o próprio sistema. O quadro 9, com todos os conceitos, é apresentada abaixo, onde, aos nove conceitos originalmente apresentados, foram acrescentados outros. Cada conceito representa um princípio de sustentabilidade.

Quadro 9: Conceitos estruturantes apresentados de maneira hierarquizada.

CONCEITOS ESTRUTURANTES				
BÁSICOS	APLICADOS			
	NA RELAÇÃO COM O MEIO		NA FORMAÇÃO DA SOLUÇÃO	
	PRIMÁRIOS	SECUNDÁRIOS	PRIMÁRIOS	SECUNDÁRIOS
PERPETUAÇÃO	Mínimo aumento entrópico residual (MAER)	Reciclagem Estado estável Minimização de externalidades negativas Banimento de metais Biodegradabilidade	Durabilidade estendida	Resiliência Redundância Manutenibilidade Robustez
OTIMIZAÇÃO	Maximização dos benefícios obtidos no meio	Máximo uso de recursos locais Mínimo consumo de serviços da natureza	Eficiência	Mínimo consumo de energia Design biologicamente inspirado (DBI) Customização e personalização Desmaterialização
INTEGRAÇÃO	Coevolução	Sinergia Adequação cultural e econômica	Emergência	Estrutura multinível Processos bottom-up Multifuncionalidade

4.4 PRINCÍPIOS DE SUSTENTABILIDADE

A seguir, são discutidos os princípios estruturantes. Serão discutidos, primeiramente, os três princípios básicos: perpetuação, otimização e integração. A seguir, serão apresentados os princípios primários e os princípios secundários, na relação com o meio. Finalmente, são apresentados os conceitos primários e secundários, aplicados na formação da solução.

Sempre que um princípio for explicado, serão dados exemplos ilustrativos, tanto de soluções da engenharia humana, quanto de soluções naturais. Este exercício paralelo justifica-se pela constatação de que, tanto a engenharia humana, quanto a seleção natural, são regidas pelas mesmas necessidades básicas de perpetuação, otimização e integração. Portanto, os princípios que permitem aos seres vivos serem bem sucedidos, em seu esforço pela sobrevivência, também podem ser utilizados pelo homem. Como disse Janine Benyus, o homem pode se utilizar de 3,8 bilhões de anos de P&D da vida na Terra, aprendendo os princípios utilizados por 10 a 30 milhões de espécies bem adaptadas.

4.4.1 Princípios básicos

Os princípios básicos são conceitos genéricos e abrangentes, que expressam a ideia geral por trás dos conceitos mais específicos. Estes conceitos são complementares e devem ser utilizados dessa maneira. Esta complementariedade representa, tanto a noção de que os aspectos de produto que um conceito não abrange devem ser atendidos pelos outros, quanto a noção de que esses conceitos se modulam e se limitam mutuamente, nos diversos momentos dos processos de produção, uso e descarte das edificações. O conceito de limitação mútua é equivalente ao conceito de contradição, encontrado na teoria de TRIZ, de Altshuller (1998), o qual afirma que, em qualquer problema na engenharia sempre podem ser encontrados dois princípios que se contradizem. A solução dos problemas é sempre uma resolução desta contradição. Seguem, abaixo, alguns exemplos de contradições entre os três princípios básicos.

A contradição entre perpetuação e otimização emerge porque a otimização de uma solução poderia significar uma vida útil curta, ou por razões econômicas (um objeto descartável, por exemplo), tecnológicas (a evolução da tecnologia oferece novas soluções que substituem as antigas), ou estéticas (implica em novos modelos substituindo os antigos). A perpetuação, ao contrário, busca a máxima longevidade dos produtos.

A contradição entre otimização e integração surge porque a otimização de uma parte de um sistema poderia significar a sub-otimização do sistema, como um todo, enquanto a

integração impõe limites econômicos e tecnológicos na otimização de cada uma das partes, buscando a otimização do todo.

Finalmente, a contradição entre perpetuação e integração emerge da necessidade, na integração, de limitar a perpetuação de algumas partes, em alguns casos, chamadas de peças de sacrifício, em prol da perpetuação do conjunto. Isso ocorre, por exemplo, na utilização de zinco para revestir os componentes de aço (chapas ou perfis), na utilização de pintura para proteger a alvenaria e no uso de fusíveis para proteger motores e circuitos elétricos.

Por outro lado, os princípios básicos também apresentam complementaridade, que advém da relação sinérgica entre eles. Assim como no caso das contradições, as complementaridades ocorrem nas diversas etapas do processo de produção, uso e descarte das edificações. Seguem, abaixo, alguns exemplos de sinergia entre os conceitos.

A relação sinérgica entre perpetuação e otimização se revela na possibilidade de otimizar (minimizar) os consumos de recursos, tais como matérias primas (matéria, energia), mão de obra e terra, ao promover a perpetuação das edificações.

A sinergia entre otimização e integração ocorre em dois momentos: ao promover a multifuncionalidade de determinados componentes e elementos da edificação, com menor consumo de recursos (por exemplo, um vidro autolimpante), e na maximização da funcionalidade da edificação, ao eliminar a duplicação de funções entre os diversos componentes (por exemplo, ao eliminar o forro com funções de isolamento termo-acústico, no telhado Santa Fé, porque o telhado já cumpre esta função).

A interação sinérgica entre perpetuação e integração surge na equalização da vida útil dos diversos subsistemas, elementos e componentes da edificação, de maneira tal que não exista a prematura perda de funcionalidade de uma parte que possa comprometer a vida útil de outras partes ou da edificação, como um todo.

As interações apresentadas não pretendem ser exaustivas. Elas são apenas algumas das possibilidades demonstrativas, que emergem da utilização dos diversos princípios enunciados acima.

4.4.1.1 Perpetuação

O conceito de perpetuação refere-se à ideia de estabilidade, de continuidade, de permanência. Entretanto, esta permanência não significa eternização, não é um absoluto. A importância deste princípio está diretamente relacionada com o nível hierárquico

considerado; vale dizer, com o impacto que a permanência daquele nível hierárquico tem, dentro da estrutura mais geral. Já foi dito aqui que as estruturas físicas, tanto naturais, quanto antropogênicas, estão organizadas em vários níveis hierárquicos, com crescentes graus de complexidade. No ambiente natural, a biosfera é o nível hierárquico mais elevado, enquanto, no meio antropogênico, o nível hierárquico mais elevado é a própria civilização humana e, fisicamente, o ambiente construído global.

A perpetuação de um nível de maior complexidade pode ocorrer mesmo que partes da estrutura, em níveis menos complexos, cessem de existir. Na realidade, em muitos casos a perpetuação do nível mais elevado é viabilizada através da substituição/degradação/destruição de níveis inferiores. No ambiente natural, por exemplo, a morte de uma formiga, para defender o formigueiro, permite que este viva. No ambiente antropogênico, a substituição de um sistema hidrossanitário obsoleto permite que o edifício ganhe uma sobrevida e a queima de um fusível permite que o motor não sofra os danos de um aumento de corrente. O *retrofitting* verde propicia, inclusive, um aumento do desempenho do edifício, em relação à sua condição inicial (RUSSO, M. A. et al., 2009).

Na relação com o ambiente, a perpetuação significa manter o sistema o mais estável possível, perturbando ao mínimo o seu nível entrópico. Desta condição, emergem diversos outros princípios, dentre eles a reciclagem, como nos grandes ciclos de gás carbônico, oxigênio e água, na biosfera, que caracterizam a perpetuação de complexos sistemas de trocas, permitindo a continuidade dos sistemas na biosfera. No campo da edificação, a perpetuação nas soluções pode ser traduzida através de diversos conceitos, relacionados com a ideia de durabilidade estendida, tais como resiliência, robustez e redundância.

4.4.1.2 Otimização

A otimização é um dos conceitos basilares da engenharia. É também uma das características mais presentes nas soluções desenvolvidas pelos seres vivos, para desempenhar as funções necessárias à vida. Em relação ao meio ambiente, a otimização refere-se à maximização dos benefícios obtidos no meio. No ambiente natural, o significado desta maximização é a maior chance de sobrevivência, quer do ser individual, quanto da espécie. É a perfeita adaptação às fontes de energia, à cadeia trófica, à necessidade de reprodução. Na engenharia, significa, ao mesmo tempo, um menor impacto ambiental e uma redução no custo das soluções. A otimização é a obtenção do máximo de desempenho, com o mínimo de recursos. Algumas abordagens têm enfatizado a necessidade de redução do consumo para um quarto do consumo atual – o chamado fator quatro (WEIZSACKER et al., 1998), ou mesmo, para um quinto (WEIZSACKER et al., 2009) ou um décimo (WEAVER, 1997).

4.4.1.3 Integração

A integração ocorre em múltiplos níveis. O nível mais geral é a integração entre o ambiente antropogênico e o ambiente natural. A espécie humana criou, para suas colônias, ninhos de proporções gigantescas. Entretanto, estes ninhos (como todos os outros) não são autossuficientes, portanto não prescindem da interação com o ambiente à sua volta. O conceito de serviços da natureza tenta focar esta dependência, mas incorre em um enfoque utilitarista. Nesta tese, o autor advoga a visão de que o meio ambiente natural tem um valor em si mesmo, independente das funções que cumpre na sua interação com o sistema antropogênico. Isto significa que a preservação desse ambiente deve ocorrer sob quaisquer circunstâncias, mesmo em prejuízo da extensão ou intensidade de alguns serviços. A integração, portanto, visa a interação de dois sistemas complementares, de maneira a que ambos sejam preservados. Ou melhor, deve-se considerar todos os processos antropogênicos, vistos no capítulo 2 (item 2.4.3), como um segmento, um trecho dos ciclos mais amplos na biosfera. Devem, portanto, ao fazer parte deste ciclo, integrar-se a ele sem criar rupturas ou descontinuidades e com um mínimo de degradação no restante do ciclo.

4.4.2 Princípios aplicados

Os princípios aplicados são inspirados nos princípios básicos e seguem a mesma divisão funcional. Esses princípios têm a sua aplicação focada, ou na relação com o meio em que se encontra o sistema a ser desenvolvido, produzido ou analisado, ou na formação da solução propriamente dita. Esta solução pode estar definida em várias escalas espaciais, desde a escala dos componentes até a escala da edificação. Ela também pode ser definida em qualquer etapa do processo, desde a extração das matérias primas até o descarte da edificação após seu uso. Tanto nos casos da relação com o meio quanto nos casos de formação da solução, seguem válidas as premissas dos princípios básicos: os princípios são complementares e se modulam mutuamente. Ao longo do capítulo, serão feitas referências cruzadas entre os diversos princípios, de maneira a demonstrar sua interdependência e complementaridade.

4.4.3 Princípios primários aplicados na relação com o meio

São três os princípios: mínimo aumento entrópico residual, máximo benefício da interação com o meio e coevolução. Em comum, eles expressam a necessidade de uma interação que, ao mesmo tempo, permita o máximo benefício, com o máximo de preservação. Isto somente pode ocorrer se o meio e o sistema considerado, quer sejam, respectivamente, os meios natural e antropogênico, ou a cidade e o bairro, ou a rua e a edificação (ou uma

mistura destas escalas), forem desenvolvidos segundo os mesmos princípios de sustentabilidade. Por outro lado, a sustentabilidade somente pode ser assegurada através da coevolução do sistema e seu meio.

4.4.3.1 MAER – Mínimo aumento entrópico residual³¹

Na relação com o meio, o conceito fundamental que expressa a ideia de perpetuação é o Mínimo Aumento Entrópico Residual (MAER), significando que o nível entrópico do sistema não permanece aproximadamente constante após as transformações decorrentes da passagem, através dele, de matéria, energia e informação, advindas de atividades antrópicas. No caso específico da edificação, esta passagem refere-se a todo o processo construtivo, ou seja, desde a obtenção de matérias primas, até o descarte da edificação. Para compreender melhor o significado de MAER é necessário familiarizar-se com o conceito de entropia.

Entropia é um conceito do campo da termodinâmica. A entropia de um sistema está diretamente relacionada com a ideia de equilíbrio termodinâmico desse sistema, ou seja, quanto mais próximo do equilíbrio estiver o sistema, maior será sua entropia. O equilíbrio é atingido quando não existe mais energia disponível no sistema para a realização de trabalho (energia útil). De fato, a entropia pode ser definida como a incapacidade de a energia contida em um sistema realizar trabalho. A energia para a realização de trabalho pode estar na forma de energia térmica, radioativa, mecânica, química ou outra. Por exemplo, no caso da energia térmica, para que haja energia disponível é necessário que uma parte do sistema esteja a uma temperatura maior do que outra parte. No caso da energia mecânica, é necessário que uma parte do sistema possa se mover espontaneamente (que tenha energia potencial acumulada). No caso da energia química, é necessário que uma reação possa ocorrer espontaneamente (sem a doação de energia). Finalmente, no caso de energia radioativa, é necessário que átomos possam ter decaimento ou possam sofrer fusão nuclear. Todos esses tipos de energia estão disponíveis, tanto no meio ambiente natural, quanto no entrópico. O aumento de entropia tende a ocorrer sempre que uma dessas formas de energia estiver disponível.

A entropia também está associada à desordem de um determinado sistema. Ou seja, quanto maior a desordem, maior a entropia do sistema. O termo desordem é entendido, aqui, como o número de possíveis níveis de energia em que uma determinada partícula (molécula, átomo ou célula unitária de um cristal) do sistema se encontra. Isto porque, quanto maior a quantidade de energia contida em um sistema, maior o número de estados em que as suas

³¹ Não confundir com entropia residual, quando $T=0K$

partículas se distribuirão (ATKINS, 2007). A aplicação deste conceito pode ser vista no seguinte exemplo. Imagine-se dois sistemas exatamente com a mesma quantidade de moléculas da mesma substância. Para exemplificar, esta substância pode ser dióxido de carbono. No primeiro sistema, os átomos estão totalmente ordenados em cristais. No segundo, estão dispersos no estado gasoso. A entropia do primeiro sistema é muito menor que a do segundo, porque o primeiro é um sistema muito mais ordenado, o número de possíveis níveis de energia das suas partículas é muito menor (ATKINS, 2007). Este conceito pode também ser aplicado a todos os sistemas, incluindo seres vivos. Imagine-se como sistema uma floresta e a atmosfera em seu entorno. Os átomos das árvores e outros vegetais estão organizados em estruturas moleculares de celulose, hemicelulose, lignina e outras, de menor importância, em um estado sólido e razoavelmente organizados, enquanto as moléculas de gás da atmosfera estão em razoável desordem. Imagine-se, agora, que esta mesma floresta tenha sido queimada, formando um segundo sistema. Os átomos que antes estavam ordenados, agora estão presentes nos gases dióxido de carbono, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, água e outros de menor importância. Evidentemente, a entropia do segundo sistema é muito maior que a do primeiro, porque a desordem, em termos de níveis de energia possíveis é muito maior. Do mesmo modo, um sistema formado por um metal pesado, por exemplo, o mercúrio, que se encontra em um veio no subsolo, está organizado em cristais de óxidos ou sais daquele metal e sua entropia é baixa. Se este sistema for transformado em outro, em que o metal seja quimicamente isolado e espalhado em muitos sítios, como em lâmpadas fluorescentes, a desordem (os níveis possíveis de energia) aumentarão substancialmente, representando equivalente aumento de entropia. Ainda mais, se o mercúrio destas lâmpadas for disperso em muitos sítios, a entropia aumentará ainda mais.

A Segunda Lei da Termodinâmica, afirma que, se o sistema for mantido isolado, a tendência dessa variação é no sentido de aumento da entropia, até que o equilíbrio termodinâmico do sistema seja atingido. Isto é, um sistema tende, espontaneamente, a aumentar a sua desordem com o tempo. Como os sistemas normalmente considerados, como uma edificação, uma cidade ou a biosfera, normalmente não estão isolados, isso significa que eles estão constantemente trocando energia com o meio externo. Portanto, a entropia desses sistemas pode variar e, de fato, varia constantemente, mas não somente no sentido do aumento da entropia. Um sistema pode reduzir sua entropia, mas isto implica em uma alteração de estado entrópico (aumento entrópico) em algum outro lugar do universo (ATKINS, 2007). Isto deriva do fato de que, para que um sistema possa reduzir sua entropia, é necessária a realização de trabalho sobre este sistema. Este trabalho somente pode ser realizado com a utilização de energia. Os seres vivos conseguem reduzir a entropia dos

sistemas em que se encontram, porque organizam a matéria em seus próprios corpos. Eles produzem entropia negativa ou negentropia. Mantendo-se organizados, dissipam a energia que já realizou o trabalho em um processo dinâmico estável. Por isso, foram chamados, por Prigogine, de estruturas dissipativas (HART; GREGOR, 2005). Mas os seres vivos conseguem reduzir sua entropia através do aumento de entropia no seu meio. À exceção do homem e de alguns micro-organismos, que utilizam energia geotérmica, todos os outros seres vivos utilizam a energia solar para sua redução entrópica, diretamente ou através da cadeia trófica. A energia, depois de utilizada para a sua organização (e manutenção desta organização), é emitida na forma de calor (energia radiativa de baixa intensidade), de volta ao meio. O homem, entretanto, utiliza-se também de energia acumulada em fontes fósseis e radioativas de alta intensidade para organizar, não somente o seu próprio corpo, como também o seu entorno mais próximo. A edificação e a cidade, como um todo, são parte importante deste meio, que é organizado pelo homem. Se o sistema considerado for a cidade, o meio é o ambiente natural. Portanto, o homem causa uma variação entrópica em seu sistema e em seu meio, que pode ser tanto positiva, quanto negativa. Esse meio, entretanto, contém outros sistemas, com seres vivos que também buscam manter seu nível entrópico estável.

Quando ocorre uma variação entrópica positiva, ou seja, quando aumenta a desordem de um sistema que contém seres vivos, como uma floresta ou outro bioma, esse sistema precisa, em algum momento, retornar a algum valor próximo de seu nível entrópico original. Isso é obtido através de processos regenerativos, que ocorrem em função da resiliência do sistema (MIHELICIC; ZIMMERMAN, 2010). Entretanto, para que isso aconteça, duas condições devem ser observadas: as características do meio em que o sistema se encontra não podem ser modificadas além de determinada medida; e o grau de desordem do sistema, ou seja, a variação entrópica deve ser limitada, para não comprometer a sua capacidade de regeneração. A condição física de manter-se no mesmo nível entrópico é chamada de estado estável³². Ele ocorre não somente na cidade, mas em todos os sistemas que promovem sua própria sustentabilidade, obtida sempre através de um aumento entrópico fora das fronteiras do sistema. Portanto, isto também é válido para sistemas que se encontram dentro da cidade (tais como um edifício, uma árvore ou uma pessoa) e para sistemas fora da cidade.

A variação entrópica residual é aquela que permanece depois que o sistema passa por processos regenerativos, que tendem a reestabelecer o seu grau de organização original.

³² Tradução do termo steady-state.

Por exemplo, considere-se uma floresta como o sistema em análise. Ela mantém todos os seus processos energéticos, através da absorção da energia solar. Com isso, ocorre a organização de moléculas menores (gás carbônico, oxigênio e água, por exemplo) em moléculas maiores e também ocorre a desorganização de moléculas maiores, que são metabolizadas por diversos organismos e transformam-se novamente em moléculas de gás carbônico, oxigênio, água e outras. Uma parte da energia dessas moléculas é incorporada aos organismos vivos e o restante é reemitido ao meio, na forma de radiação infravermelha (energia de menor intensidade que a incidente). O sistema mantém-se praticamente no mesmo nível entrópico. Isso significa que não houve variação entrópica residual. Caso uma parte desta floresta sofra uma queimada, a quantidade de energia liberada para o meio ambiente varia substancialmente mais do que aquela que é absorvida no mesmo período. Conseqüentemente, o nível de desordem residual, vale dizer, o aumento entrópico residual do sistema, é muito maior do que no primeiro caso. Este aumento súbito de entropia residual dificulta enormemente a capacidade de sustentabilidade da floresta e de todos os seus processos energéticos.

Existem atividades humanas ligadas à produção e uso de edificações que causam variações entrópicas residuais muito mais extensas e permanentes do que queimadas. Essas variações são decorrentes de varias causas: uso de substancias orgânicas não biodegradáveis, substâncias tóxicas orgânicas e inorgânicas, minerais não metálicos e metais. De maneira geral, o conceito de aumento residual de entropia deve ser utilizado como um parâmetro para compreender, formular e avaliar as possíveis soluções para o ambiente construído, da obtenção de matérias primas, até o planejamento das cidades. Isto é, a compreensão da variação entrópica residual tem o objetivo de permitir avaliar quais soluções podem ser incorporadas pela indústria da construção, sob um paradigma de desenvolvimento sustentável. Este conceito poderoso pode ser utilizado como um parâmetro para a avaliação de processos produtivos e de seus resultados (CLEVELAND; RUTH, 1997). Ele também pode ser utilizado para minimizar as implicações negativas das variações que ocorrerem em função das soluções adotadas. Kigawa e Furuyama (2005) desenvolveram o conceito de coeficiente de entropia urbana, o qual tenta medir o grau de tensão entre a tendência da forma espacial da cidade de manter-se inalterada (uma cidade de rituais) e a necessidade de mudança, para permitir sua adaptação a novas atividades (uma cidade de jogos). Algumas outras aplicações encontradas na literatura mencionam o gerenciamento de recursos hídricos e de esgotos (LARSEN; GUJER, 1997), bem como de planejamento urbano e transportes (ALLEN, 2005).

Hoje e no futuro próximo, o principal locus de atividade da indústria de edificações é, indubitavelmente, a cidade (GRIMM et al., 2008). Por isto, ela foi tomada como o primeiro sistema a ser analisado do ponto de vista entrópico. Idealmente, a entropia da cidade deveria manter-se em um nível aproximadamente constante, sem variações substanciais, principalmente de aumento de entropia, de modo que ela pode manter-se organizada e viável. Entretanto, como foi visto, a tendência natural das cidades, assim como do universo, em geral, é aumentar seu nível entrópico. Para evitar este aumento dentro da cidade, todo o aumento de desordem da cidade é transferido para fora dela³³. Desta maneira, a organização da cidade é obtida através de um aumento da entropia fora de seus limites (o entorno do sistema).

Três são as maneiras de transferência do aumento entrópico para o entorno da cidade. A primeira consiste em realizar fora da cidade as atividades que causam aumento de entropia. Isto significa que, não somente a exploração de recursos naturais, tais como madeiras, minerais e minérios metálicos e, principalmente, seu beneficiamento, caracterizando as duas primeiras etapas do processo produtivo, conforme descrito em 2.4.3 (Processos produtivos), são conduzidas extramuros. Esta prática foi sendo acentuada à medida que o número de indústrias aumentava e os habitantes das cidades não toleravam mais a degradação (aumento entrópico) de seu ambiente urbano. Com a crescente intolerância ao aumento entrópico na cidade, as indústrias da terceira etapa dos processos produtivos – industrialização – também foram forçadas a se realocarem fora do perímetro urbano (MEMON, 2003; OKUBO; TOMIURA, 2010).

A segunda maneira de transferir o aumento entrópico da cidade ocorre através da remoção direta dos corpos que já não possuem valor de uso, porque sofreram transformações ao longo de sua vida útil, que os fizeram perder sua funcionalidade (por exemplo, madeira em decomposição). Esses corpos não reingressam no processo produtivo porque o custo das transformações necessárias para que reingressassem é maior que o custo necessário para obter outras fontes de matéria prima (por exemplo, árvores de reflorestamento). Evidentemente, o custo é sempre definido em um contexto econômico, jurídico e cultural. Economicamente, a incorporação do custo das externalidades, conceito que será visto mais adiante, altera o cálculo do custo. Juridicamente, a permissão ou vedação do descarte e o procedimento para este descarte limitam e modulam esta prática. Por exemplo, nos EUA muitas cidades estimulam intensamente a reciclagem de RCD (GRUZEN SAMTON, 2003) e algumas já proíbem o descarte de resíduos gerados durante a construção de uma edificação

³³ Para um tratamento matemático mais rigoroso do problema, aplicado em uma escala planetária, ver Kleidom e Lorenz (2004).

fora do perímetro do terreno onde ela se situa. Culturalmente, a aceitação da degradação do meio ambiente vem se reduzindo nas últimas décadas, à medida que a população ganha informação sobre questões ambientais, impondo restrições aos processos de alteração do nível entrópico do sistema e seu entorno.

A terceira maneira é via dispersão, no meio ambiente, das partículas geradas através dos processos produtivos. Essa dispersão ocorre por via aérea, hídrica, ou terrestre, dependendo do tipo de partícula considerada e do tipo de veículo que as dispersa. Nesse caso, o aumento entrópico ocorre, tanto na cidade, como no seu entorno.

Todos os aumentos entrópicos que são transferidos para fora da cidade têm o potencial de prejudicar a estabilidade entrópica dos sistemas localizados ali e, em alguns casos, de maneira mais permanente, ou seja, com variação entrópica residual.

4.4.3.2 Maximização dos benefícios obtidos no meio

Um campo importante de aplicação do princípio de otimização é a interação com o meio onde se encontra a edificação. Aqui, o termo meio refere-se, tanto ao meio natural, quanto ao meio antropogênico. Considerando a característica peculiar de imovabilidade da edificação, isso significa que as suas interações com o meio são mais previsíveis do que as enfrentadas por um produto móvel. Embora o meio (tanto antropogênico, quanto natural) seja mutável, esta variação é relativamente lenta e, em alguns casos (como ciclos naturais de dia/noite e estações), previsível. Isso permite que, tanto o processo de produção, quanto os processos de degradação (uso e descarte) do produto edificação possam apresentar características que aproveitem ao máximo os benefícios desse meio.

O aproveitamento pode ser realizado através de dois princípios secundários: máximo uso de recursos locais e mínimo consumo de serviços da natureza, que serão vistos em detalhe mais adiante. Embora esses princípios possam parecer contraditórios, eles são, na verdade, complementares. O primeiro enfatiza que, do total de recursos utilizados na produção, uso e descarte da edificação, a percentagem de recursos que vem da região onde se localiza a edificação deve ser maximizada. O segundo afirma que os serviços da natureza, que são utilizados nos diversos processos, devem ser consumidos com o máximo de parcimônia, de maneira a reduzir, ao máximo, a pegada ecológica da edificação.

Este princípio também estimula a máxima utilização de recursos que não trazem impacto ao meio ambiente, ao invés de recursos que geram alto impacto. Um exemplo seria a utilização de brisas para o resfriamento natural, quando as condições climáticas são favoráveis, ao

invés de ignorar a orientação da edificação e depender de sistemas de ar condicionado (MCLENNAN, 2004).

Considerando a edificação como o sistema, os benefícios podem ser divididos em entradas e saídas deste sistema. As entradas são as formas de energia e matéria disponíveis à edificação, que podem ser absorvidas por ela, e as saídas são as formas de energia e a matéria que é emitida, pelo sistema, para o meio. Como regra geral, a preferência de utilização deveria sempre ser de fontes mais próximas. Energias que chegam diretamente à edificação (as mais óbvias são solar e eólica) deveriam ser priorizadas. Da mesma maneira, matérias primas próximas à edificação deveriam ser utilizadas. Esta regra geral deve ser modulada por quatro fatores: econômico: custo de utilização das fontes mais próximas, em comparação com fontes mais distantes, levando-se em consideração os custos de externalidades; tecnológico: viabilidade de utilização dos recursos e intensidade deste uso; legais: possibilidade de apropriação dos recursos mais próximos; cultural: aceitação cultural da incorporação de sistemas de utilização de recursos locais, com especificidades, ao invés de recursos distantes.

4.4.3.3 Coevolução

A ideia de coevolução emergiu no desenvolvimento da Teoria Evolucionária de Darwin, sob o conceito de coadaptação (GOULD, 2002). Naquele contexto, coevolução significa um processo de contínuo e mútuo ajuste entre duas espécies, ou entre uma espécie e seu meio ambiente, no que é chamado de construção de nicho (LALAND; BOOGERT, 2008). Este fenômeno foi utilizado para descrever, não somente animais e vegetais, mas também o comportamento humano (ODLING-SMEE et al., 2000). Finalmente, o conceito foi apropriado por outras disciplinas, para descrever situações onde duas variáveis ou atores são mutuamente influentes, de alguma maneira se ajustando continuamente para adaptar-se às características da outra parte. Uma destas disciplinas é a interação entre indústrias que utilizam certo sistema tecnológico, bem como o fenômeno sociocultural que as circunda (FATAS-VILLAFRANCA et al., 2008). Outros estudos descrevem o comportamento coevolucionário entre certas tecnologias e os sistemas cultural, econômico e legal nos quais elas estão imersas, mostrando como eles têm evoluído em conjunto (GEORG, 1999). A tecnologia de edificação tem sido o foco de tais análises e autores têm mostrado que ela coevoluiu com estes sistemas (BARLOW; OZAKI, 2005). Ainda mais especificamente, a coevolução foi observada na relação entre a edificação baseada em desempenho e a inovação (BARRETT, 2005).

A coevolução é um conceito importante por duas razões: primeiro, ela pode guiar ou, pelo menos, pode auxiliar na análise do que tem sido chamado sistemas sócio-técnicos

(HOFFMAN, 2004), identificando as razões pelas quais certas tecnologias tem sido escolhidas sob certas condições socioculturais e econômicas. Segundo, ela permite antecipar quais tecnologias se ajustariam melhor em certas condições, orientando, assim, os esforços daqueles envolvidos no desenvolvimento de novas soluções, em áreas como a reciclagem de resíduos de habitações (ALEXANDER et al., 2009). Além disto, esta compreensão pode guiar a participação de pessoas e grupos interessados e criar as condições adequadas para a adaptação de novas tecnologias, que Frame e Brown (2008) chamaram de tecnologias pós-normais.

Especificamente na indústria de edificações, o presente estágio tecnológico atendeu às necessidades relacionadas à alta densidade dos ambientes urbanos, introduzindo e amadurecendo tecnologias como elevadores, fundações profundas e subsistemas estruturais independentes, permitindo e, mesmo, estimulando um maior desenvolvimento do paradigma urbano, nas suas dimensões sociocultural e econômica, que, por sua vez, estimularam a evolução destas tecnologias, em um processo dialético contínuo. Este processo é reforçado pela constatação de que as edificações cumprem a função de representação material de uma cultura, significando que a arquitetura e a tecnologia de edificações devem redefinir, mas não destruir, o delicado equilíbrio entre o uso responsável de recursos e aquela função (GERHARDT, 2009).

Por outro lado, novas tecnologias também exercem influencia nas dimensões sociocultural e econômica, transformando-as à medida que amadurecem, criando suas próprias expressões, como foi o caso dos automóveis e a eletricidade com corrente alternada, ou, no caso da indústria de edificações, a criação da parede-fachada, com o desenvolvimento de tecnologias para produzir chapas de vidro plano grandes e baratas, bem como o processamento e a extrusão do alumínio, embora todas estas tecnologias tenham sido viabilizadas em um tempo em que as externalidades geradas por elas simplesmente não eram computadas.

A coevolução das tecnologias de edificação deve ocorrer nos campos das matérias primas, componentes, elementos e subsistemas de edifícios, através da interação com as soluções nos espaços públicos e privados, quer seja na escala dos edifícios individuais, quer seja no conjunto da cidade. Entretanto, não existe atualmente uma metodologia disponível para lidar com a complexidade de uma solução que leve todos estes fatores em consideração, em um processo realmente coevolucionário. Ainda assim, “uma solução de engenharia ou de economia que seja cega às restrições éticas, morais, emocionais, legais ou institucionais, não é uma solução real. Entretanto, estas restrições tem frequentemente servido como

desculpas para engenheiros e economistas permanecerem ocupados, enquanto culpam outros por falhar em resolver o problema". (RUTH, 2006, p. 339).

4.4.4 Princípios secundários de perpetuação aplicados na relação com o meio

4.4.4.1 Reciclagem

Dado um sistema, caracterizado por fluxos de matéria, energia e informação, um processo é a soma de um certo número de passos sequencialmente realizados dentro dele. As sequências podem resultar em um processo aberto ou fechado. No processo fechado, ou cíclico, a matéria que flui através de uma dada sequência de passos retorna à sua condição inicial ao final do último passo. No processo aberto isto não acontece, ainda que matéria possa permanecer no sistema, ou em seu entorno, como resíduo (MCDONOUGH, W.; BRAUNGART, M., 2002) . O termo reciclagem está ligado à ideia de um processo fechado, ou cíclico, dentro de um sistema. Teoricamente, matéria e energia (em alguma extensão) poderiam ser recicladas (retornar ao início do ciclo). Entretanto, a reciclagem da matéria é a única que pode efetivamente ser perpetuada, pois parte da energia, inexoravelmente, se dissipa para o meio ambiente (usualmente como calor). A informação que permanece no sistema normalmente pode ser reutilizada sem alteração, bastando acessar a fonte da informação original (p. ex. genes).

A ideia de reciclagem implica em reversibilidade das transformações da matéria ou da energia, através de processos ocorrendo no próprio sistema ou em seu meio. Mas é muito importante levar em conta as escalas temporais dos processos de transformação e de reversibilidade considerados. Se a reversão de uma transformação demanda muito mais tempo que a transformação original, para efeitos práticos, a transformação não é reversível. Por exemplo, a constituição da madeira é um processo reversível através da biodegradação, porque a madeira retorna ao estado de gás carbônico, água e nutrientes que lhe deram origem, em um período de tempo compatível com o tempo da sua constituição. Já o processo de formação do polímero (bio-plástico) PEAD (Polietileno de Alta Densidade), desenvolvido pela Braskem, a partir de eteno obtido de etanol de cana-de-açúcar (BRASKEM, 2011), não pode ser considerado reversível por biodegradação, porque o tempo de retorno ao estado original de gás carbônico e água é muito maior (aproximadamente 1000 anos) do que o tempo de sua formação. Mas pode ser reversível por combustão, embora esta seja uma alternativa bastante questionada³⁴. Neste caso, o gás

³⁴ Ver a publicação online da ONG GAIA (GAIA, 2012).

carbônico inicia seu ciclo ao ser incorporado a uma planta de cana de açúcar, passa pelo álcool (etanol), que é transformado em eteno, que serve de matéria prima para o polietileno. Uma vez que o componente que contém o plástico perde seu valor de uso, ele pode ser simplesmente queimado, com o retorno do gás carbônico à sua forma original. Fechou-se o ciclo e a energia incorporada nas ligações químicas C-C e C-H pode ser reutilizada.

O conceito de reciclagem em processos fechados é central à ideia de sustentabilidade de um sistema. Embora um sistema que seja construído com base em processos abertos possa, teoricamente, ser sustentável, isto implicaria no consumo de quantidades de matéria e energia muitas vezes superiores às necessárias quando a estratégia de reciclagem já está presente. Para haver reciclagem a partir de processos abertos, o sistema precisaria receber, do entorno, recursos equivalentes aos consumidos e transferidos para fora do sistema, ou nele mantidos como resíduo.

A caracterização de um processo como aberto ou fechado depende dos limites arbitrados para o sistema. Um processo pode ser considerado aberto se os limites do sistema não incluem os passos para a reversão da matéria à condição original. Inversamente, este mesmo sistema será considerado fechado se estes passos forem incluídos. Por exemplo, uma cidade é considerada um sistema aberto em relação à produção de alimento; mas uma municipalidade (compreendendo a cidade e seu território rural) pode ser estruturada para ser fechada para fluxos de alguns elementos, embora não para todos (fósforo e cálcio, por exemplo, poderiam fazer parte de ciclos fechados, enquanto oxigênio, carbono e hidrogênio fariam parte de ciclos abertos, porque parte de seu ciclo é aéreo e está fora do território rural). Para o sistema Terra, é preciso considerar que o meio, para a questão da matéria, é o espaço cósmico e que, na prática, ocorre muito pouca troca de matéria do sistema com o meio. Isto significa que o sistema já contém toda a matéria efetivamente disponível. Esta é, na verdade, a principal causa da classificação de recursos como finitos. Caso houvesse acesso aos recursos do meio ampliado (cosmos), eles seriam infinitos.

Sumarizando, para que um processo seja considerado fechado ele precisa ter: 1) passos para a reversibilidade da matéria à condição inicial e 2) tempo de reversão compatível com o tempo requerido para que outros passos do processo sejam efetivados. Caso isto não ocorra, é um processo aberto, que irá, inevitavelmente, exaurir os recursos disponíveis (no nível em que o sistema foi definido).

Antes de analisar a reciclagem no ambiente construído, é interessante estudá-la no ambiente natural. As razões para isto são duas: entender como os seres vivos evoluíram ao longo de processos naturais de ciclos de organização da matéria em diferentes níveis,

mantendo, em cada ciclo, o mesmo nível de entropia de matéria organizada, quer seja orgânica ou inorgânica (conchas, espículas, ninhos, colmeias e outras estruturas de suporte da vida), sem aumentar a entropia do meio, enquanto produzem trabalho; e compreender como a reciclagem de produtos antrópicos pode ser realizada no ambiente natural, fazendo com que os processos produtivos humanos sejam um trecho de um ciclo maior, que também inclui processos naturais de metabolização de estruturas complexas, reincorporando-as nos ecossistemas, sem aumento de entropia.

Na natureza existe a reciclagem de curto prazo (RCP) – medida em anos, ou até menos – e reciclagem de longo prazo (RLP) – medida, pelo menos, em décadas, até milênios e mesmo milhões de anos. Por razões econômicas, a RCP é a mais importante no ambiente construído, porque a RLP não tem um impacto econômico significativo (KHANNA, 2003). Em condições apropriadas, a matéria orgânica, assim como a inorgânica, pode ser reciclada no curto prazo. Mas em termos de sustentabilidade, a RLP também é fundamental, porque define a real condição de sustentabilidade de um sistema no longo prazo, visto que a regeneração de alguns estoques dá-se apenas no tempo geológico (SUSLICK; MACHADO, 2003).

Entre as substâncias inorgânicas recicladas em RCP, os fluidos apresentam os maiores volumes. Os três fluidos com os maiores volumes em RCP são água (em todos os seus estados), dióxido de carbono e oxigênio (LOTKA, 1925). O nitrogênio também deve ser considerado aqui, já que faz parte de ciclos de aumento e redução de entropia do ar, embora tenha um volume consideravelmente menor e sua participação em ciclos, que envolvem matéria e energia na transformação de substâncias, não seja tão significativo. Os fluidos mencionados fazem parte de RCP em processos de produção e degradação de matéria orgânica, o que os torna fundamentais para o desenvolvimento de um paradigma que incorpore os chamados serviços da natureza, para a realização de alguns dos passos do ciclo. Os ciclos de matéria orgânica se dão com a participação de estoques globais destas substâncias. Ou seja, água, dióxido de carbono e oxigênio gerados pela atividade biológica são armazenados na biosfera (e além), em grandes volumes, que funcionam como pulmões destes processos cíclicos. Isto significa que, uma vez que cessam os processos que estabilizam a vida em um corpo, os produtos resultantes de sua degradação são parcialmente absorvidos por outros seres e são parcialmente incorporados nos grandes estoques, que vão alimentar todas as atividades orgânicas na biosfera, indiscriminadamente. Isto é possível somente porque todas as moléculas orgânicas são formadas a partir de grandes percentuais de um grupo muito pequeno de substâncias muito simples e abundantes, além de pequenos percentuais de um grupo variado de outras

substâncias e elementos químicos. Do ponto de vista entrópico, durante os ciclos orgânicos a matéria claramente acumula energia, enquanto reduz sua entropia (aumenta a ordem) e segue neste processo, até que o processo inicia sua reversão. A partir de determinado ponto, a matéria começa a doar novamente sua energia e, conseqüentemente, a aumentar sua entropia (desordem). Assim, o gás carbônico, por exemplo, entra nos processos de metabolismo orgânico das plantas como matéria prima e o carbono contido nele faz parte de moléculas de crescente grau de complexidade e organização. A partir de determinado ponto, esta complexidade inicia sua reversão e a molécula vai perdendo suas ligações endotérmicas (principalmente C-C e C-H) e começa a formar ligações exotérmicas (principalmente C-O). Ao final deste processo, a molécula original perdeu toda a energia acumulada e voltou ao nível entrópico inicial. O ciclo, então, está claramente associado a uma variação no nível entrópico, que vai no sentido oposto ao de acúmulo de energia. O ciclo completo ocorre porque, a cada passo, houve o reuso de moléculas para o aproveitamento da energia acumulada na primeira parte do ciclo. Este processo é facilitado porque outros organismos, quando encontram matéria com quantidades apreciáveis de energia disponível, consomem esta matéria para utilizar a energia nela contida. Esta atividade é muito mais recompensadora, do ponto de vista de obtenção de energia, do que extrair uma quantidade mínima de energia de substâncias inorgânicas, que (na média) estão muito mais próximas do ponto de máxima entropia. Então, a matéria orgânica é extremamente atraente, do ponto de vista da energia, como candidata à reciclagem. Como resultado, a reciclagem de substâncias orgânicas, mesmo no estado sólido, ocorre em uma velocidade muito maior do que a reciclagem de substâncias inorgânicas. Este fato pode e deve ser utilizado no desenvolvimento e utilização de substâncias biodegradáveis na produção de edificações.

Este conceito de reciclagem é totalmente diferente de um conceito em que um produto reciclado é constituído a partir de elementos cujos percentuais em massa são ínfimos na crosta terrestre, como os metais chamados terras raras. Quando o elemento não é abundante ou de fácil acesso, sua obtenção exige energia considerável, seja para a localização, extração, purificação, ou outra atividade necessária à sua utilização, incluindo sua reconcentração, após a dispersão decorrente de sua utilização anterior.

Os grandes estoques ou pulmões, sendo de fluidos gasosos, apresentam uma enorme vantagem sobre os líquidos e, especialmente, sobre os sólidos, que é a maximização de sua reatividade. Assim, o tempo de incorporação (reação química) de uma molécula gasosa em um processo orgânico é menor que o de uma molécula em estado líquido e muito menor do que quando no estado sólido. A mobilidade e reatividade dos fluidos são importantes,

porque permitem a utilização de princípios, como *bottom up* e eficiência, viabilizando processos que envolvem automontagem. A compreensão desses processos tem sido estudada em muitos centros de pesquisa, para a criação de novas tecnologias desenvolvidas a partir da escala molecular.

A RCP de matéria inorgânica implica na necessidade de uma entrada de energia de uma fonte externa ao sistema, visto que as substâncias inorgânicas seguem a tendência à máxima entropia e mais rapidamente chegam ao ponto de equilíbrio, ou seja, não têm energia armazenada para a realização de trabalho.

A RCP de matéria orgânica é levada a cabo por processos metabólicos dos seres vivos. Estes processos, ao contrário daqueles envolvendo matéria inorgânica, são caracterizados por não levarem a um aumento de entropia. Esta capacidade da vida de absorver energia com redução de entropia parece contradizer a segunda lei da termodinâmica. Este efeito, também chamado de Paradoxo de Schrödinger, foi exposto por este cientista em seu livro “*What is Life?*” (SCHRÖEDINGER, 1996). A explicação corrente mais aceita é a de entropia negativa (ROLAND-MIESZKOWSKI, 2010). Independentemente da causa, este fato traz importantes consequências para todos os processos que ocorrem na biosfera. A redução – ou, ao menos, a manutenção – do nível entrópico ocorre através de uma série de passos, que se iniciam com a absorção de fótons de alta energia que vem do sol e continuam com a utilização, por todos os organismos, de moléculas básicas muito similares. Os processos de reciclagem orgânica quebram as estruturas orgânicas, até o ponto onde estas moléculas básicas, como aminoácidos, ácidos graxos e glicose, possam ser reutilizados. Os compostos produzidos a partir delas (basicamente açúcares complexos, lipídios e proteínas) contêm quantidades consideráveis de energia acumulada em sua estrutura física, que pode ser utilizada para que os organismos permaneçam estáveis, longe do ponto de equilíbrio, ou seja, do ponto de máxima entropia. Então, este afastamento do ponto de máxima entropia é mantido às custas da energia que vem do sol (e, em pequena escala, da energia de origem geotérmica), de forma direta (via biossíntese) ou indireta (via alimentação), ou seja, energia provida pelo entorno (meio ambiente) do sistema (ser vivo). Portanto, para que internamente eles mantenham a estabilidade química e entrópica (auto-organização), o aumento de entropia que seu consumo de energia gera é transferido para o meio ambiente.

Sólidos constituídos por matéria inorgânica são, normalmente, reciclados no longo prazo (RLP). Este é o caso, por exemplo, da crosta da Terra, onde uma placa tectônica submerge sob outra e re-emerge, mais tarde, através de vulcões. A absorção de matéria inorgânica sólida por seres vivos também ocorre, mas de maneira muito lenta, de acordo com as suas necessidades específicas de obtenção de algumas substâncias (sais e óxidos) ou

elementos, incluindo quantidades ínfimas de metais. Como estas necessidades são muito pequenas, o processo de reciclagem de matéria inorgânica por seres vivos é muito lenta, já que ela não tem o atrativo do valor energético acumulado, como a matéria orgânica.

Outro aspecto básico da reciclagem é a escala onde o processamento ocorre. Na natureza, normalmente, a reciclagem, quer seja de matéria orgânica ou inorgânica, reduz as estruturas até o nível atômico ou molecular. Por exemplo, a reciclagem de água ocorre através da evaporação de cada molécula individualmente. A reciclagem inorgânica muitas vezes utiliza processos *bottom-up*. Isto significa que novos materiais e substâncias são organizados (montados) a partir no nível atômico. Alguns exemplos: a reciclagem da crosta terrestre mistura e funde as substâncias, permitindo a sua recristalização. Os cristais são formados no interior de rocha, que se solidifica, através da adição de cada átomo individualmente; as moléculas de água são individualmente adicionadas, até formar gotículas ou pequenos flocos; a água dissolve a terra, removendo íons ou lamelas nanoscópicas de argila e o vento também erode uma rocha, removendo partículas microscópicas, a cada vez. Evidentemente, em muitos casos também ocorre a reciclagem *top-down*, a partir de escalas maiores. Este tipo de processo é claramente presente em eventos destrutivos, como no caso de um deslizamento de terra, vulcões, enchentes e furacões.

A reciclagem orgânica também utiliza a abordagem *bottom-up*, combinada com processos *top-down*. Nos processos digestivos, as estruturas orgânicas são desorganizadas *top-down*, sendo, então, reorganizadas *bottom-up*, em estruturas complexas, a partir do nível atômico ou molecular. Esta combinação de processos pode servir de modelo para tecnologias de reciclagem, em que é necessário obter substâncias dissolvidas em meio fluido para serem utilizadas em processos de automontagem. Este é, na verdade, o caso do cimento e do gesso, mas a automontagem nesses casos ocorre em todo o corpo simultaneamente, não permitindo a organização da matéria em diversos níveis hierárquicos.

Processos *top-down* são destrutivos, porque a velocidade de aumento entrópico (transferência de energia) é muito alta, impedindo a possibilidade de organização da matéria em alguma forma de padrão reconhecível. Nestes processos, a súbita mudança no nível de energia admite qualquer resultado, dentro de uma vasta gama correspondente ao novo nível de entropia do sistema considerado. Por isto, uma avalanche não produz algo reconhecível como tendo sido construído. Por outro lado, seria impossível criar flocos de neve na mesma velocidade com a qual um vulcão expela lava. A formação de padrões passíveis de reconhecimento demanda tempo, o qual não existe quando grandes quantidades de energia

são trocadas em um curto período. Estas questões serão essenciais quando forem discutidos os princípios de produção *bottom-up*, vis à vis produção *top down*.

O conceito de reciclagem tem sido aplicado de forma bastante imprecisa. Muitas vezes, o que se nomeia reciclagem é apenas reuso. A diferença entre estes dois conceitos – reciclagem e reuso – é importante porque o reuso não tem o mesmo grau de comprometimento com a ideia de perpetuação – por exemplo, o reuso de resina PET, obtida a partir da garrafas para a fabricação de utensílios domésticos – enquanto que a reciclagem não teria significado sem a ideia de perpetuação de ciclos.

A reciclagem no ambiente construído pode agora ser estudada, tendo como referência a reciclagem no ambiente natural. O conceito de reciclagem tem sido usado na indústria da construção de forma imprecisa. Alguma reciclagem de energia ocorre nos diversos processos industriais de produção de materiais, limitada, sempre, pela segunda lei da termodinâmica. Em relação à matéria, a maioria das atividades da indústria classificadas com reciclagem é, na verdade, simples reuso de materiais e – menos frequentemente – de componentes. Isto porque elas não atendem à premissa básica da reciclagem, que é a perpetuação dos ciclos, essencial para o conceito de sustentabilidade. Os processos industriais erroneamente chamados de reciclagem de subprodutos industriais ou, como eles têm sido chamados hoje, coprodutos, é de fato o reuso destes produtos. Esta possibilidade de uso tem sido extensivamente estudada sob o conceito de ecologia industrial (RUTH, 2006), onde os subprodutos (anteriormente chamados de resíduos) de uma indústria são utilizados como matérias primas de outra. A indústria de materiais de construção (especialmente do cimento) e, em menor escala, a indústria da construção (incluindo-se a de edificações), tem utilizado este conceito de forma crescente, de maneira a reduzir seus custos. Também é importante mencionar o conceito de reuso, na indústria da construção, onde componentes são utilizados para o mesmo propósito (BREWER; MOONEY, 2008). O problema, aqui, é o mesmo do reuso com diferentes propósitos: não existe preocupação com a perpetuação dos ciclos, somente com a redução da velocidade de aumento entrópico.

O conceito de reciclagem requer duas condições, para ser utilizado e ter um significado para o meio ambiente: que a reciclagem aconteça no curto prazo (RCP) e que a nova energia utilizada para completar o ciclo seja a mínima possível. A extensão do ciclo não é relevante. Consequentemente, ele pode incluir tantos passos quantos forem necessários. Do mesmo modo, o processo pode incluir tanto atividades humanas quanto naturais (os chamados serviços da natureza, discutidos adiante), de maneira que os dois sistemas (antropogênico e natural) possam trabalhar numa interação simbiótica. De fato, existe uma alta probabilidade

de que atividades do sistema natural sejam não somente benéficas, mas uma condição necessária para que seja atingido o mínimo aumento entrópico no processo.

4.4.4.2 Estado estável

O estado estável é a condição onde os fluxos básicos de um sistema permanecem constantes e o sistema pode perpetuar seus processos, sem flutuações significativas em suas funções. Aqui, o conceito de estado estável será discutido em termos econômicos, físico-químicos e ambientais.

Em economia, o estado estável, em um período de tempo, é identificado com uma situação em que as variáveis macroeconômicas permanecem, essencialmente, sem alteração pelo período considerado. Consequentemente, em uma economia em situação de estado estável, o crescimento econômico não é possível através do uso da mesma tecnologia durante o período considerado, mas é totalmente compatível com o desenvolvimento econômico associado com o desenvolvimento tecnológico. Nesse caso, o desenvolvimento econômico é medido pelo aumento de bem estar da sociedade, que deve ocorrer sem o correspondente aumento de consumo de materiais e energia. Esse processo é chamado de dissociação (decoupling) entre aumento da prosperidade e aumento do fluxo de insumos (UNEP, 2011). Obtém-se, assim, um aumento do bem estar social e crescimento econômico devido ao aumento de eficiência no uso dos mesmos recursos (VICTOR; ROSENBLUTH, 2007). Este argumento vai ao encontro da Nova Teoria do Crescimento (New Growth Theory), desenvolvida na década de 1990 (CORTRIGHT, 2001), e é totalmente compatível com os conceitos de desmaterialização (item 4.4.7.4) e multifuncionalidade (4.4.8.3). Uma situação econômica de estado estável traz duas consequências importantes. Primeiro, sua continuação, no longo prazo, implica que ela dependerá exclusivamente de recursos renováveis para as atividades econômicas. Segundo, que a reciclabilidade de recursos precisa ocorrer no curto prazo (RCP), exceto quando o nível de consumo de um recurso, em um período razoável, é apenas uma pequena fração do estoque total disponível do recurso (por exemplo, o oxigênio pode ser reciclado muito lentamente, a partir das moléculas dos óxidos metálicos e não metálicos formados naturalmente, porque a quantidade de oxigênio disponível na atmosfera é mais que suficiente para sustentar todas as atividades biológicas aeróbicas). Evidentemente, seria um equívoco grosseiro imaginar que uma situação de estado estável seria compatível com a ideologia de consumo (PRINCEN, 1999) que, atualmente, é hegemônica.

Tecnologias adequadas para serem empregadas em uma condição econômica de estado estável devem atender às duas consequências, ou condições, mencionadas acima. O conceito de recursos considerados aqui aplica-se à energia, recursos naturais (produtos e

Incompatibilidade entre o paradigma atual da construção e princípios de sustentabilidade: proposição de novo paradigma

serviços), trabalho, materiais e capital. O trabalho e o capital são essencialmente antropogênicos e deveriam, em um primeiro momento, ser considerados sempre como disponíveis e renováveis. Energia, recursos naturais e materiais são os recursos mais sensíveis e aqueles que tendem a ser restrições limitantes a alguns níveis de atividade ou opções tecnológicas. Desde que os recursos naturais são, por definição, o recurso inamovível e inexpandível, também deveria ser dito que, em uma condição de estado estável, fluxos de matéria e energia, extraídos dali para o ambiente antrópico, deveriam ser mantidos em quantidades constantes; enquanto que fluxos no sentido inverso, ou seja, para fora desse ambiente antrópico, deveriam ser compatíveis com a extensão e capacidade metabólica do ambiente natural (HAWKEN et al., 2010). Dito de outra forma, seria essencial manter a entropia da terra em nível o mais constante possível. Entretanto, livros-texto de economia insistem em focar apenas no trabalho e capital, como os recursos que devem receber atenção (RUTH, 2006).

Embora o estado estável seja o único cenário possível no longo prazo, todas as forças econômicas atuando hoje comportam-se como se o crescimento eterno e, ainda pior, o crescimento acelerado (já que uma percentagem fixa de crescimento é uma progressão geométrica, e, não, aritmética) fosse a condição futura mais viável e interessante. Tecnologias desenvolvidas para aplicação em crescimento acelerado podem não ser viáveis em uma economia de estado estável. A razão para isto é que recursos têm valores relativos completamente distintos nestas duas situações, fazendo com que tecnologias, viáveis em um cenário, possam não sê-lo no outro. Economias de escala, por exemplo, são muito mais limitadas em um estado estável.

Além disso, metais, outros elementos escassos e petróleo são recursos finitos, sendo intensiva e extensivamente usados hoje. O caso dos metais será discutido mais adiante neste trabalho. Em uma economia de estado estável, as tecnologias adequadas fariam o seu uso ser extremamente parcimonioso e todos os processos iriam considerar, acima de tudo, problemas relacionados com o aumento de entropia causado. O uso de energia também deve ser considerado. Os fluxos de energia também devem ser considerados como um determinante importante da definição de tecnologias (HORNBORG, 1998). Processos com alta intensidade energética são preferidos quando combustíveis fósseis são utilizados. Entretanto, se somente a energia solar (em suas diversas formas) fosse considerada, tecnologias com grande eficiência, utilizando baixa intensidade energética, seriam as preferidas.

Soluções tecnológicas são moldadas pelas condições econômicas existentes. E estas condições estão mudando em um ritmo acelerado (AYRES, 2006), obrigando a busca de

novos caminhos tecnológicos, compatíveis com um fluxo mais estável de matéria e energia, bem como de uma disponibilidade finita de terra. Fala-se, inclusive, em uma Revolução de Sustentabilidade (MIHELIC; ZIMMERMAN, 2010). Ambientalmente, uma condição de estado estável representa um fluxo constante de energia útil para dentro dos sistemas antrópicos e de energia radiante de baixa intensidade, para fora, bem como um fluxo circular constante de matéria entre os sistemas antrópico e natural. Em termos de energia, este fluxo para dentro dos sistemas antrópicos pode ser de diversas formas de energia: química (substâncias que contenham ligações formadas por reações endotérmicas); radiante (fótons de alta energia, da radiação solar); elétrica (através da transformação da energia cinética dos ventos, marés, diferenças de temperatura da água dos oceanos, dentre outras) ou térmica (geotérmica). O fluxo para fora dos sistemas antrópicos pode ser através de energia radiante de baixa intensidade (luz visível e infravermelho, bem como de ondas de baixa frequência para comunicação) e energia contida em estruturas de alta energia (discutidas anteriormente). Em termos de matéria, os fluxos para dentro dos sistemas antrópicos poderão ser de substâncias e estruturas com baixa entropia (alimentos, estruturas físicas orgânicas como, por exemplo, fibras vegetais), bem como de substâncias com alta entropia, como gás carbônico, água e oxigênio. A matéria que sai dos sistemas antrópicos poderá ter alta entropia (já citadas), ou baixa entropia, na forma de estruturas de alta energia, que foram desativadas. Estas estruturas de alta energia deverão ser metabolizadas no ambiente natural, mas em volumes compatíveis com as capacidades destes ambientes, de maneira perpétua. Além disto, para permitir que o ciclo seja completo em curto prazo (RCP), a disponibilidade de matéria pelo ambiente natural deve contar com o concurso de processos biológicos. Como dito anteriormente, a matéria que deixa os sistemas antrópicos deve conter energia suficiente para pagar pelos serviços de metabolização que os sistemas naturais farão.

4.4.4.3 Minimização das externalidades negativas

Uma externalidade, como o conceito foi expresso por Pigou (1932), é caracterizada pela diferença entre o custo pago (ou o benefício usufruído) pelo agente que adquire um bem e o custo (ou benefício) gerado por esse bem para a sociedade, como um todo. Esta diferença significa que parte do custo (ou, inversamente, do benefício) de produção do bem não foi pago (ou, inversamente, recebido) pelo agente, mas pela sociedade como um todo. Quando existe um custo para a sociedade, diz-se que a externalidade é negativa. Quando existe um benefício, diz-se que ela é positiva. A poluição gerada em um processo industrial claramente gera custos para a sociedade. Este aumento de entropia na atmosfera pode ser contabilizada em termos monetários, ou não. Se ela não o for, pode ser caracterizada como uma externalidade negativa. Por outro lado, a plantação de uma floresta para obter madeira

de reflorestamento em uma área degradada por superexploração agrícola traz externalidades positivas, porque ajuda na preservação de fauna e flora, absorve dióxido de carbono e retém água, entre outros benefícios.

A existência de externalidades negativas em um processo distorce o processo decisório se este processo está baseado em valores monetários (HANSSON; WACKERNAGEL, 1999). Ela também promove a acumulação de um débito de sustentabilidade que, em algum momento, deverá ser pago. Para reduzir essa acumulação, deve ser buscada a minimização das externalidades, em todos os processos antropogênicos.

A precificação das externalidades, como forma de desestimular a sua ocorrência, traz um problema. A mensuração correta do custo de uma externalidade seria, teoricamente, a restauração do sistema anterior à ocorrência da mesma. Entretanto, esta restauração deveria considerar, não somente o custo direto da mobilização de matéria e energia, mas também as externalidades que esta mobilização causaria. Tais externalidades, novamente, deveriam ser contabilizadas juntamente com o custo para repará-las, mas para tanto, novas externalidades seriam incorridas, em um processo de regressão infinita (EKINS, P. et al., 2009). Isto significa que a utilização de tecnologias que causam externalidades implica em custos para a sua reparação que podem ser muito mais altos do que aparentam. A única maneira de evitar esta cadeia infinita de reparações é a adoção de tecnologias cujas externalidades possam ser absorvidas dentro dos sistemas naturais, ou seja, que causem MAER.

Em termos econômicos, as externalidades devem ser computadas em todos os processos, inclusive na reciclagem; devem ser expressas em termos monetários e ser debitadas para quem as gera. É preciso notar, entretanto, que o custo das externalidades não é constante, pois à medida que alguns sistemas naturais chegam ao seu limite, o custo marginal de uma unidade de serviço natural aumenta exponencialmente. Por exemplo, a poluição causada por um processo industrial em um curso d'água tem um impacto relativamente pequeno se o ambiente natural conseguir neutralizar a poluição, sem um impacto ambiental significativo. Porém, à medida que a carga poluidora aumenta, os seus efeitos começam a ser sentidos de maneira mais intensa e mais prolongada, até o ponto de inflexão, em que a poluição começa a prejudicar a capacidade do curso d'água de neutralizar a poluição. Neste momento, o custo da externalidade aumenta subitamente e o dano de cada unidade de poluição passa a afetar proporcionalmente mais pessoas. Este tipo de comportamento é típico de sistemas complexos, que apresentam resiliência e robustez.

Os governos têm um papel fundamental na internalização de externalidades, através da implementação de leis e normas que obrigam as empresas e instituições a considerá-las em seus custos. Entretanto, as próprias empresas podem tomar a iniciativa de internalização, ao menos em simulações de custos, de maneira a direcionar seus esforços no sentido de desenvolver soluções com a menor incidência (e custo) de externalidades possível.

Na indústria de edificações do paradigma atual, as externalidades surgem em todas as etapas do processo de produção. Algumas destas externalidades podem ser minimizadas ou eliminadas mais facilmente que outras. Por isso, a indústria deve estar atenta e avaliar cada etapa, na busca de menor impacto social e ambiental.

4.4.4.4 Banimento de metais

O banimento de metais, de todos os processos e produtos envolvendo a indústria de edificações, parece radical à primeira vista e existem alguns defensores respeitáveis da reciclagem de metais (GLEICH, 2006), mas existem três importantes considerações a serem feitas a favor do banimento de metais. Primeiro, existe o problema da exaustão dos depósitos de metais com concentrações altas o suficiente que permitam sua extração de uma maneira economicamente viável. Segundo, existe o problema do impacto sobre o meio ambiente causado por metais (GUINÉE et al., 1999). Terceiro, existe o problema de consumo de energia. Metais requerem grandes quantidades de energia para serem processados e reprocessados (incluindo sua reciclagem). Estes problemas são particularmente importantes para a indústria da construção, porque ela é uma das maiores consumidoras de matérias primas e, conseqüentemente, de metais. A construção de edificações, especificamente, consome um terço do alumínio e metade do aço produzido no mundo (UNEP, 2011).

O primeiro problema refere-se ao fato bem conhecido de que metais são recursos não renováveis e a relação entre as reservas dos diversos metais e suas respectivas taxas de extração, projetada para o futuro, demonstram que as reservas serão esgotadas rapidamente, com a vida útil dependendo da taxa de crescimento do consumo. Como pode ser visto na tabela 1, abaixo, publicada pela OECD em 2008, sem aumento no ritmo de extração de jazidas, apenas as reservas de ferro e alumínio terão vida útil maior do que cem anos. Para um aumento de consumo de 2% anuais, nenhum metal, dentre os de maior consumo industrial, tem reservas com vida útil maior do que cem anos. Finalmente, se a taxa de aumento de consumo for de 5%, nenhum metal terá jazidas com vida útil maior do que cinquenta anos (OECD, 2008). Sobre os números apresentados na tabela 1, algumas considerações devem ser feitas. Primeiro, os valores de reservas consideraram todas as reservas conhecidas, independente do grau de concentração de minério. Segundo, a

Incompatibilidade entre o paradigma atual da construção e princípios de sustentabilidade: proposição de novo paradigma

exploração de jazidas obedece uma ordem de prioridade, que está diretamente relacionada com o custo de extração; ou seja, quanto menor o custo, maior a preferência de exploração. Isto significa que as jazidas com maior custo deverão ser exploradas à medida que as de menor custo forem sendo esgotadas (UNEP, 2011). Terceiro, existe uma tendência a aumentar o rigor com relação ao impacto ambiental causado pela exploração de jazidas; vale dizer, as externalidades da produção de minério e de metal passam a ser incorporadas no custo, aumentando-o. Quarto, a taxa de extração tende a ser incrementada, em função do crescimento acelerado de grandes consumidores, como China, Índia e Brasil. Em resumo, a tendência é de aumento no preço dos minérios e metais, o que já vem ocorrendo desde 2002 (UNEP, 2011).

Tabela 1: Vida útil das reservas dos principais metais. (Fonte: OECD, 2008)

Minérios metálicos ^a	Reservas (toneladas) 1999	Produção primária anual média (toneladas) 1997-99	Vida útil, em anos, a três taxas de crescimento na produção primária ^b			Crescimento anual médio na produção 1975-99 (%)
			0%	2%	5%	
Alumínio	25 x 10 ⁹	123,7 x 10 ⁶	202	81	48	2,9
Cobre	340 x 10 ⁶	12,1 x 10 ⁶	28	22	18	3,4
Ferro	74 x 10 ¹²	559,5 x 10 ⁶	132	65	41	0,5
Chumbo	64 x 10 ⁶	3,07 x 10 ⁶	21	17	14	-0,5
Níquel	46 x 10 ⁶	1,13 x 10 ⁶	41	30	22	1,6
Prata	280 x 10 ³	16,1 x 10 ³	17	15	13	3,0
Estanho	8 x 10 ⁶	207,7 x 10 ³	37	28	21	-0,5
Zinco	190 x 10 ⁶	7,75 x 10 ⁶	25	20	16	1,9

Notas: (a) Para metais que não o alumínio, as reservas são medidas em termos do conteúdo de metal. Para o alumínio, as reservas são medidas em termos do minério bauxita;

(b) Com a produção e padrões de consumo, tecnologias e reservas conhecidas correntes;

(c) Os valores de vida útil foram calculados antes que os valores das reservas e de produção média fossem arredondados. Como resultado, as expectativas de vida em anos (colunas 4, 5 e 6) podem apresentar pequeno desvio em relação àqueles derivados das reservas e produção média (colunas 2 e 3).

No cenário descrito e dada a característica da construção de trabalhar com grandes volumes e a um custo muito baixo (como foi discutido na Introdução deste trabalho), o banimento de metais da construção não será uma apenas um ganho tecnológico e, muito menos, uma conveniência ambiental. Será, antes, uma imposição do mercado. Na verdade, parece claro que o primeiro setor a ter seu acesso ao consumo de metais bloqueado pelo

aumento dos preços será o da construção civil. No caso do ferro e do alumínio, essa pressão por substituição de metais será postergada, porque suas reservas são muito altas. Inclusive, à medida que outros metais forem ficando inviáveis do ponto de vista de custo, haverá um natural deslocamento, por substituição, para estes dois metais. O caso mais evidente, e que já ocorre, é o uso de alumínio na produção de fios e cabos elétricos e o uso de aço em dobradiças e maçanetas, que antes eram produzidas com latão ou bronze. Além dessas substituições entre metais, outros materiais não metálicos também tendem a substituir os metais, notadamente os plásticos. Um exemplo é a utilização de tubos plásticos para as tubulações de água quente nas edificações, em substituição ao cobre, e o uso de PVC, em calhas que antes eram produzidas com chapas zincadas. Evidentemente, o uso de plásticos, nesses casos, é viabilizado por uma questão estritamente econômica, sem levar em consideração o fato de que sua matéria prima – o petróleo, no caso de plásticos de origem sintética, também não é um recurso renovável, cuja tendência é de aumento de preço à medida que as reservas se aproximarem do esgotamento.

A reciclagem de metais certamente tem um impacto positivo, tanto no aspecto de escassez de reservas, quanto no aspecto de impacto ambiental. Entretanto, ela é confrontada por dois fatores limitantes. Primeiro, o uso de metais faz com que a sua concentração sobre a superfície da terra tenda a homogeneizar-se. É o fenômeno de dispersão, discutido no capítulo 3. Portanto, para concentrar novamente os metais, as atividades de coleta e transporte devem ser patrocinadas por interesse econômico, por consciência ecológica, ou por imposições legais. Segundo, os metais, muitas vezes, são utilizados em ligas com as mais variadas composições ou suas sucatas são misturadas. Essas ligas e misturas interferem no comportamento e, portanto, no desempenho dos metais, para algumas aplicações que exigem ligas com composição precisa (NAKAMURA et al., 2012).

Além disso, a reciclagem é sempre incompleta. Os percentuais podem variar bastante, mas para alumínio, por exemplo, as melhores percentagens de coleta e reciclagem giram em torno de 90%, no Japão (OLMSTED, 2007) e no Brasil (VERRAN, 2007). Para o ciclo do cobre, os números são essencialmente os mesmos. Em 1994, a Europa enviou, para aterros, aproximadamente 13,7% de todo o cobre utilizado (RECHBERGER, GRAEDEL, 2002).

Estes valores parecem bastante interessantes, mas isto significa que nos países com as melhores práticas de reciclagem, sempre haverá algo em torno de 10% a 15% que será perdido, a cada ciclo. Em outras palavras, depois de 7 a 10 ciclos, uma carga completamente nova de metal é necessária para repor o que foi perdido, mesmo considerando as melhores práticas de reciclagem dos metais mais intensamente coletados,

como o alumínio, coleta esta que é motivada pela diferença de energia gasta para produzir, a partir da bauxita, ou a partir de alumínio usado (20 para 1).

Os números de reciclagem dos diversos metais, em todo o mundo, indicam percentuais bem menores do que os apresentados acima. No caso do complexo ferro-aço, por exemplo, no ano 2000 a Europa consumia 120 Mt (milhões de toneladas) de novo material vindo de minérios e, após exportar 71 Mt (sobre as quais não tinha controle), lançava no ambiente 29 Mt (27Mt próprias e 2Mt da tecnosfera do resto do mundo). Isto significa um percentual de descarte para o meio ambiente de 24%, ou seja, quase um quarto do que entrava em cada ciclo era perdido. Evidentemente, em países menos desenvolvidos e com menor disciplina ambiental, estes valores são maiores (OECD, 2008).

A devolução, para o meio ambiente, de uma parte significativa da produção de metais, é uma parte do segundo problema referido: o impacto ambiental causado pela utilização de metais. Este impacto pode ser identificado em quatro importantes momentos: na extração, no beneficiamento e produção, no uso e no descarte.

Os problemas de poluição na extração referem-se, essencialmente, ao impacto sobre o terreno onde ocorre a extração. Dependendo do tipo de mineração, a remoção de vegetação e formação de vales é extensiva, como visto na figura 24, com fotos aéreas de minas de extração de cobre e ferro.

Além disto, quando a mina é a céu aberto, a lavra exige a remoção de grandes quantidades de terra e rocha, que se depositam sobre o meio ambiente, sendo lixiviadas e causando assoreamento e, em alguns casos, contaminação de mananciais de água por metais pesados (UNEP 2011).



Figura 24: Impacto ambiental de minas. Esquerda: mina de cobre em Berkeley, Montana, USA (Fonte: ATLAS OBSCURA, 2011). Direita: Mina de ferro em Tinden, Michigan, USA (Fonte: PANORAMIO, 2011).

O beneficiamento do minério e a reação de redução do metal utilizam diversas tecnologias, com impactos variáveis sobre o meio ambiente. Este impacto vem de duas fontes: a energia consumida e os resíduos gerados. Metais consomem grandes quantidades de energia (UNEP, 2011) e, no caso do ferro, esta energia é fornecida diretamente por combustíveis fósseis (carvão, gás e óleo combustível) ou por eletricidade (que é obtida, em grande porcentagem, pela transformação de combustíveis fósseis). O ferro é reduzido com a oxidação do carvão (reação de substituição). O carvão mineral causa danos ao meio ambiente similares aos das minas de metais a céu aberto. O carvão vegetal é obtido através de corte de árvores em grandes volumes, muitas vezes de forma ilegal. Segundo Monteiro, da UFBA, 57,5% da madeira extraída na Amazônia Oriental brasileira é ilegal. Ela alimenta as carvoarias para a produção de carvão utilizado na fabricação de ferro gusa (CAMARGO, 2006). Além disto, os resíduos podem ser causadores de problemas ambientais de toda ordem, como a contaminação de águas superficiais e subterrâneas por lama vermelha, como ocorreu em diversos locais onde este resíduo foi estocado (SILVA FILHO et al., 2007).

Os problemas gerados no uso estão relacionados com a intoxicação por metais e a sua lixiviação. Os casos mais importantes de intoxicação estão relacionados com o uso de chumbo, em tubulações e tintas, e com mercúrio, em lâmpadas e equipamentos eletrônicos, tais como termômetros. Embora o uso de chumbo em tintas já esteja banido, em praticamente todo o mundo, a contaminação por tintas antigas, contendo chumbo, continua ocorrendo, mesmo em países desenvolvidos (RYAN, 1999). A lixiviação, pela chuva, de metais contidos em materiais de construção é um problema que vem sendo estudado com mais profundidade apenas nos últimos anos. Muitos metais pesados, tais como chumbo, níquel e zinco são lixiviados de materiais de construção. Togerö (2004) estudou a lixiviação

que ocorre no concreto e em tintas. No caso do concreto, ele observou que a lixiviação ocorre em função do tipo de metal e do pH do meio.

Por fim, o descarte de metais pode causar um impacto ambiental bastante severo, porque a fração que é descartada no ciclo de reutilização dos metais é tão importante quanto a fração que é reciclada e retorna aos processos de transformação. Esta parte que não foi privilegiada pela ação humana segue a segunda lei da termodinâmica, formando óxidos (M_xO_y) e sais metálicos, principalmente, sulfitos (M_xS_y) e carbonatos ($M_x(CO_3)_y$) (NOUBACTEP, 2009), muito mais solúveis e, portanto, mais nocivos do que quando os metais estão na sua forma elementar. Essas reações ocorrem porque um objeto metálico é um corpo extremamente organizado e, de acordo com a segunda lei, sua tendência é de se desorganizar. A energia contida nas suas ligações metálicas será gradativamente doada ao meio ambiente e, como consequência, o corpo metálico irá literalmente se desagregar e se espalhará pela superfície terrestre. Isto inclui o ar, a terra e os corpos d'água, como rios, lagos, mananciais subterrâneos e oceanos. Também, inclui o interior de todos os seres vivos, incluindo humanos. O envenenamento por metais (incluindo envenenamento por metais pesados³⁵) pode acontecer em muitas escalas. Uma exposição acidental pode ocorrer em pequena escala, como no caso de uma criança que pode ingerir uma bateria de relógio contendo óxido de mercúrio, como o material do cátodo (já banido em muitos países), ou em larga escala, como a contaminação de um manancial de água para suprimento humano, com sulfato de alumínio, utilizado como floculante em Camelford (BALDWIN; MARSHALL, 1999).

O terceiro problema relaciona-se à quantidade de energia consumida no processamento de metais. Óxidos e sais metálicos, resultados do aumento entrópico de concentrações metálicas, são formados, essencialmente, por ligações exotérmicas, que os deixam muito próximos do equilíbrio termodinâmico. A obtenção de metais puros e, subsequentemente, de suas ligas, inicia o que Noubactep chamou de “uma batalha perdida com a termodinâmica” (NOUBACTEP, 2010, p. 287). A drástica redução de entropia dos corpos metálicos é apenas temporária e a sua reversão é apenas questão de tempo. O caso mais visível é o do ferro, cujo principal produto – o aço – inicia a oxidação assim que é exposto ao oxigênio do ar. Resta ao ser humano apenas retardar (com diversos tipos de revestimentos), este processo inevitável.

Entretanto, o processo de redução envolve grandes quantidades de energia e, como consequência, a entropia do ambiente é substancialmente aumentada para efetivá-lo. Na

³⁵ Um metal pesado é definido como qualquer metal com densidade maior do que 5.

verdade, o aumento da entropia ocorre em diversos outros momentos em que a energia é utilizada para o processamento de metais. Primeiro, na extração, com o movimento de terra e o desmonte de grandes quantidades de rochas. Segundo, com o beneficiamento do minério, até a produção do metal reduzido. Neste caso, a reciclagem do ferro e de outros metais também impõe o consumo massivo de energia, embora em menor quantidade, se comparado com a extração do metal a partir de minérios. A tabela 2 mostra um comparativo entre a energia necessária para a produção dos diversos metais, a partir de sucata e a partir do minério. Esta quantidade de energia é alta, nos dois casos, porque os metais, em sua forma reduzida, não são solúveis em solventes polares ou apolares (com pH) neutro. Portanto, eles somente podem ser manipulados através de fusão a altas temperaturas. Terceiro, para mitigar os efeitos da dispersão já comentada. Quando esta dispersão causa contaminação ambiental, novamente uma grande quantidade de energia – e consequentemente um grande aumento de entropia – é necessária para concentrar novamente o metal. Em muitos casos, esta quantidade de energia é tão grande que o seu custo torna proibitiva esta nova redução entrópica do metal.

Os metais podem ser substituídos por outras substâncias e compósitos, na grande maioria de seus usos, com a vantagem de que estas substâncias, ou sua combinação em estruturas mais ou menos sofisticadas, podem ser manipuladas com pequeno aumento na entropia do sistema.

Tabela 2: Redução no consumo de energia pelo uso de sucata. (Fonte: UNEP, 2010, p. 306)

METAL	ECONOMIA DE ENERGIA (%)
Alumínio	90 - 95
Aço	62 – 74
Cobre	35 – 85
Chumbo	60 – 65
Zinco	60

4.4.4.5 Biodegradabilidade

A biodegradabilidade, como o nome diz, é a propriedade que algumas moléculas, frequentemente polímeros, têm de serem decompostas por micro-organismos, em condições aeróbicas ou anaeróbicas (LEJA; LEWANDOWICZ, 2010), em processos de RCP (Reciclagem de Curto Prazo). Para que isso aconteça, essas moléculas devem apresentar três características essenciais. Primeiro, elas devem apresentar um alto valor de energia potencial nas suas ligações atômicas. Moléculas de alta energia são definidas como aquelas

que contém grande energia potencial nas suas ligações atômicas. Segundo, elas devem apresentar alguns grupos funcionais e ligações que são identificáveis por enzimas produzidas por seres vivos. Terceiro, quando são polímeros, elas devem ser compostas por monômeros que sejam utilizáveis pelos seres vivos. Estes monômeros podem ser monossacarídeos (como glicose ou frutose) ou aminoácidos. Além destes, lipídios são biodegradáveis. Eles consistem em moléculas de ácidos graxos de cadeia variável, ligados por uma molécula de glicerina. Moléculas biodegradáveis podem ser biogênicas ou sintéticas. As moléculas biogênicas também são conhecidas como moléculas orgânicas.

Existem três tipos principais de moléculas orgânicas: proteínas, lipídios e carboidratos. Exceto pela água e minerais presentes nos ossos, esses três tipos constituem praticamente toda a matéria em organismos vivos. As ligações químicas nestas moléculas são formadas, ao contrário da matéria inorgânica, através de reações endotérmicas. Consequentemente, elas armazenam energia que será liberada quando estas ligações forem quebradas. Entretanto, o acesso a elas não é simples e, mais fundamental, elas apresentam, nas suas condições normais, grande estabilidade química. Lipídios, por exemplo, são excelentes armazenadores de energia, mas suas ligações não degradam rapidamente. De fato, uma molécula de ácido graxo pode ficar exposta por anos no meio ambiente, sem ser afetada. Outras moléculas orgânicas, ao contrário, tendem a ser menos estáveis quimicamente, especialmente as proteínas, que tendem a desnaturar-se com a mudança de temperatura ou de pH do meio. Além disto, todas as moléculas orgânicas são sensíveis aos raios UV. Minerais, por outro lado, não são biodegradáveis no RCP, porque eles não possuem energia disponível em suas ligações (estão perto do ponto de equilíbrio entrópico), de maneira que eles não atraem muita atenção do ponto de vista energético.

As moléculas orgânicas apresentam grupos funcionais. A existência desses grupos funcionais é essencial, porque os seres vivos necessitam decompor as moléculas com o auxílio de enzimas, catalisadores orgânicos de reações utilizados para quebrar ligações moleculares específicas, isto é, ligações entre determinados grupos funcionais. Estes processos enzimáticos são extremamente especializados e extremamente eficientes, consumindo pouca energia no processo. Por exemplo, a ligação entre a molécula de glicerina e os ácidos graxos dos triglicerídeos é quebrada por enzimas específicas, chamadas lipases. Já a ligação bissulfito entre duas moléculas da proteína queratina, que torna essas moléculas insolúveis, é quebrada por queratinases, enzimas produzidas apenas por um pequeno número de micro-organismos. Isso significa que a queratina é menos biodegradável que os triglicerídeos, embora ambos sejam produzidos por seres vivos.

Os plásticos também contêm muita energia disponível em suas ligações, que são predominantemente ligações C-C, C=C, C=C, C-H e C=O. Entretanto, a forma de suas moléculas as tornam inadequadas para serem quebradas pelo ferramental biológico dos seres vivos, porque os plásticos apresentam ligações entre grupos funcionais que, de modo geral, não são reconhecidas pelas enzimas. Por isto, os plásticos permanecem intocados, em sua maior parte (exceto, evidentemente, os plásticos biodegradáveis). Isto significa que sua biodegradabilidade é muito baixa. Como consequência, permanecem no meio ambiente por tempo muito superior que uma RCP.

A terceira condição para que uma molécula possa ser considerada biodegradável – ser composta por monômeros utilizáveis pelos seres vivos – é necessária porque, talvez, o aspecto mais óbvio e mais fascinante da solução encontrada pelos organismos vivos é que as moléculas orgânicas que os compõem são, ao mesmo tempo, estrutura e alimento. Isto torna todo o processo de reciclagem de matéria orgânica extremamente eficiente, do ponto de vista do controle do aumento entrópico dessa matéria, porque este aumento está limitado estritamente à necessidade de desagregação física da matéria dos corpos, sendo decompostos até que seja atingido o nível molecular. Ou seja, muito da energia potencial das ligações atômicas é preservado. Isto é possível porque todos os organismos compartilham algumas moléculas básicas, os tijolos que formam as moléculas mais complexas, o que permite a reincorporação, pelos organismos que formam o ecossistema, de toda a matéria estruturada em monômeros, que anteriormente pertencia à estrutura biológica agora biodegradada.

Para obter moléculas biodegradáveis, a maneira mais efetiva é utilizar moléculas que já existam e são produzidas por um organismo. Estas moléculas podem ser de um dos três tipos mencionados, dependendo das características desejadas, ou podem ter semelhança suficiente com estas moléculas para serem degradadas por enzimas. Isto não significa que toda a estrutura deva ser constituída por tais moléculas. Ao contrário, em muitos casos, uma grande parte da estrutura pode (e às vezes deve) ser constituída por minerais que, combinados com moléculas orgânicas, produzem algumas das mais interessantes estruturas encontradas na biosfera, tais como o nacre, ossos e a biossílca.

4.4.5 Princípios secundários de otimização aplicados na relação com o meio

4.4.5.1 Máximo uso de recursos locais

Este princípio introduz a otimização na relação com o meio, através da ênfase em tecnologias que consigam lidar com a diversidade qualitativa e a variabilidade quantitativa dos recursos alocados sobre a superfície da Terra.

Na introdução desta tese, foi enfatizada a diversidade de tecnologias em épocas passadas, porque as diferentes civilizações podiam contar, basicamente, com os recursos locais. Aqui, a definição de local não pode estar vinculada a um valor preciso em termos de distancia, unidade geográfica ou política. O termo serve para ordenar qualitativamente a preferência por recursos na relação inversa da distancia entre a sua fonte e o seu uso. No capítulo sobre o paradigma atual, foi mostrada a tendência de homogeneização das tecnologias atuais da edificação, com a correspondente intensificação no transporte de recursos dos e para os diversos pontos do globo terrestre. Esta característica do paradigma atual ocorre por dois motivos básicos. Primeiro, os custos reais de extração, fabricação e transporte de matérias primas, materiais, componentes e elementos da construção são mascarados em função da existência de externalidades negativas, nas diversas etapas de produção da edificação. Segundo, o poder oligopolista, de alguns setores da indústria de materiais de construção, concentra o desenvolvimento de tecnologias e estimula a homogeneização de processos e produtos, com o objetivo de obter ganhos de escala. O resultado dessas duas causas é o gradativo abandono de tecnologias e produção local dos produtos intermediários da edificação (MCLENNAN, 2004). Essa otimização via mercado estimula ainda mais a concentração e homogeneização, consolidando e amplificando a deformação no consumo de recursos e gerando algumas distorções, como a dupla viagem do ferro ao redor do mundo, que sai do Brasil para a China em forma de minério e volta da China em forma de componentes e elementos da edificação. O transporte, distribuição e conversão de recursos apresentam severas consequências para o uso de energia, emissão de matéria particulada, perda de biodiversidade, além de outros danos à natureza (EKINS et al., 2009).

O máximo uso de recursos locais significa que é necessário interpretar e utilizar as características de cada local, quer seja a nível macro, com as variações climáticas, quer seja a nível micro, com as diferenças topológicas e biológicas (MCLENNAN, 2004). Além disso, a máxima proporção possível dos recursos locais necessários para a produção da edificação significa que as tecnologias de produção devem ser adaptadas regionalmente. Embora isto possa trazer implicações negativas na estrutura da indústria de materiais, estimula a economia local, tornando-a menos dependente de fatores externos e mais dinâmica e diversa. Isto não significa que antigas tecnologias devam ser utilizadas. Ao contrário, novas tecnologias, muito mais flexíveis, sofisticadas e independentes de economias de escala, devem ser desenvolvidas, para poderem rivalizar com as tecnologias existentes atualmente.

4.4.5.2 Mínimo consumo de serviços da natureza

Os ambientes natural e antropogênico estão conectados de muitas maneiras. Em essência, eles trocam fluxos de matéria, energia e informação. Esses fluxos trazem uma série de importantes benefícios ao homem, chamados de serviços da natureza. Em um artigo de 1997, Constanza et al. identificaram e tentaram quantificar o valor pecuniário de 17 serviços obtidos de diversos ecossistemas (CONSTANZA et al., 1997). Para o setor de construção de edificações, alguns dos serviços da natureza são fundamentais. Seguindo a classificação de Constanza et al., esses serviços seriam: regulação de gases da atmosfera, regulação do clima, suprimento de água, controle de erosão, formação de solo, reciclagem de nutrientes, tratamento de resíduos, controle biológico, suprimento de matérias primas e, finalmente, cultural. Esse último item está ligado ao princípio de DBI (Design Biologicamente Inspirado), que será apresentado mais adiante. Sem tais serviços prestados pela natureza, as soluções de produto e processo da edificação seriam radicalmente diferentes.

Uma parte considerável dos serviços da natureza são obtidos através da criação, mesmo que às vezes temporárias, de externalidades negativas. Por exemplo, os gases de efeito estufa e os VOC (Compostos Orgânicos Voláteis, *Volatile Organic Composites* em inglês), ambos incorporados nos ciclos naturais, são externalidades negativas, geradas durante os processos de produção e uso de edificações. Da mesma maneira, os resíduos gerados durante a produção de edificações, quer sejam orgânicos ou inorgânicos, são processados por organismos ou acumulados e/ou degradados pelo meio ambiente natural. As reações químicas relacionadas aos processos de bio-transformação são, em muitos casos, muito mais eficientes que as tecnologias de reprocessamento disponíveis hoje, devido ao quase universal uso de enzimas, que catalisam reações, reduzindo sua energia de ativação (VOET et al., 2000) (ver item 4.4.4.5 – Biodegradabilidade).

A profunda interação entre os sistemas antrópico e natural sugere que a melhor maneira de modelar os processos antropogênicos seja incorporá-los aos grandes ciclos materiais dos sistemas naturais. Ou seja, os processos de produção, uso e descarte das edificações, descritos em 2.4.3 (Processos produtivos) deveriam ser vistos como um segmento de um ciclo maior, que ocorre nos sistemas naturais. Isso garantiria a perfeita compatibilidade entre esses dois sistemas.

Mas, enquanto existe uma participação necessária de processos naturais em um ciclo ótimo, existem limites que devem ser respeitados. Estes limites são definidos pela capacidade de suporte dos sistemas naturais; vale dizer, pela sua capacidade de prestar os serviços. A carga imposta pelas atividades humanas sobre os sistemas naturais foi denominada de pegada ecológica e, através dela é possível avaliar qual a demanda imposta sobre estes

Incompatibilidade entre o paradigma atual da construção e princípios de sustentabilidade: proposição de novo paradigma

sistemas naturais. Em 2007, a carga era de 1,51 vezes a capacidade de suporte desses sistemas e com tendência a aumentar (EWING, B. et al., 2010).

Feitas as considerações acima, torna-se evidente que o desenvolvimento de soluções deve buscar sempre minimizar a carga sobre os sistemas naturais. Vale dizer, minimizar o consumo de serviços da natureza. Esta minimização deve ocorrer sob dois aspectos complementares: primeiro, através da menor demanda direta dos serviços, principalmente daqueles citados anteriormente; segundo, através da minimização do aumento entrópico dos sistemas naturais, causado pela exportação da entropia gerada nos sistemas antropogênicos. Esse aumento deve ser coibido, especialmente nas situações em que o aumento entrópico deverá perdurar por um longo período, por não ser eliminado através da reciclagem de curto prazo (RCP), como no caso dos metais pesados.

4.4.6 Princípios secundários de integração aplicados na relação com o meio

4.4.6.1 Sinergia

Sinergia é definida como o efeito resultante da interação entre dois ou mais sistemas (ou corpos), quando eles atuam conjuntamente. Por definição, esse efeito é diferente da soma dos comportamentos dos sistemas individuais. Sempre que o efeito sinérgico se apresenta em um nível hierárquico acima do nível dos sistemas individuais, a sinergia é uma qualidade emergente da interação entre esses sistemas.

Considerando-se um dos sistemas que interagem, como fazendo parte do meio (entorno) do outro sistema, e de acordo com os conceitos relativos à sinergia enunciados no capítulo 2 (2.4.3.2 c – sinergia e conectividade), duas situações podem ser geradas na interação do sistema com o seu meio: efeito mútuo e efeito conjunto. Esses dois efeitos, chamados efeitos sinérgicos, devem ser definidos para cada nível do sistema. Nesse caso específico, o meio considerado pode ser o meio antropogênico ou o meio natural. Não serão considerados aqui os casos em que o sistema é uma parte da edificação (um componente, elemento ou subsistema), que interage com outra parte, porque esses casos serão analisados nos princípios sobre a formação da solução.

No caso de meio antropogênico, a análise está focada, em um primeiro nível, na interação entre a edificação e seu meio, que consiste de outras edificações, bem como da infraestrutura da cidade. Um exemplo dessa interação é a formação de conjuntos de edificações, que constituem os cânions urbanos, que produzem microclimas especiais. Outro exemplo consiste nas ilhas de calor das cidades, que são geradas a partir de uma combinação de alta densidade de uso do solo com alto consumo de energia (ERELL et al.,

2011). No caso de meio natural, nesse primeiro nível, a análise está focada na interação entre a edificação e os elementos que fazem parte do meio natural, tais como seres vivos (por exemplo, vegetação, micro-organismos e animais), bem como vento, energia solar, terreno, entre outros. Mesmo no meio urbano, essa interação pode ser intensa através, por exemplo, de áreas de preservação ligadas por corredores verdes (SOUZA, 2012).

4.4.6.2 Adequação cultural e econômica

Este princípio informa a necessidade de compatibilizar as soluções tecnológicas com os fatores não tecnológicos da sociedade, quais sejam cultura e economia. Considera-se aqui que as leis são parte da estrutura cultural da sociedade. Portanto, nesse caso específico o meio considerado é exclusivamente antropogênico.

Este princípio pode ser encontrado, tanto na literatura sobre desenvolvimento de produtos com um enfoque sustentável (JOHN, V. M.; ÂNGULO, S. C., 2006), quanto na literatura mais tradicional, que não tem esse enfoque (RAPOPORT, A., 2005).

No primeiro caso, a literatura denomina, algumas vezes, de design sensível ao contexto (context-sensitive design), para referir-se ao desenvolvimento de soluções que utilizam, além dos critérios tradicionais de custo, desempenho e segurança, critérios relacionados com aspectos culturais, estéticos, econômicos (com relevância para a sociedade, como um todo) e ambientais (MIHELICIC; ZIMMERMAN, 2010). McLennan (2004) afirma que as edificações devem respeitar as características do lugar, incluindo a sua herança cultural, valorizando-as e refletindo-as, não somente nas formas, mas também nas tecnologias adotadas.

No segundo caso, o projeto de produtos deve avaliar o impacto das influências externas, que podem ser genericamente classificadas como forças políticas, legais, econômicas, sociais e tecnológicas, sobre as tecnologias a serem desenvolvidas (BACK et al., 2008).

4.4.7 Princípios primários aplicados na formação da solução

4.4.7.1 Durabilidade estendida

O conceito de durabilidade estendida refere-se à capacidade de uma edificação, ou parte dela, de ter uma vida útil prolongada, através da utilização, separada ou combinada, de diversos princípios mais específicos. Estes princípios são: redundância, manutenibilidade, robustez e resiliência, que serão analisados, em detalhe, mais adiante.

As vantagens de uma durabilidade estendida é a minimização no consumo de matéria e energia, bem como a menor geração de resíduos, de diversos tipos e fontes, tanto na

produção, quanto no descarte das partes substituídas. Este é, portanto, um princípio que auxilia a viabilização de outros princípios.

Entretanto, a durabilidade estendida também pode dificultar a implementação dos mesmos princípios. Esta situação ocorre quando a continuidade da produção e uso de edificações, ou partes dela, significam a utilização prolongada de tecnologias menos eficientes do que novas tecnologias disponíveis, visto que existe uma correlação entre a vida útil dos produtos e mudança tecnológica (OECD, 2002). Novas tecnologias de produto podem significar menos consumo de energia e menos poluição no descarte final. Cooper (1994) identificou a superação de uma tecnologia como obsolescência tecnológica, distinguindo-a da obsolescência funcional (que ocorre quando o produto deixa de funcionar adequadamente) e da obsolescência de moda (que ocorre quando o padrão estético do produto cai em desuso). Um sistema de aquecimento que utiliza combustível fóssil, por exemplo, deveria ser substituído por outro que utilizasse energia solar. Entretanto, se o princípio de durabilidade estendida for utilizado indiscriminadamente, o consumo de energia e o impacto ambiental decorrentes desta decisão serão, ao final, muito mais negativos do que se a durabilidade fosse reduzida.

Estas questões devem ser resolvidas seguindo duas abordagens complementares. No caso do consumo de energia, todas as máquinas apresentam uma eficiência máxima teórica. Um equipamento de ar condicionado, por exemplo, pode ter sua eficiência melhorada até aproximar-se desse limite teórico, dado por:

$$\text{Eficiência} = 1 - \frac{\text{Temperatura do meio}}{\text{Temperatura da fonte de calor}}$$

À medida que a tecnologia evolui, é de se esperar que a eficiência aproxime-se assintoticamente da máxima eficiência. Portanto, a substituição de tecnologias mais eficientes deveria ser estimulada, até que a eficiência real estivesse suficientemente próxima da eficiência máxima teórica. Este preceito pode ser claramente visto nas substituições tecnológicas das lâmpadas. A eficiência teórica, embora ainda esteja longe de ser alcançada, serve como referência para que não seja estimulada a durabilidade estendida de tecnologias com eficiência real muito distante daquela.

O segundo critério refere-se ao consumo de matéria. Neste caso, o problema é mais complexo, porque a mínima quantidade de matéria depende, essencialmente, da forma e da quantidade de energia que irá interagir com esta matéria para que seja realizada a função desejada (ver item 2.1.1.8 – Função). De modo geral, a interação sempre será mais eficiente quando o corpo for projetado e construído por processos *bottom up*, porque eles permitem

uma precisão muito maior do que processos *top down*, especialmente no que se refere a estruturas multinível heterogêneas. Isto significa que edificações, ou partes delas, que forem construídas por processos *top down* podem ser substituídas por tecnologias mais eficientes no consumo de matéria e, portanto, sua durabilidade deve ser considerada cuidadosamente.

Além das questões de eficiência, a implementação do princípio de durabilidade estendida enfrenta outros problemas. O primeiro são os padrões de consumo atuais, enraizados nos sistemas socioeconômicos das economias, principalmente das industrializadas (ROBINS, 1999).

4.4.7.2 Eficiência

O princípio da otimização das soluções é, provavelmente, um dos princípios mais antigos aplicados na engenharia e se traduz no princípio da eficiência. Até hoje, esse princípio visou, principalmente, a redução de custos individuais ou privados. A sua utilização para a redução do impacto ambiental necessita de outro grupo de prioridades, que se relacionam com a redução do custo social e do custo ambiental, via redução das externalidades. Ou seja, maior (idealmente máxima) eficiência na utilização dos recursos.

“Eficiência é grátis, peça mais.”, gosta de lembrar o engenheiro Lock Lee, citado por McLennan (2004, p. 56). Mas a eficiência exige um investimento em conhecimento e desenvolvimento de tecnologia. Após este investimento inicial, não existem mais custos de operação e manutenção. Esse investimento normalmente se concentra na área tecnológica, mais especificamente em P&D. O problema para a indústria da construção é que, como foi visto no capítulo 2, a indústria de materiais, juntamente com a indústria de equipamentos, concentra praticamente todo o avanço tecnológico no setor de edificações, fazendo com que, muitas vezes, a eficiência seja da parte e não do todo. Evidentemente, o todo depende do nível considerado. Se é a edificação ou um subsistema da mesma. Ou se é o bairro, a cidade, ou o ecossistema em que ela se encontra, até a escala global.

A eficiência também deve ser medida em relação a algum parâmetro. Normalmente, um insumo (por exemplo, energia consumida para realizar uma determinada função) ou um benefício direto (por exemplo, a impermeabilização de uma parede obtida com diversos tratamentos) é utilizado na visão mais tradicional. Dois dos indicadores mais importantes, utilizados na avaliação de produtos na Análise de Intensidade de Material na União Europeia, são a Entrada de Material por Unidade de Serviço (sigla MIPS em inglês) e a Entrada de Superfície por unidade de serviço (sigla SIPS em inglês). Eles foram propostos pelo Instituto Wuppertal para o Clima, Meio Ambiente e Energia, na década de 1990 (RITTHOFF et al., 2002). O objetivo final destas medições é avaliar a eficiência dos

processos, em relação ao consumo do material e superfície terrestre, respectivamente. Mas, em uma visão sustentável, o parâmetro pode ser referido a uma condição ambiental que não está diretamente associada ao desempenho da edificação para seus usuários. Por exemplo, a queima de combustível fóssil em um sistema de aquecimento pode ser extremamente eficiente na transformação da energia química em energia calorífica. Entretanto, em relação à qualidade do ar na vizinhança da edificação, a eficiência dos filtros pode ser extremamente baixa. Se forem colocados filtros eficientes, a eficiência do processo, em termos de geração de gases de efeito estufa pode, novamente, ser extremamente baixa.

A eficiência, normalmente, é buscada em relação aos insumos dos processos e está intimamente relacionada ao conceito de produtividade, o qual, por sua vez, está muitas vezes associado à escala de produção. Assim, uma maior eficiência é obtida, muitas vezes, não na inovação tecnológica introduzida no processo, mas na escala, onde outros fatores, tais como logística e processos ininterruptos são fundamentais.

Nos sistemas naturais, a eficiência, sendo um princípio ligado à otimização, é sempre modulada pelos princípios de perpetuação e integração. Uma laranjeira, por exemplo, parece extremamente ineficiente, ao produzir centenas de frutos em cada ciclo anual, considerando-se que, no máximo, apenas algumas poucas sementes tornar-se-ão novas árvores. Essa aparente ineficiência reprodutiva da laranjeira, que pode ser observada em inúmeras espécies de animais e vegetais, somente pode ser explicada se o conceito de eficiência não for referido à parte (eficiência do sistema reprodutivo da planta), mas ao todo. Esse todo não é somente aquela planta, mas o sistema ecológico em que ela se encontra. Para que isso seja possível, a planta também deve incorporar os princípios envolvidos na perpetuação e na integração. Na perpetuação, a sobrevivência da espécie laranjeira, a longo prazo (muitas gerações), depende do equilíbrio entre a multiplicação de laranjeiras e de todas as outras espécies do bioma. Na integração, o fruto da laranjeira é parte de uma cadeia trófica que, ao final, permite que os seus genes sejam disseminados. A eficiência, portanto, deve ser considerada integral e não pontual. Em muitos outros casos, a eficiência dos seres vivos é substancialmente maior que aquela obtida com as tecnologias da engenharia humana. Por exemplo, os polímeros são produzidos na engenharia química com a utilização de energia térmica (calor) e energia mecânica (pressão) em grandes quantidades e a geração de resíduos, além da imprecisão nos produtos obtidos (os polímeros variam suas cadeias e *branching*, de maneira quase aleatória). Entretanto, os seres vivos produzem polímeros à pressão e temperatura ambientes, portanto com baixo consumo de energia, sem resíduos e com uma precisão muito maior. Esse tipo de eficiência

pontual também é importante, mas está sempre submetida a uma eficiência mais abrangente.

4.4.7.3 Emergência

Emergência é definida como o fenômeno que ocorre quando uma qualidade ou padrão emerge em certo nível de complexidade, sendo ausente nos níveis inferiores (FROMM, 2004). A consciência, por exemplo, é uma qualidade emergente do cérebro, como um todo, porque ela não está presente na atividade de um único neurônio ou de um grupo específico de neurônios. Por outro lado, a qualidade emergente surge como resultado da interação de elementos que atuam de maneira independente ou interdependente, uns dos outros. No caso do cérebro, ela resulta de uma miríade de interações, entre milhões ou bilhões de neurônios, cada um interagindo apenas com alguns milhares de outros. Neste sentido, a emergência é também o resultado de um processo bottom-up, que ocorre através das atividades e das interações no nível ou níveis de menor complexidade (níveis inferiores). Isto é, ela não é o resultado intencional, no nível superior, para produzi-la naquele nível. Ela, simplesmente, emerge naquele determinado nível de complexidade. Para compreendê-la, é preciso partir da premissa de que uma hierarquia deve relacionar níveis mutuamente irreduzíveis (UMEREZ et al., 1993); ou seja, deve haver, ao menos, dois níveis de complexidade, com características tais que não permitam que os dois níveis sejam considerados como um só.

A característica emergente pode ser uma função que o sistema realiza em determinado nível. Nesse caso, segundo a definição em 2.3.1.8 (Função), ela necessita da interação do corpo com alguma forma de energia. Esta interação ocorre nos níveis hierárquicos inferiores e tem como resultado um comportamento do corpo em um nível hierárquico superior. Por isso, a função emergente é sempre uma função integradora dos comportamentos individuais dos elementos dos níveis inferiores.

A emergência pode ser encontrada no comportamento da maioria das estruturas produzidas por processos biológicos. Um exemplo de emergência, em uma estrutura desse tipo, é o comportamento mecânico do nacre, que constitui as conchas. Ali, cristais individuais de carbonato de cálcio, inseridos em uma matriz proteica, comportam-se de uma maneira que permite ao conjunto dissipar as tensões e tornar-se insensível a defeitos na escala nanoscópica (GAO et al., 2003). Neste caso, os cristais de aragonita e calcita, na matriz proteica, são acumulados em camadas para formar uma estrutura lamelar, até que uma camada de fechamento deste processo de acumulação identifique o próximo nível de complexidade (FRICKE; VOLKMER, 2007; BARTHELAT, 2010). O nacre apresenta

flexibilidade dentro no nível inferior, mas é estruturado no nível superior. Esta estrutura em níveis permite que o nacre tenha resistência, com flexibilidade.

Organismos e colônias apresentam um comportamento com características emergentes porque, em muitos casos, é muito mais eficaz organizar a matéria do simples para o complexo, em diferentes escalas. Do mesmo modo que ocorre com os corpos, uma determinada qualidade ou padrão pode não estar presente em um nível mais baixo, que é formado por interações de estruturas simples. Entretanto, à medida que os níveis se acumulam, novas propriedades emergem. Novamente, a emergência não é uma qualidade que possa ser incorporada diretamente no comportamento final desses organismos ou colônias. Ela deve ser buscada nas abordagens bottom-up, em cada nível.

No caso das cidades, a emergência tem, normalmente, sido referida como uma qualidade da cidade, como um todo, que emerge através das interações de milhares de indivíduos (JOHNSON, 2002). Na cidade, bairros com características especiais, como especialização comercial ou agrupamentos industriais de produtos específicos, são considerados como emergentes, quando não planejados, isto é, quando ocorrem espontaneamente com o desenvolvimento da cidade. Isso dá à cidade uma funcionalidade e uma otimização que dificilmente seriam obtidas se planejadas em processos *top down*.

A emergência tem sido relacionada à automontagem e ao conceito de Sistemas Multiagentes (SMA), na literatura (FROMM, 2004; JOHNSON, 2002). O conceito de SMA foi utilizado para modelar fenômenos complexos, como os padrões de uso da terra (PARKER, 2003). Ele descreve o desenvolvimento dinâmico de estruturas, quando os processos tem múltiplas fontes independentes de decisão. Entretanto, a capacidade de um sistema de desenvolver propriedades ou comportamento emergentes não depende, necessariamente, dele apresentar estas outras características.

Emergência é um conceito fundamental para a estruturação otimizada da matéria. O projetista ou designer pode detectar as propriedades emergentes que surgem em determinado nível e incorporar, durante o processo de definição do projeto, estruturas dos níveis mais baixos, capazes de estimular ou fazer emergir as propriedades desejadas nos níveis superiores. Então, a emergência pode ser considerada como definidora de uma fronteira entre diferentes níveis. Entretanto, esta incorporação nem sempre gera propriedades emergentes, de maneira direta. Como consequência, em algumas situações, as características do sistema advindas da propriedade emergente não podem ser utilizadas como o ponto de partida do projeto, a partir do nível de aparecimento da propriedade. A previsibilidade de uma propriedade emergente, em um determinado nível de um sistema,

depende das seguintes variáveis: a) se o sistema é estático ou dinâmico; b) se o sistema tem como entradas (inputs) e saídas (outputs): massa, energia ou informação. Sistemas estáticos são considerados aqueles em que as partes materiais do sistema não apresentam alteração permanente; ou seja, uma vez cessado o estímulo (normalmente uma entrada de energia ou de matéria e energia, ou de informação e energia, ou de informação, matéria e energia), o sistema volta, naturalmente, à sua condição original de repouso. Portanto, a condição final é funcionalmente idêntica à condição inicial e, em alguns casos, fisicamente idêntica. Por oposição, sistemas dinâmicos obviamente apresentam alteração permanente. Informação é toda e qualquer entrada que altere, com significado útil, de forma permanente, a situação das partes materiais. Consequentemente, um sistema somente pode utilizar informação, como uma entrada, se for dinâmico. Esta condição não pode ser confundida com um sistema que transmite a informação, que pode ser estático. As situações possíveis de combinação das variáveis (a) e (b) são apresentadas no quadro 10, onde é possível determinar se as características do sistema permitem que ele seja projetado, já considerando as propriedades emergentes.

Quadro 10: Possibilidade de projetar propriedades emergentes em sistemas, de acordo com o comportamento do sistema e o tipo de entrada.

TIPO DE ENTRADA	MODO DE COMPORTAMENTO	
	ESTÁTICO	DINÂMICO
MATÉRIA	Permite (ex.: tecido, telhado santa fé)	Não existe
ENERGIA	Permite (ex.: dissipação de tensão no nacre)	Pode permitir ou não (ex.: ciclone)
INFORMAÇÃO	Não existe	Não permite (ex: cérebro, cidade)

A incapacidade de projetar integralmente um sistema pode parecer algo estranho para todos aqueles que estão acostumados a projetar e planejar de uma maneira direta e centralizada; mas o próprio conceito de emergência é refratário a esta abordagem. Um exemplo de sistema projetado emergente são robôs que aprendem, que têm sido alvo de um número crescente de pesquisas (IEEE, 2013). Existem alguns comportamentos emergentes em sistemas dinâmicos, que podem ser previstos de maneira genérica com base na experiência, mas isto é uma exceção mais do que uma regra. Eles, muito provavelmente, serão previstos em sistemas estáticos (como no caso de um telhado com estrutura de madeira, como o apresentado na figura 6) e não em sistemas dinâmicos. Por exemplo, o desempenho de um computador, em termos de velocidade de processamento, pode ser aproximadamente estimado. Entretanto, para saber exatamente o desempenho de cada

computador individual, à medida que ele acumula dados e rotinas, que é uma propriedade emergente da interação de todos os seus componentes, este desempenho precisa ser medido.

Três exemplos de emergência, em diferentes tecnologias do ambiente construído, darão uma visão mais clara de como o conceito de propriedade emergente pode ser incorporado no processo de projeto.

O primeiro exemplo refere-se ao tecido, que pode ser de uma lona de cobertura, de um revestimento de parede, etc. Caso o tecido seja de um material orgânico, como o algodão, os primeiros 5 níveis (monômero, polímero linear, fibrila, camadas da estrutura da fibra e fibra) são definidos no próprio processo de crescimento do algodoeiro (PAIZIEV; KRAKHMALEV, 2009). A tecnologia humana define os próximos 3 níveis: o fio, cuja propriedade emergente, em relação à fibra de 2 cm (média), é seu comprimento infinito; o tecido, cuja propriedade emergente, em relação ao fio, é sua bidimensionalidade; e a lona, em si, cuja propriedade emergente, em relação ao tecido, é sua tridimensionalidade. Uma lona de algodão tem, portanto, 8 níveis de complexidade, com, ao menos, uma propriedade emergente, em cada nível. A lona é um sistema estático.

O segundo exemplo refere-se ao telhado, feito com capim Santa Fé. Este tipo de telhado, tradicional em todo o mundo, consiste da utilização ordenada do caule de gramíneas, como a *Panicum prionitis*, da Família Poaceae, conforme figura 25a. A planta apresenta uma estrutura com vários níveis de complexidade, com propriedades emergentes em cada nível. A partir do caule, a tecnologia humana adiciona ainda mais 3 níveis: o feixe de caules, com diâmetro aproximado de 30 cm, com a propriedade de volume da seção transversal (figura 25b); a fiada, onde são dispostos os feixes de uma mesma cota, com a propriedade de recobrimento de uma área do telhado; e, finalmente, o telhado como um todo, com a propriedade de impermeabilização, proteção e isolamento termo-acústico. Esta estrutura em 3 níveis elaborada pela tecnologia humana, soluciona, com um componente unidimensional, uma questão tridimensional (figura 25c).

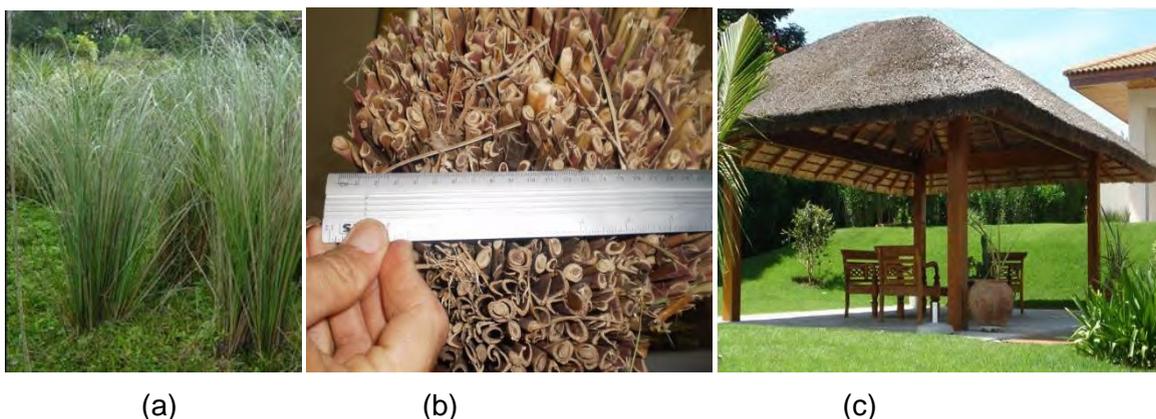


Figura 25: (a) planta in natura (Fonte: Summsolo, 2008); (b) feixe de caules (Fonte: Castilhos, 2011);(c) telhado (Fonte: Cobrire, 2010).

Finalmente, o terceiro exemplo refere-se ao arranjo de edificações, em uma cidade. As diversas funções da cidade não estão distribuídas de maneira uniforme, mas formam arranjos, com diferentes áreas concentrando diferentes funções (JOHNSON, 2003). Um edifício comercial, por exemplo, pode ser definido como sendo um componente da estrutura física de um determinado setor da economia – o setor de serviços; um galpão industrial é um componente do segmento industrial e assim sucessivamente. Assim, os arranjos são feitos no primeiro nível, em avenidas principais de comércio e serviços, ruas laterais de moradias e áreas mais afastadas de indústrias, com os prédios públicos desfrutando de alguma centralidade. Existe, ainda, um entremeado, com um pequeno comércio de consumo diário (padarias, bares, farmácias, fruteiras, entre outros), junto aos núcleos residenciais. Em um segundo nível, as áreas de cada cidade (a partir de determinado tamanho), passam a se especializar em determinado tipo de comércio (por exemplo, em Porto Alegre, comércio de peças automotivas, nas avenidas Farrapos e Azenha). Finalmente, cidades inteiras especializam-se em serem eminentemente comerciais, residenciais ou industriais, evidentemente sem uma segregação absoluta, com grupos de cidades apresentando características especiais (por exemplo, a região do Vale dos Sinos, no Rio Grande do Sul, com concentração de indústrias calçadistas, ou o Vale do Silício, no norte da Califórnia). Em cada nível, as propriedades que emergem destas características não podem ser identificadas em níveis inferiores. Assim, a dinâmica de negócios, tecnologia, mão de obra especializada e serviços, que está concentrada no Vale dos Sinos ou no Vale do Silício, não poderia ser reproduzida em miniatura, se apenas uma fábrica isolada existisse ali. Este é um sistema dinâmico com propriedades emergentes em cada escala de organização.

4.4.8 Princípios secundários de perpetuação, aplicados na formação da solução

4.4.8.1 Resiliência

No capítulo 2, o conceito de função foi relacionado à interação entre os produtos intermediários da construção (componentes, elementos e subsistemas) e diferentes formas de energia (item 2.3.1.8 Função). A maneira como os componentes se comportam definem o seu desempenho, naquela função. Neste capítulo 4, o princípio de perpetuação, na relação com o meio, foi caracterizado pelo princípio de MAER (mínimo aumento entrópico residual), que era definido como a menor variação permanente de energia que o meio sofria, como fruto do processo de edificação. A importância do MAER reside na ideia de transformação permanente do meio, ou seja, de sua degradação.

O conceito equivalente de degradação, para a própria edificação e suas partes (seus produtos intermediários), é a obsolescência funcional, resultando em perda de funcionalidade, súbita ou crescente, que determina o fim da vida útil da edificação e/ou de suas partes. O princípio interessante é o oposto da obsolescência funcional, o qual foi chamado aqui de resiliência.

O termo resiliência apresenta dois significados distintos: a resiliência ecológica e a resiliência na engenharia (PETERSON et al., 1998). Resiliência ecológica pode ser definida como a capacidade de um ecossistema de retornar à sua condição original, após ter sido submetido a uma perturbação (GUNDERSON, 2000). Mas o conceito também tem sido usado em sistemas dinâmicos, como uma medida da mudança necessária para transformar um conjunto de processos e estruturas, que se reforçam mutuamente, em outro conjunto de processos e estruturas, mantendo a funcionalidade do sistema. Este conceito foi originalmente utilizado para descrever ecossistemas, mas pode ser utilizado para descrever o comportamento de colônias ou grupos de organismos, de uma espécie ou mesmo de um único organismo (GUNDERSON; PRITCHARD, 2002). Em engenharia, resiliência significa a capacidade de um sistema de suportar cargas, sem alterar suas características ou comportamento, retornando à sua condição original (ou mantendo a funcionalidade original), após a carga ter sido retirada. Aqui, o termo carga pode ser entendido como interação com alguma forma de energia (conforme definido no capítulo 2). Em algumas áreas da engenharia, este conceito geral ganha contornos específicos. Por exemplo, na engenharia de materiais, resiliência é definida como “a capacidade de absorver deflexão sem danos” (ASHBY; JOHNSON, 2011, p. 86); isto é, sem apresentar fraturas ou deformação permanente. O conceito de resiliência, em engenharia, é considerado mais restrito, porque,

uma vez ultrapassado o limite de resiliência do sistema (ou corpo), há uma perda parcial ou total da capacidade de desempenhar suas funções. Ou seja, o conceito de resiliência, em engenharia, pressupõe que o sistema não possui adaptabilidade. Este conceito está gradualmente sendo desafiado; primeiro, na ciência da computação, onde esforços têm sido desenvolvidos para criar sistemas adaptáveis e, portanto, resilientes (FEDERICI, D.; DOWNING, K., 2005). Na engenharia de edificações, a resiliência pode ser incorporada às soluções em combinação com outros três conceitos: redundância, auto-reparação e robustez. Esses conceitos serão descritos mais adiante, mas todos estão vinculados à ideia de um sistema que se adapta às cargas, quando essas ultrapassam determinados valores que estavam definidos como valores limite. Com isso, o conceito de resiliência, em engenharia, se aproxima do conceito ecológico. Evidentemente, os sistemas de engenharia apresentam uma adaptabilidade restrita, porque são substancialmente mais primitivos que os sistemas formados por organismos vivos. Esta limitação surge, entre outros motivos, pela ausência de sistemas de retroalimentação tão efetivos quanto os sistemas orgânicos e de realocação de recursos, de acordo com as demandas em vários níveis do sistema.

4.4.8.2 Redundância

A redundância é a replicação de partes de um sistema com funções idênticas. Ou seja, é a existência de várias partes realizando a mesma função, em paralelo. Existem diversas situações em que o uso do princípio da redundância é justificado, mas o motivo fundamental é a possibilidade do sistema continuar operando, após o colapso funcional de uma das partes redundantes. Ou seja, a utilização desse princípio permite a perpetuação do sistema, como um todo, mesmo com o colapso da parte.

A redundância é um fenômeno onipresente nos seres vivos. Ela ocorre nos genes, principalmente de organismos de maior complexidade (NOVAK et al., 1997), entre comunidades microbianas (ALLISON; MARTINY, 2008), nas estruturas celulares e acima delas, em todos os organismos. Nos sistemas reprodutivos, a redundância está sempre presente, quer seja, por exemplo, no número de flores e frutos de uma árvore, de ovos de um inseto, ave ou outro animal ovíparo, bem como no número de filhotes, nos vivíparos. E está presente em uma miríade de outras soluções, como as penas dos pássaros, as escamas dos peixes, as folhas de uma árvore, os pulmões e rins. Em alguns casos, a redundância está presente em diversos níveis. Para a função da visão dos vertebrados, ela está presente na duplicação dos globos oculares e na estrutura da retina, com milhares de bastonetes sensíveis à luz. Isso permite que a perda de função de um bastonete não comprometa a visão, como um todo. A gradual perda de função de bastonetes, por idade ou doença, faz com que a perda de visão seja gradual e não súbita. Do mesmo modo, duas

orelhas são redundantes, no nível macro, enquanto a cóclea contém milhares de células sensíveis a cada frequência.

Um segundo motivo para a redundância é a obtenção de funções emergentes. Assim, a ação conjunta dos dois olhos permite o efeito estereoscópico, uma função emergente dessa ação, que não é obtida apenas com um olho. Do mesmo modo, os dois ouvidos, atuando juntos, obtêm o efeito estereofônico, que não pode ser obtido apenas com um ouvido. A emergência também está presente nos músculos, em diversas escalas, com fibríolas, fibras, feixes de fibras, formando o músculo completo. Entretanto, nem todas as fibras são acionadas, simultaneamente, durante a contração do músculo. Isso permite uma economia de energia. Essa é, portanto, a terceira função da redundância: permitir a adequação da ativação de partes do sistema à demanda (ou carga), de maneira a minimizar o consumo de energia. Finalmente, em alguns casos a redundância serve para minimizar, ou mesmo, neutralizar o efeito de defeitos sobre o desempenho do componente. É o caso da estrutura do nacre, formado por milhões de nano cristais de aragonita em uma matriz proteica. Os cristais têm uma dimensão tal que, caso haja uma falha na sua formação, esta falha não se propagará para a estrutura como um todo (GAO et al., 2003).

Entretanto, a aplicação do princípio da redundância não é universal na Natureza. Isso depende, essencialmente, das características da função exercida pela parte considerada. Por exemplo, não é possível ter dois cérebros, pois isso implicaria em duas consciências. Mas há redundância um nível abaixo, em partes do cérebro. Assim, a comunicação entre diferentes partes funcionais é feita através de várias, às vezes milhares, de ligações redundantes. Se uma ligação é comprometida, a função permanece.

Na engenharia, a redundância é utilizada para duas funções distintas: primeiro, para a duplicação de componentes considerados críticos, de maneira que o sistema possa contar com um backup. Nesse caso, o componente reserva normalmente não atua. É o caso do estepe do carro; segundo, a redundância dá ao sistema maior confiabilidade, porque permite que o erro de um dos componentes redundantes seja cancelado ou desprezado pela atuação dos outros. Em sistemas de aviação, esse conceito é chamado de redundância modular tripla (TRM – triple modular redundancy). Nesse sistema, três componentes atuam em conjunto. Caso um deles apresente mau funcionamento, sua ação é cancelada, porque ela é incompatível com a ação dos outros dois componentes. Um exemplo é o uso de três computadores. Caso um deles apresente discrepância de atuação, os outros dois assumem sozinhos a tarefa.

Na engenharia civil, a redundância ocorre em muitas situações. Uma estrada que tem duas pistas no mesmo sentido apresenta redundância. Um poste de luz que utiliza quatro lâmpadas é redundante. No caso da estrada, a redundância permite a emergência da qualidade de ultrapassagem, sem esperar que o tráfego no sentido contrário tenha cessado. Por outro lado, como ocorre em muitos sistemas que apresentam redundância, o efeito (ou importância) de cada parte redundante decresce, à medida que o seu número aumenta.

Nas edificações, a redundância está presente em muitos casos. Alguns exemplos: o revestimento com azulejos e, mais ainda, com pastilhas; uma porta com duas folhas; uma janela com vidro duplo e estruturas hiperestáticas. Um dos exemplos mais interessantes é o elevador, porque ele ilustra bem algumas funções da redundância. Um elevador tem redundância zero. Dois elevadores tem uma redundância mínima, e três tem uma redundância ainda maior, embora o impacto dessa redundância vá gradativamente decrescendo, à medida que o número de elevadores aumenta. Isto significa que o último elevador acrescido, quando o número tende ao infinito, é muito pequeno. Por outro lado, a perda de qualquer elevador tornou-se igualmente irrelevante. A condição ótima é maximizar o número de elevadores, dando, a cada um, uma função coordenada com os outros, utilizando o princípio da integração. Por exemplo, assumamos que um único elevador tem a capacidade de levar 30 pessoas. Ele pode ser substituído por 3 elevadores, que podem carregar 10 pessoas, cada um. Existem ganhos e perdas. O custo de 3 elevadores menores é, certamente, maior que o custo de 1 grande elevador. Entretanto, a energia de operação consumida pelos 3 pequenos certamente poderá ser menor que a energia consumida por um único elevador maior, porque, quando um número pequeno de pessoas for transportado, a energia consumida para transportar um elevador grande será substituída pela energia de transportar de um elevador pequeno. Além disso, existe o ganho em confiabilidade do sistema, causado pela sua redundância. Ou seja, se um elevador dos três for desativado, o sistema permanece com 66,6% da capacidade. Entretanto, existe um limite. Colocar 30 elevadores, que levam 1 pessoa por vez, torna-se antieconômico, porque, além do custo inicial maior, provavelmente isso significará um maior consumo de energia e maior espaço no edifício para acomodá-los. Então, é preciso utilizar um algoritmo que calcule a redundância ideal do sistema. Fabricantes de elevadores possuem algoritmos para determinar o número ótimo de elevadores. Entretanto, esses algoritmos dependem das informações fornecidas e de uma série de parâmetros que precisam ser fixados, como o tempo médio de espera, o fluxo nos horários de pico e fora do pico, a velocidade do elevador e os custos da energia e da manutenção ao longo da vida útil do elevador. Se houver vários elevadores e eles compartilharem de um programa que decide sobre a

disponibilidade de cada elevador a cada momento, o sistema de elevadores passa a ser um sistema complexo, que pode aliar a redundância a qualidades emergentes.

No processo de desenvolvimento da solução, é fundamental saber quais partes desempenharão melhor suas funções, se nelas for aplicado o princípio de redundância. Não foram encontradas na literatura regras gerais, mas pode ser sugerido que: a) se a função é decisória, ela não pode ser redundante. Mesmo em casos como a redundância modular tripla, citada acima, existe um processo decisório único; b) a redundância não é funcional se não houver ganho operacional. Por exemplo, não existe ganho em ter duas maçanetas em uma porta, ou duas portas de acesso a um quarto (assim como não existe vantagem em um organismo trabalhar com dois cérebros); c) a redundância não é viável se não houver alteração de escala. Em muitos casos, a redundância é aplicável porque várias partes menores podem substituir uma parte maior. É o caso, por exemplo, do cabo elétrico, substituindo o monofio; das pastilhas substituindo uma placa cerâmica maior; ou muitas lâmpadas de LED substituindo uma única lâmpada fluorescente. Isso significa que, se a escala de determinado componente ou elemento for fixo, não existe possibilidade de redundância. Por exemplo, uma escada deve obedecer à escala humana. Não existe ganho em criar duas escadas menores ou mais estreitas, em paralelo. Finalmente, é importante definir em que níveis a redundância é viável e qual o grau de redundância ideal.

4.4.8.3 Manutenibilidade

Quando foi discutido o princípio de perpetuação (item 1.3.1.1), foi dito que, em muitos casos, a perpetuação do nível mais elevado é viabilizada através do colapso (funcional ou constitucional) e substituição de níveis inferiores. Essa substituição pode significar uma reposição, pura e simples, de uma parte que deixou de ser funcional, ou uma alteração, que vai agregar mais funcionalidade à parte e ao todo. No primeiro caso, poderia ser dado o exemplo de uma lâmpada fluorescente queimada, que é substituída por outra nova. No segundo caso, a lâmpada fluorescente é substituída por uma lâmpada de LED. Em qualquer dos casos, o sistema ganha em perpetuação se a substituição da parte for pensada, no desenvolvimento da solução.

Essa característica, que deve ser inerente a um projeto de sistema ou produto, chama-se manutenibilidade (ou mantenibilidade), que se refere à facilidade, precisão, segurança e economia, na execução de ações de manutenção nesse sistema ou produto (BLANCHARD, 1992).

Seguindo as soluções encontradas nos seres vivos, a autorreparação pode ser vista, em muitos casos, como o ideal para a manutenibilidade. São conhecidas, de fato, algumas

situações de autorreparação: alumínio e aço inoxidável produzem uma camada de óxido na superfície, que impede que o metal abaixo também seja oxidado. Polímeros autorreparáveis possuem a habilidade de reparar o dano, quando e onde ele ocorrer no material. Este comportamento é inspirado em sistemas biológicos. Existem três abordagens para a autorreparação de polímeros: sistemas baseados em cápsulas, em redes vasculares e em cura intrínseca. A autorreparação pode ser com ou sem a intervenção humana. Neste último caso, normalmente ela ocorre com a doação de alguma energia externa para ativar o processo. Todos os tipos de polímeros (termofixos, termoplásticos e elastômeros) podem ser autorreparáveis e esta autorreparação pode ser ativada, em decorrência de um dano por esforço único ou por fadiga. A autorreparação promete componentes mais seguros, mais duráveis, mais tolerantes a falhas, para um grande número de aplicações (BLAISZIK et al., 2010).

Existem, entretanto, limitações para a aplicação desse conceito. A autorreparação aumenta o custo da solução. Por isso, ela somente deve ser utilizada quando seu custo for inferior ao custo gerado pela eventual substituição manual da parte que tornou-se disfuncional, ou quando o risco de colapso implicar em dano irreparável.

4.4.8.4 Robustez

O conceito de robustez refere-se à capacidade de um sistema (ou corpo) de manter suas funções, apesar de alterações em suas características de constituição ou forma, causadas por uma carga que ultrapassa os limites definidos para o sistema. Este conceito pode ser transmutado no outro conceito, mais coloquial de robustez, que significa aquilo “que suporta fadigas; resistente” (FERREIRA, 1986, p. 1514). Ou seja, quando os limites do sistema são estendidos para além de sua condição normal, suportando cargas maiores, ele é considerado robusto.

É preciso separar o colapso funcional do colapso físico do sistema ou da sua parte. Em alguns casos, eles coincidem, como no colapso estrutural de uma viga ou na queima de uma lâmpada. Mas, em alguns casos, como na sobrecarga do elevador ou no vazamento de água em uma janela, o colapso funcional não é acompanhado pelo colapso físico. Quando eles ocorrem juntos, o colapso funcional pode ser súbito ou gradual. Um exemplo de colapso súbito é a queima da lâmpada. Um exemplo de colapso gradual é o desgaste de uma placa cerâmica de piso antiderrapante, que perde rugosidade.

A robustez pode ser obtida ao criar mecanismos, que tornem as cargas aceitáveis pelo sistema. Para obter isto, muitas vezes o sistema ativa circuitos de feedbacks negativos. Eles agem sobre a carga, reduzindo-a, ou sobre a capacidade de reação a ela, aumentando-a.

Existem cinco maneiras do sistema responder a uma sobrecarga: colapso físico do sistema (se o sistema fosse uma motobomba com o quadro elétrico, isto representaria a queima do motor); colapso físico de um fusível (queima de um fusível elétrico no quadro elétrico), para proteger o sistema; desligamento do sistema (desligamento do disjuntor na sobrecarga elétrica); adequação de funcionamento do sistema, dentro de determinados parâmetros (acionamento de uma válvula de admissão de água, reduzindo a vazão); e adaptação do sistema a uma condição não completamente prevista (autorreparação que, no exemplo presente, equivaleria a abrir uma válvula de segurança, permitindo o vazamento de água).

Organismos vivos respondem a uma sobrecarga de diversas maneiras complementares: a sobrecarga estimula uma resposta do sistema, em duas direções: reduzir os efeitos da carga (por exemplo, uma árvore conforma seus galhos de acordo com o vento predominante); aumentar a capacidade de carga do sistema (a árvore aumenta a espessura do caule e a resistência, via aumento de densidade e de alinhamento das fibras); acionar um sistema de alerta que, ou desliga o sistema, ou reduz ou elimina a carga (nos animais, por exemplo, a dor é um alerta de estresse).

A robustez está diretamente relacionada à adaptabilidade. Em sistemas dinâmicos, esta adaptabilidade é normalmente expressa em retroalimentação negativa, adaptando a carga ou o sistema. Em sistemas estáticos, a adaptabilidade deve ter sido prevista especificamente. Um dos modos de adaptabilidade em sistemas estáticos é a sobrecarga de elementos redundantes do sistema.

A robustez também está relacionada à flexibilidade. Quanto mais flexível a aceitação do sistema a uma variação na carga (às entradas no sistema), mais robusto ele é, mais capaz de dar respostas a diferentes demandas. Os organismos vivos apresentam robustez associada à flexibilidade (ou adaptabilidade) porque eles tem dois conjuntos de regras, que são usadas de maneira complementar e sinérgica: regras para agir e regras para interagir (este assunto será visto, novamente, na discussão do princípio de customização e personalização. No metabolismo de um organismo, um exemplo de regra para agir é a instrução para produção de enzima lipase. Um exemplo de regra para interagir é a quantidade de enzima a ser produzida, de acordo com as informações que são fornecidas. Além disso, a flexibilidade está relacionada ao processo decisório. Ele está distribuído em muitas escalas e, em cada escala, está relacionado a um grau de redundância das estruturas.

Sistemas complexos são, ao mesmo tempo, robustos e frágeis (CARLSON; DOYLE, 2002). Perto do ponto de saturação, eles começam a apresentar um comportamento errático e,

passando desse ponto, começam a perder eficiência. Por exemplo, um sistema formado por um elevador e um conjunto de usuários com decisões independentes é um sistema complexo. Com carga de 50%, ao ser acionado pelos usuários que estão nos diversos andares e querem sair do prédio, o elevador para, somente, no seu movimento descendente. Essa condição permanece até a carga atingir 100% da capacidade do elevador. Mas, com carga acima de 100%, se os usuários nos andares mais baixos encontrarem sistematicamente o elevador lotado, alguns deles passarão a pará-lo na subida. Consequentemente, o elevador vai lotando sua capacidade enquanto sobe, e desce lotado. É evidente que isto leva a um maior consumo de energia, porque a carga de pessoas tem que subir e, depois, descer. Se a carga aumentar ainda mais, um número cada vez maior de usuários irá parar o elevador na subida. Mas os usuários dos andares superiores também irão parar o elevador e exigirão entrar nele, aumentando o tempo de cada parada, embora o número de usuários embarcado, em cada viagem, permaneça constante. Finalmente, os usuários se recusam a esperar mais e superlotam o elevador, fazendo-o parar e desligar ou, pior, forçando o seu colapso mecânico. Essa sequência de fatos caracteriza a progressiva degradação da eficiência do elevador. O comportamento de sistemas complexos, como o caso do elevador e seus usuários, está representado na figura abaixo (figura 26).

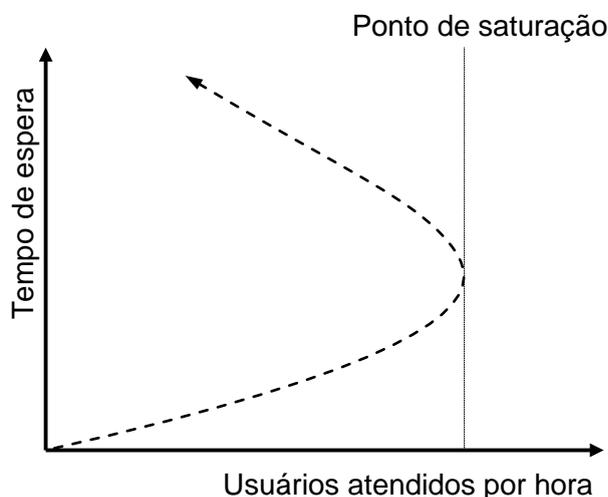


Figura 26: Gráfico representando o comportamento de um sistema complexo.

4.4.9 Princípios secundários de otimização, aplicados na formação da solução

4.4.9.1 Mínimo consumo de energia

Do ponto de vista da sustentabilidade, o consumo de energia, tanto para a fase de produção da edificação, quanto para as fases de uso e descarte, deve ser minimizado. Essa minimização não tem um objetivo econômico, embora este objetivo seja absolutamente válido, do ponto de vista do consumidor e dos agentes produtores da edificação. O interesse na redução desse consumo emerge de duas constatações: primeiro, algumas fontes de energia são altamente poluidoras (aumentam a entropia do meio); segundo, o consumo de energia, obrigatoriamente, traz a degradação do próprio sistema (ou de uma parte dele), reduzindo sua vida útil.

No primeiro caso, é importante o alerta de John: “Uma das práticas mais comuns de classificação de materiais, particularmente entre arquitetos, é o da energia incorporada, definida como a energia total necessária para produzir-se determinado material. Trata-se de uma abordagem insuficiente, pois o importante não é a quantidade de energia, mas, sim, os impactos ambientais que foram produzidos em consequência da geração da energia. Em outras palavras, diferentes fontes de energia têm diferentes impactos ambientais. Fontes de energia renovável, como a eólica e a hidroelétrica, tem menores impactos no consumo de materiais não renováveis e na geração de poluentes, inclusive os do efeitos estufa” (JOHN, V. M., 2007, p. 99). John está correto em sua colocação, exceto em duas questões importantes. Primeiro, termodinamicamente falando, não existe geração de energia. Existem transformações, de um tipo de energia em outro, incluindo-se, aqui, a matéria, como uma forma de energia, pois, de outra maneira, seria possível dizer que o sol realmente gera energia. Essas transformações de energia ocorrem quando cada corpo cumpre sua função (ou funções), na cadeia de processos produtivos que levam à edificação, seu uso e descarte. Segundo, considerando-se a mesma forma de energia e o mesmo processo para sua obtenção e transmissão, a quantidade de energia transformada nos processos produtivos é relevante, porque não existe forma de energia utilizada pelo homem que não cause algum tipo de impacto sobre o meio ambiente. Mesmo as formas de energia menos agressivas como a energia elétrica obtida através de sistemas eólicos ou hidroelétricas causam impacto.

No segundo caso, é preciso lembrar que, na relação entre função e energia (discutida nos itens 2.3.1.8 e 2.4.2), foram identificadas transformações funcionais de energia e transformações não funcionais. As transformações não funcionais têm duas causas. A

primeira causa refere-se aos processos que geram aumento de entropia no sistema, ou seja, de toda a energia consumida em um processo para a realização de uma função, uma parte dessa energia é transformada em processos energéticos cujos produtos não são utilizáveis. É caso, por exemplo, da energia consumida para a produção de lama vermelha, na produção de alumínio, na etapa de purificação da bauxita. Esta energia é absorvida por matéria sem função para o processo construtivo e o aumento da entropia desta matéria é disperso no meio ambiente, causando o aumento de sua entropia, algumas vezes com impacto ambiental importante, causando aumento entrópico significativo no meio ambiente, como no caso do extenso vazamento de lama na Hungria, em 2010 (THE BIOFRESH BLOG, 2010). A segunda causa refere-se às transformações de energia funcionais. De acordo com a segunda lei da termodinâmica, estas transformações nunca apresentam uma eficiência de 100% (motocontínuo do tipo 2). A energia que é transformada em outra forma que não a prevista (por exemplo, a energia elétrica que é transformada em energia térmica no fio condutor), pode aumentar a entropia do sistema (no exemplo dado, aquecendo o fio e aumentando sua oxidação). Além disso, a energia transformada, que é posteriormente emitida pelo sistema, também pode causar um aumento de entropia no sistema e no seu entorno.

Finalmente, é importante compreender que a mera quantidade de energia consumida em um processo não indica, por si, a qualidade do mesmo. Imagine-se dois processos produtivos, dos quais se obtém o mesmo produto. Estes processos têm a seguinte distinção: no primeiro é consumida uma menor quantidade de energia, mas é disperso no ambiente um metal pesado (chumbo, por exemplo); no segundo, é consumida uma maior quantidade de energia, mas todos os produtos e resíduos do processo são biodegradáveis. Colocada desta forma, parece claro que o segundo processo seria preferível. De fato, alguns processos que utilizavam chumbo, como a fabricação de tintas, tiveram que substituí-los por outros que, embora consumissem maior quantidade de energia, não possuíam a característica de dispersar no ambiente um resíduo, que não poderia entrar nos ciclos biológicos sem causar um grande aumento de entropia. Este aumento de entropia surge porque os processos biológicos são afetados negativamente pelo chumbo e outros metais pesados, em sua capacidade primordial de organizar-se como sistemas complexos. A consequência disto é que, sem a concorrência dos processos biológicos, restam os processos não biológicos para a redução da entropia do meio ambiente. Assim, para que o chumbo disperso pudesse ser reagrupado, uma enorme quantidade de energia (gerando um aumento entrópico em algum lugar do ambiente) deveria ser utilizada – e de fato o é, quando a despoluição do meio ambiente se faz necessária. Um exemplo dramático desta situação é a contaminação por mercúrio. Embora o controle atual de fontes de mercúrio

tenha garantido uma substancial redução na emissão deste metal, ela ainda ocorre, sendo metade oriunda da queima de carvão, para a produção de energia elétrica (EPA, 2007). Nos Estados Unidos, existem em torno de 290 locais com contaminação severa de mercúrio (na água, no solo e em resíduos), que necessitam ser descontaminados através de diversos tipos de tratamentos (EPA, 2007).

Por outro lado, também não é suficiente saber se a energia vem de fontes limpas ou sujas. Imagine-se que a fusão nuclear fosse, finalmente, viabilizada em escala comercial. Haveria energia limpa e abundante. Mas isto não significaria que os problemas estariam resolvidos. De fato, esta situação poderia agravar drasticamente o problema de sustentabilidade. Isto ocorreria se os processos que utilizassem esta energia barata e abundante fossem processos que aumentassem a entropia do meio ambiente. Neste caso, quanto mais energia, maior o problema. Novamente, a questão central é relativa ao aumento entrópico residual, ou seja, quanto o processo em questão aumenta a entropia do meio ambiente. Um exemplo de situação adversa seria, novamente, a exploração de um metal pesado e tóxico. No caso de energia cara, apenas uma pequena quantidade é extraída e utilizada, com um dano limitado. Mas se a energia for abundante e barata, a extração pode aumentar drasticamente, com um grande aumento na entropia do meio ambiente. Isto pode ocorrer com muitos outros processos e outras substâncias (como os metais, em geral), que são limitados pelo custo de energia.

4.4.9.2 Design biologicamente inspirado – DBI³⁶

Esse princípio refere-se à ideia de utilizar, como inspiração para desenvolver produtos e processos, as soluções encontradas pelos seres vivos, para os mais diversos problemas; soluções, estas, que vão desde a escala molecular, até a escala ecológica. Como ressalta Janine Benius (2009), inspirar-se não significa copiar. Significa compreender a ideia ou princípio por trás da solução e adaptá-lo à circunstância presente. Evidentemente, não existe garantia de que as soluções encontradas pelos seres vivos sejam sempre superiores às aquelas desenvolvidas pelo engenho humano. O que pode ser constatado é que, onde comparações são possíveis, muitas vezes as soluções biológicas são mais eficientes. Por exemplo, a iluminação obtida pelos vagalumes atinge uma eficiência de 45% da eficiência teórica total, considerando-se a energia disponível no processo, enquanto a melhor tecnologia humana (lâmpadas de LED) atinge uma eficiência de 18%. Do mesmo modo, os polímeros produzidos pelos seres vivos, como, por exemplo, a queratina, que é um equivalente a um plástico termofixo, é obtida com baixo consumo de energia, à temperatura

³⁶Em inglês, a sigla BID (Biologically Inspired Design) é bastante conhecida e a ciência relacionada a ela é a biomimética.

ambiente e pressão atmosférica, enquanto as resinas plásticas obtidas pela tecnologia humana são produzidas com temperatura e pressão elevadas e uma eficiência de conversão (de monômeros, em polímeros utilizáveis) menor. A seda, de alguns tipos de aranha, apresenta resistência à tração superior à do aço, com um peso 8 vezes menor. Alguns tipos de esponjas produzem substâncias vítreas à temperatura ambiente, com baixo consumo de energia. A estrutura interna dos ossos é extremamente variável e apresenta diversos níveis de complexidade, não sendo imitada por estruturas humanas na mesma escala. Um molusco marinho produz um adesivo, que funciona em todos os tipos de substratos, inclusive em superfícies molhadas, sendo agora estudado para servir de inspiração para adesivos humanos. O velcro foi inspirado na capacidade de fixação das sementes de uma planta. Estes são alguns exemplos de uma lista que pode ser muito expandida. Entretanto, é sempre importante lembrar que os seres vivos desenvolvem suas soluções para determinadas funções muito específicas, com restrições importantes, em termos de disponibilidade de matéria e energia. Portanto, é possível pensar em soluções humanas que consigam ter um desempenho superior, como é o caso dos NTC (nanotubos de carbono) e do grafeno. Outro caso de desenvolvimento na indústria foi a criação do vidro autolimpante, criado pela Pilkington. Entretanto, sua solução não foi baseada em soluções biológicas, tais como a flor de Lotus. A solução baseou-se nas propriedades de um nano filme de óxido de titânio (PILKINGTON, 2012; AYIEKO, 2012). Mas estas soluções também podem ser questionadas, tanto com relação à alta quantidade de energia consumida para sua produção, quanto com relação à sua não biodegradabilidade e aos problemas de saúde envolvidos em sua manipulação e liberação no meio ambiente.

Introduzir o conceito de Desenho Biologicamente Inspirado (DBI), como um dos conceitos estruturantes, tem dois propósitos. O primeiro, é chamar atenção para as propriedades, do ponto de vista de soluções de produto e processo adotadas, desenvolvidas por organismos vivos. Muitas destas soluções apresentam características que estão baseadas nos mesmos princípios propostos aqui. De fato, tais soluções são construídas utilizando uma abordagem bottom-up para a produção de estruturas, as quais são de alta energia, sofisticadas e complexas, possuem qualidades emergentes, são completamente recicláveis, usam metais de maneira extremamente parcimoniosa, são construídas utilizando o mínimo possível de energia e, com mínimo aumento entrópico, promovem estados dinâmicos estáveis (feed back negativo) e permitem a coevolução. Neste sentido, observar como os organismos se apropriam de combinações destes princípios, em situações específicas para o desenvolvimento de suas soluções, é extremamente importante para o desenvolvimento de novas soluções e requer uma abordagem multidisciplinar (SANCHEZ et al., 2005). O segundo propósito é a utilização da vasta gama de diferentes soluções que são

desenvolvidas no ambiente natural, como se fosse uma biblioteca, tanto para aplicação dessas soluções em produtos, como em processos, considerados em sistemas, desde o nível molecular, até o nível global. As soluções desta biblioteca serviriam para serem adaptadas ao desenvolvimento de soluções de problemas específicos de engenharia. Neste sentido, o Biomimicry Institute, liderado por Janine Benius, desenvolveu uma página chamada AskNature, com uma taxonomia de centenas de soluções desenvolvidas por organismos, para os mais diversos aspectos de sua constituição e interação com o seu ambiente. Esta biblioteca pode ser encontrada Disponível em da AskNature (ASKNATURE, 2011). A partir de sua experiência, Benyus (2009), apresenta 12 ideias de design sustentável, a partir da natureza, que, acredita ela, são fundamentais para o desenvolvimento de novas soluções compatíveis com a noção de sustentabilidade:

Automontagem

Gás carbônico, como matéria prima

Transformações solares

O poder das formas

Saciando a sede

Metais sem mineração

Química verde

Degradação programada

Resiliência e cura

Sentindo e respondendo

Aumentando a fertilidade

A vida cria condições que conduzem à vida

Existe uma crescente comunidade de cientistas e engenheiros que veem a abordagem DBI como uma importante alternativa, tanto do ponto de vista de como entender os problemas e como implementar soluções, quanto do ponto de vista de compreender os diferentes princípios empregados pelos diversos organismos e o seu potencial de aplicação a diferentes situações de engenharia (YEN; WEISSBURG, 2007).

O resultado de um DBI é o mimetismo de estruturas, processos ou sistemas orgânicos ou criados por seres vivos. No primeiro caso, encontram-se casos de sucesso, como a compreensão e imitação da superfície super-hidrofóbica da flor de lótus e outras plantas,

que têm a propriedade de serem auto-limpantes. Esta propriedade já foi incorporada em tintas (STO, 2012). No segundo caso, várias soluções são estudadas, tais como o nacre, já citado, cujas características servem como base para o desenvolvimento de novos nanomateriais (CARPINTERI, 2008), ou o estudo da formação de bioossílica (LOPEZ et al., 2005). Este processo de imitação é chamado de biomimética³⁷.

Para a engenharia civil, o campo de possibilidades é bastante grande, com aplicações nas áreas mais diversas e não apenas em materiais e processos, mas também em abordagens desenvolvidas. Williams et al.(2007) desenvolveu uma abordagem para imitar a distribuição e dimensionamento de tubulações, para a maximização de eficiência, com base em redes vasculares de animais e plantas.

Embora, a princípio, a busca por soluções biomiméticas ofereça grande potencial, ela deveria ser conduzida com cuidado. Primeiro, porque algumas soluções biomiméticas desenvolvidas atualmente não apresentam biodegradabilidade e não seguem outros princípios aqui enunciados, porque a escolha de materiais é feita tendo em mente somente a otimização das propriedades físicas do produto, como no caso de compósitos que imitam o nacre. Segundo, nem sempre é possível (de fato é infrequente) reproduzir com facilidade as estruturas orgânicas, em toda sua complexidade e sofisticação, de tal modo que a decisão de simplificar as soluções é uma tentação constante, sendo a imitação, em apenas um nível (nano ou macro), a situação mais frequente, prejudicando, assim, o desempenho da solução desenvolvida.

4.4.9.3 Customização e personalização

Os princípios de customização e personalização estão diretamente relacionados aos conceitos de adaptabilidade e flexibilidade. Em termos gerais, todo o processo que envolve adaptabilidade trabalha com dois conjuntos de regras: regras para agir e regras para interagir. Na biologia, as regras para agir e interagir estão, normalmente, codificadas no genoma. Entretanto, os resultados das regras de agir não são influenciados pela interação com o meio ambiente e caracterizam o que se denomina genótipo. Por outro lado, as regras para interagir têm como resultado o fenótipo. Na figura 27, abaixo, são apresentados dois exemplos da utilização conjunta dos dois conjuntos de regras. A árvore permanece com as características da sua espécie (regras para agir), enquanto otimiza a sua forma, ao adaptar suas raízes e tronco ao terreno onde se fixa (regras para interagir) (figura 27a). O fungo

³⁷ A palavra biomimética é originária do grego 'bios' (vida, natureza) e 'mimesis' (imitação, cópia), e pode ser definida como "a pesquisa de estruturas e funções de materiais biológicos que permitem o futuro projeto e a pesquisa em engenharia da síntese de compostos, baseados em material biológico" (Habibovic, 2004).

amarelo também mantém suas características de espécie (regras para agir) e adapta sua distribuição, ao ligar os pontos brancos de alimento de maneira otimizada (regras para interagir) (figura 27b). Na engenharia de edificações podem ser encontrados inúmeros exemplos desses dois conjuntos de regras. Uma fundação com estacas pré-moldadas, por exemplo, utiliza regras para agir na produção da estaca e utiliza regra para interagir, ao fixar as estacas no terreno, até atingir uma camada rochosa. Um revestimento de azulejos utiliza uma regra de agir, ao fixar o azulejo com cimento-cola, e utiliza uma regra de interagir, para cortar o azulejo no tamanho adequado para adaptar-se à dimensão da parede. O problema essencial, aqui, é o custo, representado pela não otimização do processo, em termos de desperdício de insumos e geração de resíduos, originado no uso das regras de interagir, se elas não forem compatíveis com as regras de agir, de maneira otimizada.

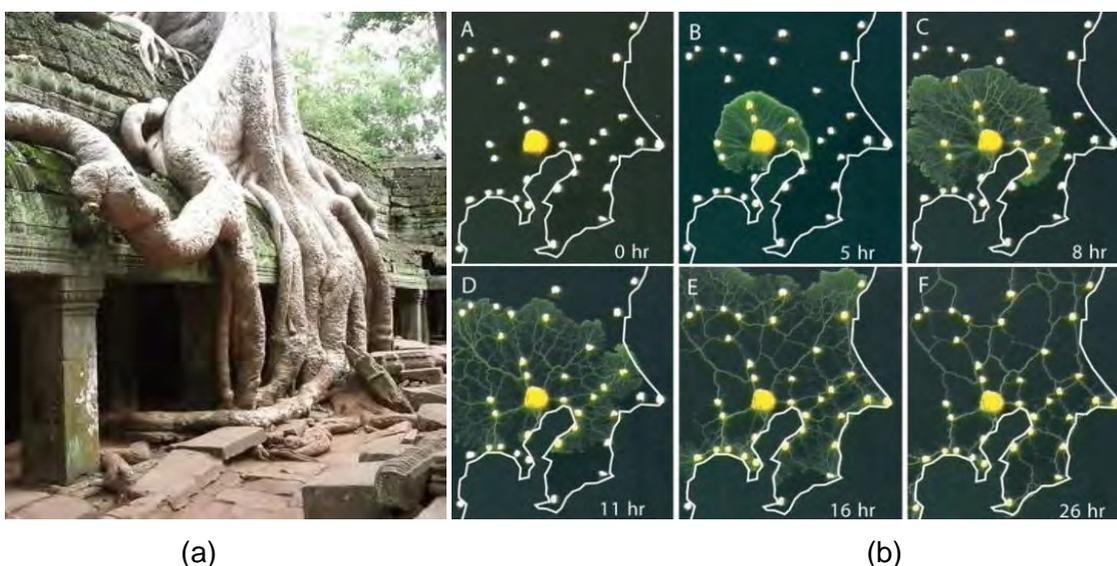


Figura 27: (a) Árvore (PANORAMIO, 2012) e (b) fungo (SANDERS, 2010) otimizam sua forma para adaptar-se ao ambiente.

A customização e a personalização da edificação também seguem esses dois conjuntos de regras, porque elas compartilham o enfoque, na diferenciação do produto (ou serviço), em função das características ou preferências do cliente. Essa diferenciação permite, em grau maior ou menor, a otimização dos produtos em relação às necessidades do cliente.

Existem vários conceitos de customização (ROCHA, 2011) e de personalização (PILLER, F., 2005). Nesta tese, o termo customização significa a caracterização do produto, em termos de sua constituição, forma e função, de acordo com as especificações do cliente corporativo. O termo personalização significa a caracterização do produto, em termos de sua constituição, forma e função, de acordo com as necessidades e vontades específicas do

consumidor final. Ou seja, o produto customizado é obtido na relação entre empresas, enquanto o produto personalizado é obtido na relação entre a empresa que produz o produto final e o consumidor (usuário) deste produto. Além desses dois conceitos, muitos autores trabalham com o conceito de customização de massa. Rocha (2011) traz um resumo dos estudos no campo de customização de massa, nas últimas duas décadas, e estratégias para sua implantação no setor de edificação habitacional. O nome customização de massa é extremamente atraente do ponto de vista mercadológico. Isso porque, como lembraram vários autores, é um aparente paradoxo ou oxímoro, que instiga a curiosidade das pessoas, parecendo atingir o impossível que é aliar custo e diversificação. Entretanto, este conceito não será utilizado aqui, porque apresenta algumas sobreposições aos dois conceitos anteriormente apresentados.

As justificativas para a customização são totalmente distintas daquelas para a personalização. No primeiro caso, as questões são essencialmente econômicas, pois envolvem ganhos em produtividade, redução de desperdícios, redução no consumo de energia, eliminação de retrabalho e redução de força de trabalho direto, entre outros fatores. Apesar disso, aspectos ligados a questões de sustentabilidade e ganhos de valor associados à qualidade, alinhados com a visão corporativa da empresa, também podem ser relevantes. No segundo caso, as questões são essencialmente de funcionalidade (incluindo-se, aí, a função estética e a função de status), embora questões econômicas também tenham um papel relevante no processo decisório, no cálculo da relação custo/benefício de cada alternativa para o cliente final.

Como mencionado na introdução desta tese, a habitação é, provavelmente, o único grande produto de consumo universal, cujo mercado não aceita a padronização de produto. Isto declara, por si, a importância que a personalização da edificação tem na percepção dos consumidores finais. Por isso, consideradas as possibilidades tecnológicas de cada época, é provável que todas as configurações possíveis de personalização, através de modularidade, flexibilização e participação do usuário, nas diversas fases do processo construtivo (incluindo projeto), já foram visitadas no passado, no que tange às práticas de produção de edificações. Particularmente as décadas de 1960 e 1970 foram riquíssimas em novas abordagens. O conceito de personalização é uma constante na arquitetura, onde várias abordagens sob os mais variados enfoques já foram propostas. Dentre os principais exemplos, devem ser citadas: a proposta de suportes e variações, por Habbraken, e as tentativas de Moshe Safdie, dentre outras (SILVA, 1980).

As possibilidades tecnológicas para viabilizar a customização e a personalização foram grandemente aumentadas nas últimas décadas, com a introdução de novas tecnologias,

como CAD, robotização e impressão 3D. Elas permitiram que diversos segmentos aumentassem substancialmente sua capacidade de responder de maneira adequada às demandas dos consumidores, sem impactar de forma significativa os custos de produção. Entretanto, a atual estrutura do macrossetor da construção limita substancialmente a aplicação dessas tecnologias, como será visto no capítulo 5 desta tese.

A personalização deve considerar a possibilidade de variação na configuração inicial do produto, mas, também, de alterações ao longo da sua vida útil. Os custos dessas duas variáveis são diferentes. As alterações ao longo da vida útil trazem possibilidade de atualização tecnológica, mas, ao mesmo tempo, uma cristalização no modelo tecnológico básico. Por exemplo, um revestimento de azulejos pode ser alterado diversas vezes ao longo da vida útil da edificação, mas o conceito básico de um revestimento impermeável sobreposto a uma parede permeável permanece. Este modelo não aceitaria como solução uma parede que fosse, ela mesma, impermeável.

Os princípios de customização e personalização estão relacionados aos níveis de implementação, bem como à definição dos campos do que é customizável ou personalizável. Alguns autores falam em modularidade (DURAY et al., 2000; ERNST, KAMRAD, 2000; GERSHENSON et al., 2004), para definir os limites da adaptabilidade dos produtos. Entretanto, esta modularidade tem um significado diferente do conceito de modularidade normalmente utilizado na indústria da construção. Aqui, o módulo é a unidade funcional, intercambiável com outras alternativas com a mesma função ou funções. Essa modularidade prescinde de uma universalidade dimensional, preconizada na construção. O único requisito de um módulo é a compatibilidade com outros módulos aos quais está conectado.

4.4.9.4 Desmaterialização

O princípio de desmaterialização é interpretado de diferentes maneiras na literatura. Herman et al. (1990) consideram que o conceito expressa o declínio, ao longo do tempo, no peso dos materiais utilizados nos produtos industriais, mas que também pode se referir ao declínio da energia incorporada. Segundo Cleveland e Ruth (1999), Milani (2005) e Rincón et al. (2009), o conceito de desmaterialização se refere à redução absoluta ou relativa na quantidade de materiais utilizados e/ou na quantidade de resíduos gerados, na produção de uma unidade de produção econômica. O termo também pode expressar maior eficiência e menor desperdício em todas as fases do processo construtivo, desde a extração de matérias primas, até a reciclagem de produtos de demolição (CASAVANT, T., 2012). Finalmente, um último significado é o de substituição de consumo de produtos pelo consumo de serviços, onde os produtos seriam compartilhados, através de diferentes

esquemas de uso comum (THACKARA, 2005). Nesta tese, todos os conceitos, exceto o último, traduzem a ideia de redução da quantidade de matéria para a produção de uma unidade de produto para a realização de uma determinada função. Este é o conceito aqui adotado.

A desmaterialização é viabilizada através da evolução tecnológica, que trabalha em quatro frentes: escalas progressivamente menores, compósitos, novos materiais e integração de diversos níveis.

Com relação às escalas, alguns campos da engenharia, notadamente a engenharia eletrônica, a engenharia de materiais, a bionanotecnologia e a nanoeletromecânica (com os MEMS³⁸) obtiveram a desmaterialização com variados graus de sucesso, chegando à escala nanométrica (ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING, 2004). A manipulação da matéria nesta escala ganhou impulso nas últimas duas décadas, com o desenvolvimento exponencial de grupos de pesquisa e empresas que trabalham no campo. Segundo Ashby e Johnson (2011, p.12), o século XXI será das monocamadas e, até, das moléculas individuais.

Os compósitos são uma combinação de dois ou mais materiais com propriedades complementares, que permanecem em fases distintas. Com isso, suas funções podem ser atendidas com maior eficiência através da sinergia entre as propriedades dos diversos materiais.

O desenvolvimento de novos materiais ocorre em diversas frentes: materiais metálicos, cerâmicos e polímeros. Os materiais metálicos experimentam novas possibilidades, que compreendem novas ligas e metais amorfos, ligas dopadas³⁹ e esponjas de diversos metais. Os materiais cerâmicos também são estudados com o enfoque em novas estruturas cristalinas, que permitem a obtenção de comportamentos com desempenho superior ao obtido nas estruturas cerâmicas tradicionais. Finalmente, os polímeros incluem novos monômeros e combinações de monômeros, bem como moléculas superpesadas. Um novo enfoque é o chamado design de materiais, onde as características químicas e físicas dos materiais são definidas a partir das propriedades que se deseja (ISAIA, 2005).

A desmaterialização também pode ser obtida por meio da abordagem multinível, pois ela viabiliza que os produtos intermediários da edificação sejam beneficiados pela interação

³⁸ MEMS é a sigla, em inglês, para Micro Sistemas Eletromecânicos (Micro Electro Mechanic Systems).

³⁹ Ligas dopadas são ligas com inserções de pequenas quantidades de um ou mais elementos diferentes daqueles que formam a liga.

entre os diversos níveis de estruturação da matéria. Esta integração permite que a solução apresente, no mesmo produto intermediário, diversas funcionalidades advindas das diferentes escalas, separadamente, ou da interação entre as propriedades de duas ou mais escalas. As estruturas multinível serão discutidas em maior profundidade no próximo item.

4.4.10 Princípios secundários de integração, aplicados na formação da solução

4.4.10.1 Estrutura multinível

Como foi visto no capítulo 2, a estrutura interna é uma das características fundamentais dos corpos que são os produtos intermediários da edificação (item 2.3.1.4). Naquele momento, foram descritos os aspectos essenciais da estrutura interna, considerada como sendo organizada em diversos níveis ou escalas. Também foi visto que os seres vivos sempre apresentam estrutura interna complexa e jamais são homogêneos. Isto decorre dos ganhos obtidos com esta maneira de organizar a matéria. Portanto, esses aspectos não serão descritos aqui.

Entretanto, no paradigma atual, esta estrutura interna foi substituída pelo conceito de homogeneidade, como uma das propriedades fundamentais dos materiais (item 3.5.3.4 – a). Evidentemente, a homogeneidade é uma abstração, uma idealização que não se cumpre na realidade física dos corpos, quer seja porque os arranjos internos sofrem distorções, em diversas escalas, quer seja porque sempre ocorrerão impurezas, que modificam o comportamento dos corpos. A homogeneidade conceitualizada serve para diversos fins, dentro daquele paradigma e a produção real obtém uma aproximação suficientemente boa para que o conceito permaneça útil. Para níveis acima daquele dos materiais, os processos de montagem formam estruturas multinível

A utilização do princípio de uma estrutura multinível está associada com outros conceitos. O primeiro deles é o princípio da redundância. Empregados em conjunto, esses princípios potencializam as vantagens de ambos, porque a organização de cada nível é feita de maneira a produzir propriedades emergentes no nível imediatamente superior, ao mesmo tempo em que aumenta a resiliência funcional do corpo. O segundo conceito é o de fractais, que pode ser definido como a reprodução, em escala menor, de uma característica (normalmente geométrica) dada. Na organização da matéria viva, o conceito de fractais é muitas vezes empregado casando o produto e o processo. Assim, a estrutura de uma árvore ou de uma haste de um vegetal pode ser organizada como um fractal, no tempo e no espaço. Na figura 28a, uma haste vegetal se bifurca ou trifurca sucessivas vezes do mesmo modo, caracterizando o fractal. Nos seres vivos, estruturas fractais normalmente estão

vinculadas a funções de distribuição e seu inverso (concentração), além de estruturas paralelas e redundantes, em diversos níveis, tais como a estrutura dos músculos e das fibras vegetais. Os diferentes níveis hierárquicos de organização na haste da figura 28a são caracterizados por suas diferentes funções. Assim, a haste principal tem a função de sustentação, as hastes bi ou trifurcadas têm a função de distribuição e as hastes menores (as últimas do fractal) têm a função de sustentação das flores. Fractais também podem ocorrer na matéria inanimada (figura 28b), se a mesma forma de energia atuar em diversas escalas; neste caso para liberação de tensões na tinta ou na argamassa do reboco.



Figura 28: Fractais: (a) em uma planta (foto do autor); (b) em um muro externo (foto do autor).

4.4.10.2 Processos bottom-up

Processos tecnológicos podem ser classificados como *top-down* ou *bottom-up*, como foi descrito no item 2.3.2.2 (Processos *bottom-up*). Processos tecnológicos *bottom-up* ocorrem através de uma sequência de passos, que organizam o fluxo de matéria, energia e informação, a partir do nível mais simples de constituição da matéria, passível de manipulação com baixa energia e com características singulares – o átomo⁴⁰. Tecnologias *bottom-up* tem recebido grande atenção, graças ao seu potencial de construção de estruturas a nível atômico e molecular, obtendo, assim, nanocompósitos, com características totalmente distintas daquelas encontradas em outras escalas (THE ROYAL SOCIETY, 2004). A utilização destes nanocompósitos pode ser feita isoladamente, ou através da sua incorporação em estruturas e materiais processados na escala macro. Entretanto, se o conceito de DBI for utilizado em combinação com outros princípios aqui apresentados, tais como emergência, o caminho mais promissor para a aplicação de

⁴⁰ Embora elétrons e prótons possam ser manipulados com baixa energia, estas partículas subatômicas não atendem o requisito de apresentarem características singulares.

nanotecnologias é através da utilização de uma abordagem *bottom-up* para criar componentes, que são constituídos através da organização da matéria em vários níveis de complexidade, correspondentes às diversas escalas dimensionais de manipulação.

Esta abordagem pode ser observada na forma como os seres vivos são constituídos, sem exceção. Por outro lado, o processo industrial de produção pode ocorrer de maneira segmentada, com vários componentes de um determinado nível hierárquico sendo produzidos em paralelo, para, depois, serem montados para formar o nível acima. Não existe, como alguns dos processos atuais da indústria de edificação, um processo cumulativo (por exemplo, na construção de uma estrutura de concreto armado, moldada no local). Isto significa que a precisão e a coordenação entre as partes é fundamental. Isto é obtido através de uma nova maneira de desenvolver o projeto, que Sato e Matsuoka (2009) chamaram de design emergente. A abordagem está representada na figura 29, abaixo. Nesta abordagem as características de processos e produtos *bottom-up* são introduzidas no processo de projeto, que tem uma ordem global a ser seguida. A ordem global informa, aos processos individuais, qual a sua parte no todo. Esta informação é vital para o funcionamento do todo, porque os processos em determinado nível não podem ter como referência os processos que ocorrem nos níveis acima dele. Por exemplo, uma estrutura de concreto tem uma definição geral de forma, que é utilizada para a definição dos pilares, vigas e lajes. Este é um processo *top down*. Mas cada componente desta estrutura deve responder especificamente aos esforços locais a que está submetido. Assim, eles são dimensionados e geram peso, que deve ser transmitido para os outros componentes da estrutura, definindo no somatório de todos os pesos, as cargas que a estrutura deve suportar. Além disso, estes componentes criam, pelas suas características e nas suas ligações com componentes adjacentes, uma parte da estrutura com uma rigidez específica. Esta rigidez também deve ser levada em consideração para a determinação da rigidez da estrutura como um todo. Estas duas características – peso e rigidez – são processos definidos em um nível e transmitidos ao nível superior em um processo *bottom up*. Caso o peso ou a rigidez do conjunto não sejam satisfatórios, devem ser revistas as soluções dos componentes individuais, em novo processo *top down*. Este processo geral segue até que uma solução satisfatória seja atingida.

Os processos produtivos *bottom-up*, apesar de apresentarem enormes vantagens em relação aos processos *top-down*, apresentam uma limitação relacionada ao tempo de processo. Como já foi discutido no item 3.3.2.1 (Reciclagem no ambiente natural), processos *top-down* são mais intensos, com maior taxa de transferência de energia e, portanto, mais breves. Processos *bottom-up* são mais lentos, porque a taxa de transferência de energia é

menor. Para contornar este problema e viabilizar processos *bottom-up* na indústria da construção, duas estratégias devem ser aplicadas.

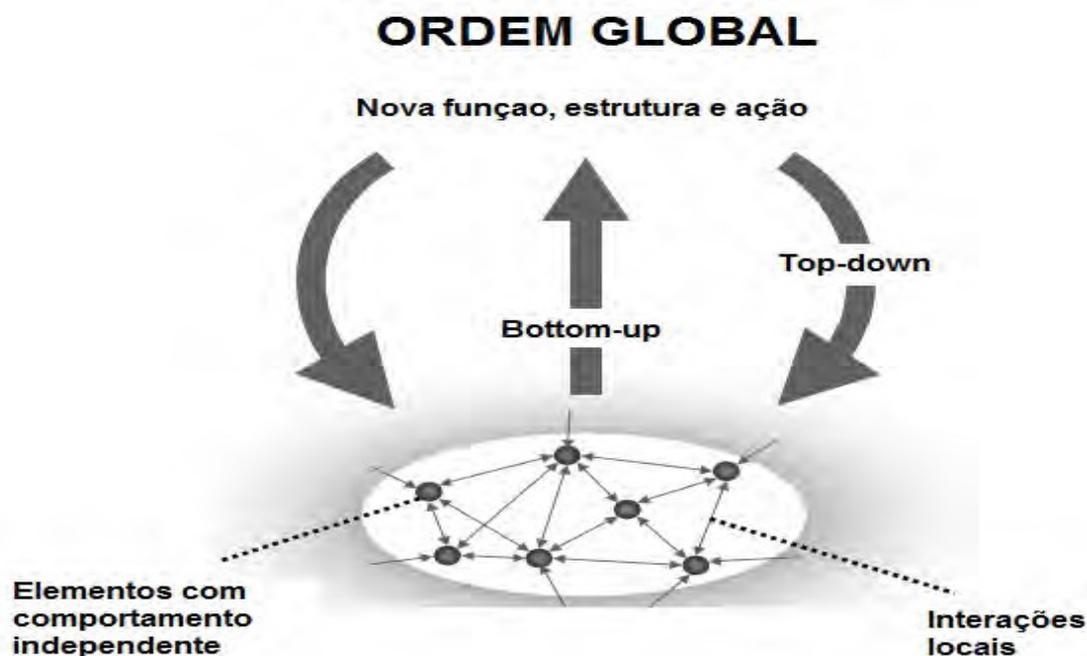


Figura 29: Representação esquemática do processo de design emergente. Fonte: SATO e MATSUOKA, 2009, p. 2769.

A primeira destas estratégias é a automontagem (*self-assembly*), útil, principalmente, nas escalas nanoscópicas e participante de todos os processos de organização da matéria orgânica. A automontagem é uma expressão particular de uma condição mais geral dos sistemas termodinâmicos afastados do equilíbrio, a auto-organização (KURAKIN, 2011). A segunda estratégia é a produção, em paralelo, em múltiplos níveis. Esta segunda estratégia pode ser melhor visualizada no exemplo de produção *bottom-up* fornecido pela indústria têxtil. Esta produção está associada a um processo decisório *top-down*, na fabricação de tecidos. Nesta indústria, as fibras de tecido estão organizadas pela planta de algodão, a partir do nível atômico, um processo *bottom-up*, tanto em produção, quanto em decisão (se as células individuais forem consideradas como unidades produtivas autossuficientes, nas decisões em relação às suas funções). Estes processos são levados a cabo em paralelo, com milhões de fibras sendo produzidas simultaneamente. Do nível das fibras produzidas, os processos humanos de fabricação beneficiam as fibras e as transformam em fios, também em processos paralelos de produção. Finalmente, os fios são organizados em tecidos, em teares. Novamente, os teares produzem, em paralelo, os tecidos que irão compor uma mesma roupa.

Exemplos de abordagem *bottom-up* na construção podem ser encontrados, dentre outros, nos telhados com cobertura orgânica, como os de capim Santa Fé (figura 30a) e em forros de bambu trançado (figura 30b).



Figura 30: Soluções que utilizam a abordagem *bottom-up*: (a) telhado com cobertura orgânica, semelhante ao capim Santa Fé. (Fonte: Virtual Tourist); (b) forro de bambu trançado. (Fonte: Revista Casa e Jardim).

Em contraposição à abordagem *bottom-up*, um feltro é um não tecido, fabricado com uma abordagem *top-down*, tanto no processo produtivo, quanto no processo decisório. Neste caso, as fibras são colocadas em camadas sem organização e são mantidas juntas por algum tipo de ligação, que pode ser um entrelaçamento aleatório, cola ou fusão parcial dos fios. O resultado é uma incapacidade de organizar a matéria nos níveis inferiores, impedindo o produto de extrair as vantagens desta organização. Evidentemente, o processo consome muito menos tempo que o processo *bottom-up*, embora esta diferença possa ser mitigada com a produção, em paralelo, deste último.

4.4.10.3 Multifuncionalidade

O princípio da multifuncionalidade expressa a ideia de soluções que possam desempenhar duas ou mais funções. Por solução, entende-se uma parte da edificação, que pode ser um componente, um elemento ou um subsistema. Isto significa que o conceito de multifuncionalidade depende do nível hierárquico definido para a solução. Por exemplo, a fachada de uma edificação cumpre diversas funções. Ela é, portanto, multifuncional. Entretanto, se for considerada apenas a parede de blocos da fachada, diversas funções deixam de estar presentes, tais como ventilação, passagem de luz e, possivelmente, suporte estrutural. O princípio de multifuncionalidade deve ser pensado como uma possibilidade de integrar, em uma única parte, funções que tradicionalmente são realizadas por partes distintas da edificação. Por exemplo, um painel de aquecimento de água é, normalmente, colocado sobre o telhado. Uma solução multifuncional pode integrar as estruturas do telhado

e do painel, formando um único elemento. Se for agregada, ainda, a função de reservatório de água, o sistema cumpre três funções, que, tradicionalmente, são realizadas por componentes separados.

O segundo aspecto da multifuncionalidade refere-se à simultaneidade, na realização das funções, no sentido de que a multifuncionalidade pode ser simultânea ou alternada. O ideal é que seja simultânea. Algumas soluções multifuncionais incorporam muitas funções, que somente podem ser utilizadas de maneira alternada. Estas soluções são possíveis porque utilizam um mesmo componente ou elemento para a realização de duas ou mais tarefas. Por exemplo, uma janela com vidro utiliza o vidro para bloquear a entrada de insetos, quando está fechada, e para permitir a ventilação, quando está aberta. Mas ela não pode realizar essas duas funções simultaneamente. Para que isso seja possível, é necessário instalar uma tela na janela. Como regra geral, a multifuncionalidade simultânea depende de uma combinação hierarquicamente bem estabelecida entre componentes (ou elementos) dedicados (neste caso, o vidro e a tela), com componentes compartilhados (neste caso a parte fixa da esquadria, que apoia o vidro e a tela). Os seres vivos desenvolveram inúmeras soluções multifuncionais. Um exemplo é o osso, que, simultaneamente, suporta o peso, dá pontos de fixação aos músculos, produz células (hemácias e fagócitos) e é uma reserva de cálcio para o organismo. Outro exemplo é a pele, também com múltiplas funções (proteção dos órgãos internos contra radiações, impactos e patógenos, respiração, regulação da temperatura interna, eliminação de toxinas, produção de vitamina D, tato e sensações de frio, calor e dor, dentre outras funções), conduzidas simultaneamente.

Algumas vezes, a multifuncionalidade advém de uma propriedade emergente. Por exemplo, a primeira e principal função dos olhos é ver. Mas, no caso dos humanos e de predadores em geral, o alinhamento da visão dos dois olhos (visão binocular) permite o efeito estereoscópico (ou estereopisia), que dá profundidade de campo à visão. O terceiro aspecto da multifuncionalidade, portanto, é a integração de níveis hierárquicos inferiores, formados por estruturas redundantes, para a obtenção de novas funções emergentes.

Na edificação, alguns elementos e subsistemas são particularmente propícios para a aplicação do princípio da multifuncionalidade. Dentre eles, sistemas de fachada (HAUSLADEN, 2006; GERHARDT, 2009; WUPPERTAL INSTITUTE, 2009) e forros integrados (ALLEN; IANO, 2008).

5 AVALIAÇÃO DE COMPATIBILIDADE ENTRE OS PRINCÍPIOS DE SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL E O PARADIGMA ATUAL

5.1 PROCESSO DE AVALIAÇÃO

O processo de avaliação da compatibilidade entre os princípios de sustentabilidade e o paradigma atual não enfocou separadamente cada princípio primário ou secundário, tanto na relação com o meio, quanto no desenvolvimento da solução. Ao invés disso, foi adotada uma linha de análise baseada nos três princípios básicos: **perpetuação**, otimização e integração. Eles foram adotados como eixos conceituais e foi avaliada a viabilidade de sua incorporação no paradigma atual. Essa linha de análise foi escolhida porque o processo de análise individual, de cada princípio, seria muito extenso e as conclusões encontradas seriam essencialmente as mesmas. Isto não significa que os princípios aplicados tenham sido desconsiderados na análise. Ao contrário, eles a contextualizam e mostram particularidades ao longo da análise. Também foram consideradas as complementaridades, modulações⁴¹ e limitações que os três princípios se impõem mutuamente. Por exemplo, uma solução que tivesse uma otimização pontual, à custa de uma sub-otimização do todo, não apresenta compatibilidade com o princípio da integração. A análise permitiu a detecção de incompatibilidades de cada um dos princípios com aspectos específicos do paradigma.

Com relação ao paradigma atual, foram consideradas para análise duas características essenciais: a estrutura do macrossetor, onde se destaca a hegemonia da indústria de materiais de construção (item 3.6.2); e as características complementares dos materiais (item 3.6.3.4): homogeneidade, monofuncionalidade, isotropia, constância formal, universalidade e tolerância ao erro.

5.2 O PRINCÍPIO DE PERPETUAÇÃO NO PARADIGMA ATUAL

O princípio de perpetuação sofre severas limitações à sua implementação no atual paradigma, tanto no que concerne aos aspectos da relação com o meio, quanto nas

⁴¹ Modulações ocorrem quando a utilização ou a atuação de um princípio é modulada ou regulada pela presença de outro princípio.

soluções adotadas pela indústria da edificação. Tais limitações inviabilizam a adoção integral desse princípio básico, bem como dos princípios aplicados dele derivados, como visto a seguir.

5.2.1 O princípio de perpetuação aplicado na relação com o meio no paradigma atual

Na relação com o meio, o paradigma privilegia diversas tecnologias que impactam negativamente o meio ambiente. O aumento entrópico residual gerado pela indústria de edificações é significativo (UNEP, 2011). Esse aumento é causado por diversas práticas adotadas pela indústria, que contrariam os princípios de sustentabilidade enunciados. Dentre elas cabe ressaltar: utilização extensiva de metais; necessidade de crescimento constante no volume; baixa reciclabilidade; geração de externalidades negativas; e adoção de soluções que não apresentam biodegradabilidade. Cada um desses aspectos será visto em maior detalhe abaixo.

Nos processos de obtenção/fabricação dos produtos da construção, não deveriam ser gerados resíduos que estão presentes externamente aos grandes ciclos de gás carbônico, água e oxigênio, conforme descritos por Lodka (1925), de modo a ter um MAER. Entretanto, isto ocorre, seja na forma de desorganização da biosfera, seja na forma de introdução de substâncias estranhas a esta biosfera, tais como metais (principalmente metais pesados) e estruturas moleculares artificiais, tais como plásticos e substâncias orgânicas tóxicas, que se diluem e dispersam no meio natural.

O uso continuado e extensivo de metais decorre da facilidade com que as características de homogeneidade, isotropia e constância formal são obtidas através das tecnologias de processamento desses materiais. Tais tecnologias permitem que sejam atingidas excelentes relações de custo/desempenho mecânico em geral e, especificamente, desempenho estrutural. Além disso, não são buscadas alternativas tecnológicas para outras funções, tais como transmissão de energia elétrica e geração de campo magnético (na indução de motores elétricos e bobinas de solenóides, dentre outros usos, o que torna a indústria refém das opções tecnológicas atuais. A indústria de materiais faz a opção por metais, gerando grandes externalidades no meio ambiente e na saúde humana.

O crescimento constante nos volumes processados de matérias primas decorre da ênfase dada nos materiais de construção, obtida através da hegemonia da sua indústria, que utiliza tecnologias que permitem ganhos, em função das economias de escala obtidas com os processos industriais adotados. Essas economias de escala não são exclusivas da indústria de edificações. Todas as indústrias que produzem segundo os mesmos conceitos de

homogeneidade, constância formal, monofuncionalidade, universalidade e tolerância ao erro, podem obter tais ganhos. Entretanto, a indústria de materiais de construção, como foi visto no capítulo 3, utiliza-se desses conceitos de maneira muito mais ampla do que outras indústrias. Isso permite que essas indústrias estejam constantemente buscando o aumento de sua produção para viabilizar novos ganhos de escala. No capítulo 6, serão visitadas tecnologias que não necessitam de ganhos de escala, na extensão utilizada na indústria de materiais de construção. Esse crescimento constante impede que o macro-setor adote tecnológicas compatíveis com o estado estável (steady-state), com fluxo constante de matérias primas, com ganhos que seriam, essencialmente, derivados de uma maior eficiência no uso de matéria e energia.

A baixa reciclabilidade dos materiais da indústria da construção é notória (ÂNGULO et al., 2001; ANDRADE et al., 2001; ULSEN, 2011). Da mesma forma, o reuso e a remanufatura também se apresentam como pouco expressivas. A baixa reciclabilidade, principalmente no curto prazo (RCP), ocorre porque as substâncias utilizadas, e os materiais e componentes com elas produzidos, não apresentam os atributos necessários para uma reciclabilidade em ambiente natural (biodegradabilidade) e não têm valor econômico significativo, além de, em muitos casos, como o concreto, consumir uma grande quantidade de energia para os processos de reciclagem (NOGUCHI et al., 2009). Outras substâncias, tais como metais, são recicláveis, embora com diversos problemas, tais como os problemas de utilização de ligas, já mencionado no capítulo anterior, da fragmentação e pulverização dos resíduos metálicos⁴², que tornam a etapa de coleta desses resíduos mais difícil, bem como da relação custo-benefício da reciclagem de alguns metais, especialmente o aço. Estas limitações fazem com que os percentuais de reciclabilidade nunca cheguem a 100%, como no caso dos biodegradáveis.

A geração das externalidades negativas decorre de processos ao longo das diversas etapas de extração, beneficiamento, industrialização, utilização e descarte dos diversos produtos intermediários das edificações (JOHN et al., 2005). Dentre esses processos, é importante salientar a participação dos metais, que geram externalidades desde sua extração até o seu descarte ou (em alguns casos e em menor intensidade) reciclagem. Essas externalidades têm como causa, em primeiro lugar, a extração de matérias primas não renováveis do meio natural, alterando as características deste meio, muitas vezes de maneira permanente, como no caso de minas a céu aberto (open pit) de minérios metálicos e de minerais não

⁴² Esta fragmentação pode ocorrer tanto na etapa de produção, com processos de corte, usinagem e desbaste, quanto na etapa de uso pelo desgaste e corrosão e na etapa de descarte, no corte e desintegração das partes da edificação.

metálicos. O beneficiamento dessas matérias primas também impõe diversas externalidades, principalmente a poluição causada por resíduos e para a geração da energia necessária. Os processos de transformação dos materiais também geram resíduos. O uso das edificações gera externalidades, tanto pela utilização de diversas formas de energia com alta intensidade, quanto pela pobre interação com os fluxos de matéria e energia (especialmente água e vento), quanto pela dispersão gradual de resíduos, principalmente de metais pesados. Finalmente, a geração de resíduos provenientes dos descartes de partes usadas das edificações, tanto de metais, quanto de outros minerais, sobrecarrega o meio ambiente, impactando sua capacidade de regeneração e de efetivar os serviços da natureza. Em geral, as externalidades estão ligadas a três causas principais: produtos com alto consumo de matéria, processos com alto consumo de energia e processos com geração de resíduos que não fazem parte dos ciclos naturais da biosfera.

O baixo e cada vez menor percentual de produtos biodegradáveis nas edificações, preferidos em favor de materiais, tais como: metais, concreto e plásticos, tem reduzido a biodegradabilidade, em geral, dos resíduos gerados pelo descarte parcial ou total de edificações. Esta tendência à substituição de produtos naturais é causada pela tendência à universalidade dos materiais de construção, promovida pela indústria desses materiais, que disseminam tecnologias de alta produtividade, que geram materiais com as características complementares já citadas. A indústria de materiais, hegemônica na definição de tecnologias para as edificações, otimiza seus ganhos com essa universalização de tecnologias e com ganhos de escala na produção desses materiais não biodegradáveis, cuja produção, em muitos casos, está concentrada em alguns pontos do globo e consome considerável energia de transporte, ao invés de utilizar recursos locais.

5.2.2 O princípio de perpetuação aplicado na solução no paradigma atual

Tanto no desenvolvimento, quanto na utilização da solução, o princípio da perpetuação, realizado no princípio da durabilidade estendida e nos princípios mais específicos de resiliência, redundância, manutenibilidade e robustez, não podem ser completamente implementados no paradigma atual.

O princípio de durabilidade estendida entra em antagonismo direto com o conceito de obsolescência programada, como ocorre, por exemplo, com os produtos da indústria de revestimentos cerâmicos, porque essa obsolescência não é definida em função do impacto ambiental causado pelo ciclo de vida dos produtos, mas pela maximização de lucro das empresas fabricantes. A aplicação desse conceito pode ser observada, obviamente, nos materiais ditos de acabamento ou de revestimento, tais como revestimentos de pisos,

azulejos, tintas, forros, metais sanitários e ferragens das portas. Mas é extensivo a, virtualmente, todas as partes visíveis das edificações, tais como telhas, portas, janelas e luminárias. A evolução tecnológica tem papel importante nesse processo, mas o desenvolvimento tecnológico é sempre realizado em associação com o desenvolvimento de novos padrões, mesmo que os antigos apresentem bom desempenho funcional, como é o caso de esquadrias de alumínio. Os fabricantes de perfis de alumínio sistematicamente introduzem novos perfis e novos padrões de acabamento, caracterizando assim o envelhecimento estético das soluções. Esses fabricantes da indústria de materiais apresentam, claramente, o caráter oligopolístico dessa indústria e a sua hegemonia no desenvolvimento de novas soluções, impondo à indústria da construção o ritmo de mudança que lhe é mais interessante. *Mutatis mutantis*, o mesmo arrazoado vale para a indústria de revestimentos cerâmicos, metais sanitários e outras de caráter oligopolístico.

O princípio da redundância é pouco aplicado na indústria de edificações. Essa condição é também imposta pela indústria de materiais de construção, que buscam a simplificação de seus processos. Mas, nesse caso, a indústria da edificação, que apenas absorve a tecnologia que lhe é apresentada, colabora com a não aplicação do princípio, primeiro porque não exige da indústria de materiais outras alternativas tecnológicas. Segundo, porque, muitas vezes, redundância significa maiores custos. Por exemplo, circuitos hidráulicos normalmente não são redundantes, ou seja, não há rotas alternativas de alimentação dos pontos de uso da água. Isso significa que, se surge um vazamento em determinada tubulação, somente existem duas alternativas: fechar o ramal e perder o ponto de uso (pia, vaso sanitário ou outro) ou manter o uso e aceitar o vazamento até que seja consertado. Em um circuito com rotas alternativas, o vazamento poderia ser eliminado se a perda do uso. Circuitos elétricos são mais redundantes, mas não existem tecnologias específicas para utilizar esse princípio. Ao contrário, as empresas de componentes elétricos para edificações tendem a utilizar outro princípio – da multifuncionalidade – nos desenvolvimentos de novos produtos. Caixas com duas e até três tomadas são cada vez mais frequentes e interruptores múltiplos são utilizados, sempre que possível. Uma indústria que aumentou a redundância de seus produtos foi a de condicionadores de ar. O ar condicionado central cede, gradativamente, lugar aos chamados *splits*. Esse aumento de redundância⁴³ vem com um aumento de custo de equipamento, que é parcialmente compensado pela eliminação de dutos. Mas esse aumento de redundância decorre do

⁴³ Neste caso, o aumento de redundância ocorre quando um único aparelho de ar condicionado central é substituído por dois ou mais aparelhos split. Esta redundância pode ser parcial se apenas os componentes instalados no interior da edificação são distribuídos nos diversos espaços internos, com a circulação do fluido de refrigeração sendo gerada por um único conjunto motor-compressor.

ganho que a indústria obteve, pois os dutos são fabricados localmente por empresas instaladoras, enquanto os *splits* são fornecidos integralmente pelos fabricantes, exceto pela tubulação de gases e fiação.

O princípio de manutenibilidade é virtualmente inexistente na indústria de edificações. Com relação às indústrias de materiais, cabe uma diferenciação em relação à indústria de equipamentos. Essa última tem a preocupação de garantir a manutenibilidade de seus produtos, até porque fornece garantias pós-venda. Mas a indústria de materiais, propriamente dita, não usa o princípio de manutenibilidade em nenhuma extensão. Algumas poucas soluções nesse sentido, como recessos acessíveis para as tubulações hidrossanitárias são imposições legais.

Finalmente, o princípio da robustez, exceto quando se trata do subsistema estrutural⁴⁴, também não se faz presente, quer nos materiais, quer nos componentes, elementos e subsistemas das edificações. O motivo é bastante óbvio e prosaico: incorporar robustez, seja física, seja funcional, torna os produtos, em qualquer nível hierárquico, mais caros. As empresas, em um ambiente competitivo, buscam se viabilizar oferecendo produtos com o menor custo possível. Nesse sentido, uma maior robustez emerge como qualidade na mudança de tecnologias. Por exemplo, o problema de esclerosamento de tubos de aço galvanizado, frequente no passado, foi praticamente eliminado com o advento dos tubos de PVC. Esses tubos admitem a circulação de água com altopercentual de sólidos suspensos e dissolvidos, sem a formação de incrustações. Equipamentos eletrônicos também admitem uma maior oscilação na tensão de corrente do que os equipamentos elétricos antigos. Nesses casos, e em outros, o aumento de robustez ocorreu como uma consequência bem vinda e não como um princípio que se pretendia incorporar.

Resumindo: de modo geral a durabilidade estendida não é interessante para a indústria de materiais de construção, porque reduz a rotatividade de seus produtos. Além disso, produtos que utilizam os princípios de robustez, redundância e manutenibilidade tendem a ser mais caros que aqueles onde esses princípios não estão presentes. Como essa indústria define os termos tecnológicos, esses princípios estão presentes de maneira muito rarefeita nas soluções de edificações.

⁴⁴ No sistema estrutural, a robustez é resultante da necessidade de lidar com processos e produtos que apresentam características com distribuição probabilística com grande dispersão (ver item 3.6.3.4.6 Tolerância ao erro). Isto significa que a eventual robustez em relação a uma determinada característica é erodida, no universo de produtos, pela distribuição normal de resultados daquela característica.

5.3 O PRINCÍPIO DE OTIMIZAÇÃO NO PARADIGMA ATUAL

O princípio de otimização não pode ser implementado de maneira integral no paradigma atual, tanto no que concerne à relação com o meio, quanto nas soluções para a edificação. Esses impedimentos decorrem, grosso modo, da estrutura do macrossetor da construção, bem como do papel privilegiado que os materiais desempenham no atual paradigma. Cada um desses aspectos será visto em detalhe abaixo.

5.3.1 O princípio de otimização aplicado na relação com o meio no paradigma atual

O paradigma atual estimula, como foi mencionado no capítulo 3, a oligopolização da indústria de materiais. Esta, por sua vez, tende a criar materiais universais (uma das características complementares dos materiais). Esses materiais não têm referências locais e não são desenvolvidos para as condições específicas, tanto econômicas, quanto físicas, de cada localidade ou região. Ao contrário, exceto por algumas variantes indispensáveis, esses materiais são desenvolvidos com o objetivo de atender as funções que são definidas como universais. Um caso de variantes é a utilização de perfis de alumínio na fabricação de esquadrias. Em regiões com um inverno muito rigoroso, como o Canadá, por exemplo, as janelas dispõem de um componente cuja função é a quebra da ponte térmica que se forma entre o interior e o exterior da edificação (figura 31a). Esse componente não está presente nas soluções desenvolvidas para países com um inverno mais ameno como o Brasil (figura 31b.). Padrões universais necessitam desconsiderar o meio ambiente em que estão. Em comparação, quando materiais e tecnologias de processo são desenvolvidas localmente, padrões específicos surgem em diversos níveis, utilizando-se de todos os recursos locais disponíveis (MCLENNAN, 2004).

A universalização, além de desprezar os recursos locais de matéria e energia, obriga a uma logística para a obtenção dos materiais que, em muitos casos, aumenta substancialmente os custos e as externalidades envolvidas no transporte desses materiais através das regiões e mesmo dos continentes (GERHARDT, 2009).



Figura 31: (a) – Perfis de alumínio com quebra de ponte térmica, vendido na Inglaterra (Fonte: Aluminiumdesign.net, 2013); (b) - Perfil de alumínio sem quebra de ponte térmica, vendido no Brasil (Fonte: Alcoa, 2009).

A extensa utilização de materiais universais tem também implicações sobre a identidade cultural local. A figura 32 mostra diversas edificações com características de identificação local, com características que interpretam a relação do homem com o meio. A figura 33 mostra soluções de edificações nas mesmas regiões geográficas onde estas características inexistem. Ou seja, estas edificações poderiam ser encontradas em qualquer região do mundo. O movimento chamado Regionalismo crítico (*Critical regionalism*) buscou, justamente, trazer para a arquitetura a integração de elementos locais, tais como clima, topografia e luz, com os aspectos positivos do desenvolvimento da arquitetura a nível mundial (FRAMPTON, 1983).



Figura 32: Soluções de edificações onde os materiais são locais e existe integração com o meio: (a) casa tradicional japonesa (Fonte: Gauri, 2011); (b) oca indígena no Xingú (Fonte: Edu Ambiental, 2012); (c) vila grega (Fonte: iStockphoto, 2013).



Figura 33: Soluções utilizando tecnologias e materiais universais são indistinguíveis do ponto de vista de sua identidade cultural e geográfica. (a) Osaka, Japão (Fonte: MOLINEIRAS, 2012); (b) Manaus (Fonte: WIKIPEDIA, 2005); (c) Patras – Grécia (Fonte: INDIGO SOCIETY, 2010).

Cada um dos exemplos de soluções integradas com o seu meio utilizou tecnologias desenvolvidas ou adaptadas localmente. A casa tradicional japonesa, por exemplo, usa materiais locais, mesmo aqueles que seriam normalmente descartados, como a palha de arroz, como enchimento dos tatames.

Evidentemente, tais tecnologias foram desenvolvidas por diferentes povos, em cada local, em determinado momento histórico do seu desenvolvimento tecnológico. A aplicação do princípio da otimização, em relação ao meio, não significa que as mesmas tecnologias devam ser utilizadas. Ao contrário, o conhecimento acumulado permite que novas tecnologias sejam empregadas, adaptando-as às circunstâncias locais.

Por outro lado, soluções que utilizam tecnologias e materiais universais são indistinguíveis. Elas podem estar localizadas em qualquer parte do globo e não se relacionam com o meio. Para torná-las distinguíveis, a última década viu uma crescente tendência à construção de prédios icônicos, que se relacionam consigo mesmos e com o ego dos arquitetos e lucro dos empreendedores, mas não com o meio ambiente à sua volta (JENCKS, 2005). A quantidade de material e energia consumidos são muito superiores àqueles que seriam consumidos, tanto na produção, quanto na utilização dessas edificações, em tecnologias que permitissem a integração com o meio ambiente.

A não utilização do meio ambiente, estimulada pela adoção de materiais e tecnologias dissociadas, causa um substancial aumento no consumo de energia. As árvores, que fornecem sombra no verão e ajudam a reduzir a velocidade do vento, economizaram 45,609 MWh de eletricidade e 17,3 MWh de gás natural, em 2007, na cidade de Nova Iorque, além de outros serviços, tais como retenção de água e purificação do ar (PEPER et al., 2007).

5.3.2 O princípio de otimização aplicado na solução no paradigma atual

O paradigma atual estimula a eficiência da indústria de materiais, às expensas de uma otimização da edificação, como um todo, na sua produção, assim como na sua utilização e descarte. Já foi visto, no capítulo 3, que a indústria de materiais aplica os conceitos de homogeneidade, constância formal e monofuncionalidade, de maneira a poder produzir em grande escala os mesmos materiais e reproduzir os processos produtivos, em todos os locais de fabricação. Além disso, como também foi visto, essa indústria arbitra, de acordo com a sua conveniência, as dimensões de seus produtos, para maximizar a eficiência na sua produção. Assim, tubos de PVC, perfis de alumínio, barras de aço, chapas de vidro e placas de porcelanato vêm com dimensões que não estão relacionadas com as necessidades específicas de seus usuários finais. O argumento da modularidade, para reduzir o desperdício e aumentar a eficiência, não teve, até o momento, aplicabilidade prática. Em primeiro lugar, porque a indústria de materiais não vê benefícios na sua implementação. Em segundo lugar, porque a definição das dimensões modulares seria uma tarefa extremamente árdua de ser realizada, considerando-se a pulverização da indústria de edificações. Outras indústrias customizam seus insumos e a modulação de dimensões não é prática corrente em nenhum grande segmento industrial. A eficiência nos produtos e processos dessas indústrias advém da hegemonia (ou liderança) exercida pela indústria que fabrica o produto final, aplicando diversos princípios específicos para aumentar a eficiência de suas soluções. A incompatibilidade do paradigma atual com cada um desses princípios será visto a seguir.

O primeiro princípio, da minimização no consumo de energia, tanto no processo de fabricação, quanto na utilização e descarte, é incompatível com uma indústria de materiais, que exige que praticamente todos os seus produtos sejam remanufaturados por um exército de pequenas indústrias, em um processo que foi chamado aqui de metabolização desses materiais. A energia é desperdiçada nos resíduos descartados, na própria metabolização e no transporte dos materiais e dos resíduos. Além disso, energia é desperdiçada no retrabalho de adaptação e correção de erros, muito frequentes na indústria de metabolização, assim como na indústria de edificações (SOUZA et al., 2004). A quantidade de adaptações é enorme, em cada prédio, decorrente da falta de customização.

O princípio do DBI não tem sido aplicado nos materiais de construção, apesar de a indústria de materiais ter escala para realizar pesquisas e evoluir suas soluções. O motivo da falta de pesquisas para a aplicação desse princípio é a natureza completamente distinta das soluções biológicas, em relação às soluções da indústria, no paradigma atual. Materiais biológicos são formados a partir da escala atômica, em processos bottom-up, e “são

organizados hierarquicamente, com propriedades não uniformes (anisotrópicas). Em contraste, nós produzimos materiais relativamente homogêneos, por manipulação em escala macroscópica e baseados em substâncias relativamente escassas (frequentemente tóxicas, tais como os metais” (CBID, 2012⁴⁵).

Existem limites impostos pela estrutura do macrossetor da construção à implementação dos princípios de customização e personalização na construção. Novamente, lembrando o que foi afirmado no capítulo 3, a hegemonia do setor pertence à indústria de materiais (3.6.2). Portanto, qualquer esforço no sentido de trazer a customização ou a personalização da edificação depende, essencialmente, de uma profunda alteração na estrutura interna e na dinâmica do setor.

O princípio de personalização é utilizado pela indústria de edificações, em alguns casos, de maneira mais intensiva do que em outras indústrias. Em alguns casos, essa indústria buscou compatibilizar algum grau de padronização com personalização, sendo isto conhecido como customização de massa. A grande intensidade no uso do princípio decorre, justamente, da total falta de padronização da indústria de construção, decorrente da posição subordinada que esta indústria detém na cadeia produtiva das edificações. A construção é a única indústria cujo produto tem consumo universal e onde a personalização é prevalente. Aparentemente, os aumentos de custo daí advindos não tem um impacto significativo o suficiente para inibi-la.

Por outro lado, o princípio da customização praticamente inexistente. A única customização que a indústria de edificações consegue é obtida na sua interação com a indústria de metabolização. Nenhum segmento da indústria de materiais customiza seus produtos, como já havia sido salientado no capítulo 3, pelos motivos já apresentados. Este princípio é, portanto, incompatível com o paradigma atual.

Finalmente, o princípio da desmaterialização sofre severos impedimentos sob o paradigma atual. A homogeneização, a monofuncionalidade e a constância formal, por um lado, juntamente com a necessidade de utilizar processos manuais e com baixo controle de qualidade e não repetitivos, forçam a indústria de edificações a utilizar soluções onde a quantidade de materiais é muito maior do que seria, caso pudessem ser otimizados os produtos intermediários das edificações. Um exemplo clássico dessa circunstância é o uso de vigas de aço em estruturas. A seção da viga é constante. O material é essencialmente homogêneo e com uma única função. O projetista calcula o ponto de maior esforço (no

⁴⁵ CBID é a sigla, em inglês, do Centro para o Design Biologicamente Inspirado (Center for Biologically Inspired Design).

caso, maior momento fletor) e define o mesmo perfil para toda a extensão da barra. O desperdício de material é evidente, mas inevitável, porque seria muito mais caro retrabalhar a viga para reduzir o excesso de material. Por outro lado, como os processos empregados, tanto na produção da viga, quanto na sua aplicação, são processos top-down, com um caráter estocástico na sua produção, o projetista vê-se obrigado a utilizar coeficientes de segurança, que geram um desperdício ainda maior de material.

5.4 O PRINCÍPIO DE INTEGRAÇÃO NO PARADIGMA ATUAL

A aplicação do princípio de integração, quer seja na relação com o meio, quer seja na solução, necessita que duas premissas básicas sejam atendidas. Primeiro, que os fabricantes dos diversos produtos intermediários da edificação sejam coordenados pelos fabricantes da edificação propriamente dita, ou seja, pelo produtor do produto final. Sem que isso ocorra, todo o esforço de integração que este último tentar realizar sempre ficará comprometido. Essa condição deve ser atendida – e de fato o é – em outras indústrias que fabricam diferentes bens. Um exemplo, já citado neste trabalho, são os fabricantes de computadores pessoais. Nas primeiras décadas, os computadores (com a exceção parcial dos computadores da Apple), eram fabricados a partir de componentes fornecidos por empresas especializadas, cujo objetivo era a integração no nível do componente. A integração no nível do produto final era feita de maneira precária. Como consequência, havia componentes cujo desempenho era comprometido pelas limitações de outros componentes. A própria solução para a integração desses componentes era uma carenagem, em forma de paralelepípedo, com esperas para encaixe de, virtualmente, qualquer componente, de qualquer fabricante. E cada função era desempenhada por um componente individualizado. Essa condição começou a mudar, primeiro com o crescimento da indústria de computadores, que passou a exigir componentes com maior grau de integração. A placa mãe, por exemplo, passou a ter também a placa de som, que antes era fornecida separadamente. Mas o grande avanço ocorreu quando os notebooks passaram a ganhar mercado. Ali, a integração deveria ocorrer de modo mais intenso, para redução de peso e volume. Essa demanda, que, além de integração física, também significava uma integração funcional, era customizada para diversos componentes, o que implicava um custo mais elevado. Mas a consolidação do processo levou a ganhos com a integração, e a situação atual é de integração completa de todos os componentes, principalmente dos notebooks e, mais recentemente, dos tablets. Essa situação poderia servir como paradigma para a indústria de edificações. Entretanto, os obstáculos para que isso ocorra residem na incapacidade da indústria de coordenar o processo de produção dos produtos intermediários, principalmente dos materiais de construção, como foi visto no capítulo 3. A

situação dessa indústria é, em todos os aspectos referentes à integração do seu produto, similar à situação vivida pela indústria de computadores pessoais nas primeiras décadas de sua fabricação. Questões mais específicas, relacionadas com a aplicação do princípio de integração na relação com o meio e com a solução em si são analisadas abaixo.

5.4.1 O princípio de integração aplicado na relação com o meio no paradigma atual

Alguns autores veem a sustentabilidade na construção como sendo viabilizada pela necessária integração entre o ambiente antropocêntrico (incluindo o homem) e o ambiente natural, no chamado sistema sócio-ecológico (REED, 2006; DU PLESI, 2009). Este pode ser considerado o nível hierárquico mais elevado de integração, que, segundo esses autores, não ocorre no paradigma atual, porque isso necessitaria uma nova visão de mundo, holística e integradora. Em um nível inferior, a necessidade de integração das expectativas culturais e econômicas são frustradas no atual paradigma, quando a construção verde é buscada (KIBERT, 2007).

No nível da edificação, as tecnologias de edificação expressam uma solução universal, praticamente indistinguível entre as diversas regiões do globo. Uma edificação construída em Trípoli (figura 34 a) não se distingue substancialmente de outra construída em Porto Alegre (figura 34 b). Esta universalização das soluções leva a uma dissociação entre a edificação e o meio onde ela se encontra, quer seja o meio físico, quer seja o meio cultural.



Figura 34: (a) edifícios em Trípoli (Fonte: MARSNJAK, 2012); (b) edifício em Porto Alegre (foto do autor), sem integração com o meio físico e sem representação da cultura local.

Uma edificação tradicional na Líbia, ao contrário, é única e pode ser identificada com seu caráter regional e carga cultural, além de utilizar materiais locais, tais como os tijolos de adobe, empregando tecnologias apropriadas para lidar com o clima daquela região (figura 35). Nos edifícios construídos em Ghadamès, os quartos são frescos no verão e quentes

nas noites frias, graças às soluções tradicionais de arquitetura e de engenharia adotadas (AUROVILLE EARTH INSTITUTE, 2012).

A integração entre a cultura e a edificação, através dos diversos níveis de organização do produto e das diversas etapas do processo construtivo, não precisa e não deve se prender às tecnologias tradicionais. Entretanto, deve haver uma coevolução entre ambas, com a utilização dos recursos locais em máxima extensão. No caso do paradigma atual, isso é inviabilizado porque existe uma associação entre, de um lado, os materiais universais utilizados e os componentes e que são derivados deles e um conhecimento de sua aplicação. Por exemplo, as espessas paredes de adobe, características da arquitetura tradicional líbia, tinham uma inércia térmica que, associada a uma arquitetura de varandas, que protegiam as fachadas, propiciava um conforto térmico que, nos prédios modernos de Trípoli, somente podem ser obtidos com a utilização de condicionadores de ar (figura 36). Por outro lado, os perfis de alumínio não permitiriam as diferentes formas de janelas características daquela região (figura 37). A coevolução entre cultura, arquitetura e materiais só é possível dentro de um paradigma que permita flexibilidade tecnológica para expressar as variações culturais de cada local.



Figura 35: Arquitetura tradicional líbia. Edifícios com arcos, feitos com tijolos de adobe e carregados de significado cultural(AUROVILLE EARTH INSTITUTE, 2012).



Figura 36: Prédios em Trípoli com arquitetura ocidental e condicionadores de ar: (a) Aeroporto Internacional de Trípoli (PRESSTV, 2012); (b) Prédio do governo a oeste de Trípoli (BEUBY, 2011).



Figura 37: Janelas de diferentes formas. em Trípoli. (Fonte: (a) – OIEME, 2007; (b) RAHAYEL, 2013; (c) LES OBSERVATEURS, 2013)

5.4.2 O princípio de integração aplicado na solução no paradigma atual

A produção e utilização de estruturas multinível somente são possíveis, no paradigma atual, a partir do nível dos componentes. Isso é decorrência da homogeneidade característica dos materiais nesse paradigma. Embora existam materiais que apresentem estruturas heterogêneas, como o concreto, sua produção não utiliza o princípio *bottom-up*, ou seja, a matéria é distribuída dentro do concreto de maneira aleatória. Com isso, os benefícios desse princípio não estão presentes neste material. Além disso, sua heterogeneidade apresenta uma constância ao longo de todo o material, não permitindo que ele seja utilizado como um material funcionalmente graduado (*functionally graded material*). Outros materiais heterogêneos, como as placas cerâmicas, também têm ganhos com a heterogeneidade, mas esse ganho não é otimizado porque cada material da placa é produzido por processos *top down*.

Finalmente, a multifuncionalidade não está presente no paradigma atual, visto que os materiais são caracteristicamente monofuncionais. Existe multifuncionalidade, obtida através da abordagem *bottom up*, em níveis hierárquicos mais complexos, como o nível dos elementos, tais como as janelas, caracteristicamente multifuncional. Mas, nesse caso, novamente, o princípio não pode ser utilizado em todo seu potencial, devido às características de monofuncionalidade dos materiais.

5.5 CONCLUSÃO DA AVALIAÇÃO DE COMPATIBILIDADE

A análise da compatibilidade entre os princípios de sustentabilidade propostos e o paradigma atual mostrou que a grande maioria dos princípios é total ou parcialmente incompatível com esse paradigma. As duas principais razões para isso são a estrutura do macrossetor, onde a indústria de materiais desempenha um papel hegemônico, impondo suas soluções tecnológicas, através das características complementares dos materiais de construção (homogeneidade, monofuncionalidade, constância formal, etc.). Essa limitação estrutural da aplicação dos princípios de sustentabilidade somente pode ser ultrapassada através da adoção de um novo paradigma, com duas características fundamentalmente diferentes: a hegemonia ou liderança da indústria de edificações, coordenando o desenvolvimento de tecnologias e de produtos intermediários da edificação, aumentando sua integração, otimização e perpetuação; e a mudança tecnológica dos processos produtivos, permitindo que os produtos intermediários da edificação apresentem um conjunto de características complementares diametralmente opostas às dos materiais, tais como heterogeneidade, variação formal, multifuncionalidade, redução da variabilidade e especificidade local.

6 CARACTERÍSTICAS DE UM PARADIGMA COMPATÍVEL COM OS PRINCÍPIOS DE SUSTENTABILIDADE

Neste capítulo, primeiramente são descritas as características importantes que devem estar presentes em um novo paradigma da construção de edificações. Essas características estão relacionadas aos princípios de sustentabilidade, à estrutura do macrossetor de construção de edificações e aos produtos e processos do macrossetor. Depois, são descritos, em maior detalhe, cada um desses aspectos.

6.1 CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES DE UM NOVO PARADIGMA

Um paradigma que seja compatível com os princípios de sustentabilidade, mencionados no capítulo 4, deve apresentar diversas características que o distinguem do paradigma atual. Na medida do possível, estas características devem:

- 1) Construir essa compatibilidade, a partir dos três eixos fundamentais, caracterizados pelos três princípios básicos (perpetuação, otimização e integração), de maneira equilibrada;
- 2) Permitir a reformulação da estrutura e dinâmica do macrossetor da construção, compatível com produtos e processos que possam incorporar os princípios de sustentabilidade, tendo a indústria da edificação como segmento líder (ou hegemônico), devido à sua condição de indústria do produto final;
- 3) Possibilitar a geração de produtos intermediários, que incorporem os princípios de sustentabilidade. Mais especificamente, substituir o conceito de material, pelo de estrutura multinível, com características complementares opostas às dos materiais.
- 4) Utilizar processos que sejam compatíveis com os princípios de sustentabilidade, em todas as fases de produção, desde a extração de matérias primas, até o descarte e reciclagem das edificações (ou de suas partes), no final de sua vida útil.

Além desses quatro pontos a serem atendidos pelo novo paradigma, o desenvolvimento de soluções deve ser capaz de utilizar uma abordagem que utilize as funções das edificações em seus diversos níveis hierárquicos, para a definição dos produtos e processos que as

constituem. Tais funções, como visto no capítulo 2, são a expressão da interação entre os corpos (produtos intermediários, a própria edificação e o conjunto de edificações), que pode ser em qualquer escala, até a cidade ou aglomerado metropolitano. Para lidar com as funções com essa abordagem, foi desenvolvida uma metodologia, chamada de modelagem energética. As características dessa modelagem serão vistas ao final desse capítulo.

O novo paradigma de construção caracteriza-se por uma dicotomia, tanto de produto, quanto de processo. Em uma primeira fase de processo, esta dicotomia identifica aqueles processos transformativos que decompõem os corpos, quer eles sejam naturais ou artificiais, até o nível de suas estruturas moleculares, aumentando sua entropia. Em uma segunda fase de processos, são identificados os processos conectivos, desde o nível molecular, até o nível da edificação, como um todo. Com relação ao produto, a dicotomia identifica um primeiro tipo de produto, que é o resultado da desagregação dos corpos, ou seja, da destruição, tanto de sua estrutura interna, quanto de sua forma, descaracterizando, assim, a sua especificidade funcional original, ampliando ao máximo sua potencialidade para uma diversidade de usos. Um segundo tipo de produtos passa a agregar, novamente, a matéria, em níveis crescentes de complexidade, desde o nível molecular até a edificação. Existe, evidentemente, uma equivalência, uma simetria bilateral entre as dicotomias de produto e processo. É interessante notar que os processos descritos são equivalentes aos processos que ocorrem com os animais. O primeiro grupo de processos (processos transformativos) é análogo aos processos de digestão do alimento, com a dupla função de obter matéria e energia. O segundo grupo de processos é análogo aos processos de constituição e transformação da energia obtida em formas utilizáveis pelos corpos, na sua constituição e funcionamento.

6.2 COMPATIBILIDADE DO PARADIGMA COM OS TRÊS EIXOS

Como foi dito no capítulo 4, quando foram apresentados os princípios básicos, eles devem ser tomados em conjunto, pois se limitam e modulam mutuamente. Um paradigma que incorpore esses princípios deve, sempre, permitir que haja um equilíbrio entre eles, nas soluções encontradas, visto que, muitas vezes, como foi mencionado naquele capítulo, a aplicação de um princípio implica na limitação da aplicação de outro.

A incorporação dos princípios de sustentabilidade será descrita, de maneira específica, nos diversos aspectos que serão discutidos neste capítulo. Serão enfocados: a estrutura e dinâmica do macrossetor da construção; os produtos intermediários da edificação; os

processos produtivos e degradativos e, por fim; o desenvolvimento de soluções utilizando o conceito de modelagem energética.

6.3 ESTRUTURA E DINÂMICA DO MACROSSECTOR DA CONSTRUÇÃO

No capítulo anterior, ficou demonstrada a impossibilidade de incorporar diversos princípios de sustentabilidade pelo macrossetor, em função do papel hegemônico que a indústria de materiais exercia, em toda a cadeia produtiva. A estrutura do macrossetor deve reservar papel de liderança à indústria do produto final – as edificações, de modo a permitir-lhe coordenar as características dos produtos intermediários, para que os princípios de perpetuação, otimização e integração possam ser utilizados, em seu potencial máximo, neste produto final.

6.3.1 Hegemonia da indústria da edificação

A indústria da edificação tem um papel central no novo paradigma: cabe a ela coordenar todos os esforços, no sentido de garantir que os três princípios básicos de sustentabilidade sejam aplicados na máxima extensão e intensidade possíveis. Cada um desses princípios deve ser expresso através de diferentes atividades conduzidas por essa e por outras indústrias do macrossetor da construção, como será visto a seguir.

A indicação dessa indústria como coordenadora do processo construtivo não carrega consigo nenhum julgamento de valor com relação à sua capacidade atual de atuar como tal. De fato, esta é, antes, uma necessidade estrutural do novo paradigma e não uma apreciação que qual segmento do macrossetor é mais apto, no momento atual, para exercer tal papel.

6.3.1.1 Aplicação do princípio da perpetuação, de modo hierarquizado

No novo paradigma, o princípio da perpetuação segue a premissa, já enunciada no capítulo 4, de que cada nível hierárquico tem prevalência na aplicação desse princípio, em relação aos níveis hierárquicos inferiores. Essa premissa está contemplada na norma brasileira NBR – 15.575, porque, ali, nenhum componente, elemento ou subsistema deve ter vida útil superior à vida útil da própria edificação. Isto significa que não faz sentido o todo esgotar sua vida útil, enquanto as partes sobrevivem. Por exemplo, uma janela que, terminada a vida útil do prédio, permanece em boas condições de uso, é um caso de quebra dessa premissa. É necessário justificar tal premissa, primeiro, porque podem surgir situações em que essa inversão pode ocorrer; segundo, porque um dos conceitos mais divulgados por

quem busca sustentabilidade na construção é o reuso dos componentes e elementos de edificações.

Quando essa situação ocorrer, isto deve ser devido a uma incapacidade de projetar uma condição em que um corpo, em um nível hierárquico mais baixo, tenha uma vida útil menor do que o corpo de nível hierárquico mais alto, ou a uma vida útil que foi prolongada por substituição de um corpo anterior. Por exemplo, um piso cerâmico pode estar em boas condições quando o edifício terminar sua vida útil, mas isso pode ser devido à substituição de um piso que havia anteriormente.

O reuso de componentes e elementos, embora seja uma alternativa quando surge o descasamento entre a durabilidade da parte e do todo, não pode ser tomado como princípio geral a ser seguido, porque existem diversos problemas na sua implementação. Em primeiro lugar, o esgotamento da vida útil de um prédio pode expressar a superação das tecnologias ali empregadas. Portanto, reutilizar componentes significa reempregar tais tecnologias em detrimento de novas opções tecnológicas. Em segundo lugar, a reutilização traz questões logísticas importantes: onde estocar; quem vai revisar a qualidade e funcionalidade das partes que serão reaproveitadas e, se for o caso, promover os reparos e melhorias necessários; quem dará a garantia para o bom funcionamento das partes reutilizadas; como administrar a utilização de peças, necessárias, em quantidades que não coincidem com as quantidades disponíveis. Essas questões fazem com que a reutilização se restrinja a um mercado relativamente pequeno e altamente especulativo, uma condição que não deve ser alterada em breve. Há estudos de casos em que um esforço promoveu, de um modo ou outro, a reutilização direta ou através de remanufatura ou reciclagem (ver figura 17 – Processo produtivo geral e na construção de edificações).

A abordagem geral adotada na proposição desse novo paradigma é o de esgotamento da vida útil das partes, coincidente com o esgotamento da vida útil da edificação. Cabe à indústria da edificação coordenar as indústrias de componentes, elementos e subsistemas para que isso possa ocorrer. Idealmente, o término da vida útil significaria, também, o esgotamento do valor de troca da edificação. Ela seria, então, reciclada por meio de serviços da natureza. Por isso, é fundamental que todas as partes sejam – idealmente – biodegradáveis. Certamente, isso implica em um certo grau de externalidade, mas bem menor do que o observado hoje, onde a perda de valor de troca das partes da edificação e a inexistência de legislação, que limite as externalidades, implica em uma carga ambiental já comentada por inúmeros autores e citada neste trabalho.

6.3.1.2 Aplicação do princípio da otimização, por meio da coordenação das diversas indústrias do macrossetor da construção

No novo paradigma, o princípio de otimização também segue a hierarquia de níveis. Isto é, a otimização do todo tem precedência sobre a otimização da parte. Para que isso seja viabilizado, a exemplo de outras indústrias já citadas nesta tese, a indústria de edificações deve coordenar o desenvolvimento dos diversos produtos intermediários, de modo a garantir que tais produtos sejam condutivos a uma otimização, a nível de edificação⁴⁶. Duas implicações são decorrentes da aplicação do princípio. Primeiro, a indústria de materiais de construção, que otimiza seus produtos em detrimento das indústrias de metabolização e da indústria de edificações, deveria alterar substancialmente sua prática produtiva (processos e produtos), para produzir componentes, elementos e subsistemas customizados. O paralelo já utilizado da indústria de vidros ajuda a demonstrar a ideia. O vidro do automóvel é desenhado para otimizar o desempenho do veículo, como um todo: aerodinâmica, segurança, peso, estabilidade, visualização, proteção contra raios ultravioleta, entre outros. Para tanto, todas as características do vidro, em termos de constituição (substâncias e estrutura interna) e forma (geometria e escala), são previamente acordados com a indústria automobilística, para que a otimização ocorra no nível do veículo e não no nível do vidro, apenas. Essa prática produtiva é totalmente distinta, como já foi afirmado aqui diversas vezes, daquela em que a mesma indústria produz para a indústria de edificações. Para tornar dramática esta diferença, basta imaginar como seria uma indústria de automóveis, que recortasse seus vidros planos para instalá-los em seus veículos. Todas as funções do veículo citadas seriam subotimizadas e a quantidade de resíduos gerada seria substancial. De fato, isso foi o que ocorreu com esta indústria em seus primórdios, mas começou a mudar, com o advento da linha de montagem. Nessa nova relação entre indústrias, a indústria de partes deveria abandonar o conceito de material, como é entendido hoje, com as suas seis características complementares, discutidas em 3.6.3.4 (Seis conceitos complementares aplicados aos materiais). Essa questão será vista, em maior detalhe, mais abaixo, no item 6.4 – Produtos intermediários da construção de edificações no novo paradigma.

⁴⁶ Segundo este princípio, o nível da cidade teria precedência na otimização, em detrimento da otimização de cada edificação individual. Entretanto, embora essa colocação esteja correta, sua aplicação foge do escopo desta tese.

6.3.1.3 Aplicação do princípio da integração, por meio da coordenação das diversas indústrias do macrossetor da construção

O princípio da integração deve se manifestar, tanto nos processos, quanto nos produtos, ao longo da cadeia produtiva do macrossetor, iniciando pela produção das matérias primas. A coevolução entre as soluções da indústria da edificação e os valores culturais e a dinâmica da economia de mercado, conduzem a soluções cujas características não podem se afastar das soluções comumente encontradas a ponto de provocar um rompimento com as soluções culturalmente aceitas, inviabilizando a coevolução da tecnologia com os valores culturais. Entretanto, como já foi visto, este princípio deve ser compatibilizado com a otimização das soluções; isto é, com a necessidade de utilizar as características do meio e as suas fontes de matéria e energia para a produção das edificações. Um paradigma integrador terá que buscar as soluções que interpretem as condições naturais, muitas das quais já existiam antes da introdução de materiais e tecnologias, que dissociaram a produção de edificações, do meio em que se encontram (ver item 5.4.1). Um paralelo com as soluções nos meios de transporte seria a reintrodução do uso de bicicletas, como transporte urbano. As novas bicicletas, entretanto, são tecnologicamente distintas daquelas que originalmente circulavam pelas cidades. Ou seja, os conceitos básicos são aproveitados, mas as soluções incorporam o desenvolvimento tecnológico disponível. É possível que, no futuro, as bicicletas tomem novas formas e funções, mas este é, também, um processo de coevolução que deve ocorrer. De maneira similar, as edificações produzidas de acordo com um novo paradigma devem incorporar aqueles princípios que possibilitaram a muitas culturas aumentar a funcionalidade de suas edificações, sem os recursos de alta energia, tanto na produção de materiais, quanto no uso dessas edificações.

No nível das soluções, a integração passa, necessariamente, pelos conceitos de multifuncionalidade e estrutura multinível. Esses conceitos são complementares e são viabilizados pelo uso de redundância, no desenvolvimento das soluções, permitindo a obtenção de propriedades emergentes. As tecnologias de projeto atuais raras vezes conseguem produzir tais soluções, em níveis hierárquicos inferiores ao dos materiais. Materiais compósitos e nanomateriais são tentativas iniciais para romper a barreira conceitual do material. Para obter resultados nesse campo, uma nova abordagem, já mencionada, poderá ser utilizada: a modelagem energética. Antes, porém, o conceito de material deve ser substituído pelo conceito de estrutura multinível, discutido a seguir, o que somente poderá ocorrer se a indústria de edificações liderar esse processo. Esta necessidade decorre do conceito de interação entre os diversos níveis hierárquicos da solução tecnológica da edificação, iniciada por demandas no nível mais elevado.

6.3.2 Eliminação do conceito de material

O papel central que os materiais desempenham no atual paradigma, com suas seis características complementares, justifica a necessidade de substituição desse produto intermediário da edificação por outras estruturas, com características complementares distintas e, em alguns casos, diametralmente opostas às dos materiais. Tais estruturas serão chamadas, aqui, de estruturas multinível, porque são constituídas em diversos níveis, que interagem e dão a elas as características complementares, que lhes emprestam sua utilidade no novo paradigma. O termo estrutura multinível foi adotado por falta de consenso, na literatura, de como chamar esses corpos, que se distinguem dos materiais. Outros nomes de conceitos com variados graus de equivalência a este são: materiais compósitos (ASHBY, JOHNSON, 2011), materiais funcionalmente graduados (KNOPPERS, G. E. et al., 2004), materiais hierárquicos (MCDOWELL; OLSON, 2009), estruturas hierárquicas (BUEHLER, 2010) e estruturas multiescala (SHI; GHANEM, 2004). A premissa básica, por traz de todos esses conceitos, é de que estruturas com características variáveis, ao longo de diferentes escalas, desempenham melhor (com mais eficiência, menor consumo de energia e matéria) diversas funções, quando comparadas a materiais com estruturas simples e repetitivas. As características complementares dessas estruturas funcionais são descritas a seguir. Elas são: heterogeneidade, anisotropia, variação formal, intolerância ao erro, especificidade (geográfica, econômica e cultural) e multifuncionalidade. Não serão discutidos, abaixo, os conceitos de especificidade e multifuncionalidade, porque eles já foram discutidos, como princípios de sustentabilidade, no capítulo 4.

6.3.2.1 Heterogeneidade

No esquema geral dos produtos intermediários da edificação, apresentado no item 2.3 (O produto edificação), a heterogeneidade é uma característica associada à constituição dos corpos.

A heterogeneidade está universalmente presente nas estruturas produzidas por seres vivos (CBID, 2012). Entretanto, essa característica foi, por muito tempo, rejeitada como sendo imprópria para materiais de engenharia. Ao contrário, a homogeneidade sempre foi a característica valorizada. A homogeneidade era, na verdade, uma premissa necessária para os próprios algoritmos para o cálculo de estruturas, por exemplo. Diversos estudos buscaram a melhor abordagem para representá-las como sendo homogêneos materiais e estruturas heterogêneas (SANTOS JUNIOR, 2008), principalmente para propriedades mecânicas relacionadas a funções estruturais. Esta valorização dos materiais homogêneos, considerados materiais ideais, passou a ser desafiada, à medida que aumentou a compreensão do funcionamento das estruturas biogênicas. Também colaborou para essa

mudança de valoração o crescimento do campo da nanotecnologia, especialmente nanomateriais e nanoestruturas e a descoberta de que seres vivos obtêm funcionalidades, até então insuspeitas, dessas estruturas. Alguns casos amplamente estudados são a estrutura do nacre; os pés do *gegko* (lagartixa); a estrutura da asa de borboletas e besouros, para a produção de cores iridescentes; a fotossíntese; a bioquimiluminescência; as estruturas de biossílca, especialmente de algumas esponjas e diatomáceas; a estrutura dos ossos; as sinapses neuronais; a produção de fios de seda, pelas aranhas, dentre outras. Essas estruturas têm, como características comuns, a heterogeneidade e o desempenho de funções por meio de sofisticadas estruturas multiníveis, que se iniciam na escala nanoscópica.

A mudança de valoração da heterogeneidade dos materiais, que equivale a uma mudança de paradigma na ciência dos materiais, tem sido gradativamente incorporada nas pesquisas de engenharia. Não se fala mais em heterogeneidade em um dimensão ou duas, mas nas três dimensões. Em alguns casos, essa heterogeneidade é apresentada em um estágio mais simples, dos materiais funcionalmente graduados (HASCOET, J. Y.; MULLER, P.; MOGNOL, P., 2012); mas também são estudadas as estruturas com heterogeneidade complexa, onde a variação não segue uma progressão (linear ou exponencial), mas é variável, segundo funções mais complexas, aproximando tais modelos das estruturas biológicas (BUEHLER, 2010).

A heterogeneidade está profundamente relacionada com o conceito de estruturas multinível, porque tais estruturas permitem que as vantagens da heterogeneidade sejam aproveitadas em diferentes escalas, dependendo das propriedades que se deseja obter. Além disso, as estruturas heterogêneas dependem de diversos níveis para serem viabilizadas. Ou seja, muitas vezes não é possível uma transição simples e direta de uma estrutura heterogênea, na escala nanométrica, para um corpo de dimensões macrométricas. Por exemplo, a fixação do *gegko* depende de diversos níveis estruturais, para passar de uma geometria nanoscópica, com grande superfície, para uma pata inteira do animal (NOSONOVSKY; BHUSHAN, 2007) (figura 38).

A utilização do conceito de heterogeneidade ainda esbarra em dois problemas principais: no projeto, a utilização de diversas escalas, para definir a propriedades dos corpos (neste caso, dos produtos intermediários da edificação); na fabricação, a produção economicamente viável de estruturas complexas, em várias escalas.

Existem, entretanto, casos de estruturas multinível sendo produzidas e utilizadas na engenharia. Um primeiro exemplo são as placas cerâmicas de revestimento, que contam

com uma estrutura multinível, no eixo z (de menor dimensão). Outro exemplo são as placas de equipamentos eletrônicos, que são estruturadas desde o nível nanoscópico, até o nível macroscópico.



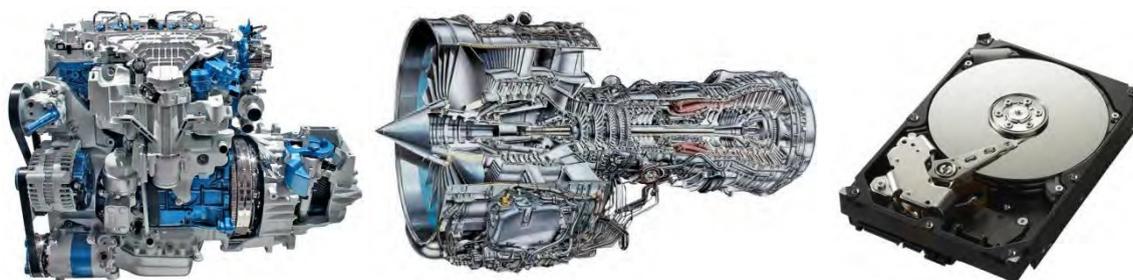
Figura 38: Estrutura hierárquica da pata do gegko (NOSONOVSKY; BHUSHAN, 2007).

6.3.2.2 Variação formal

No esquema geral dos produtos intermediários da edificação, apresentado no item 2.3 (O produto edificação), a variação formal é uma característica associada à forma dos corpos.

As formas produzidas pelos seres vivos são, quase sempre, sem constância formal. Em alguns casos de aparente constância, como no caule de algumas gramíneas, a variação formal ao longo do eixo longitudinal ocorre de maneira mais sutil, mas está sempre presente, pois permite a otimização no consumo de matéria e energia.

Em diversos campos da engenharia, a variação formal foi uma realidade sempre utilizada para a otimização dos projetos, especialmente no que se refere ao desempenho estrutural. Em engenharia mecânica, por exemplo, as estruturas de máquinas sempre buscaram a variação formal, no processo de otimização do design (GIEDION, 1969) (figura 39a). O mesmo ocorreu com as indústrias aeronáutica e eletrônica (figuras 39b e 39c).



(a)(b)

(c)

Figura 39: Variação formal a) na engenharia mecânica (Fonte: ROSICAR, 2012); b) aeronáutica (Fonte: MESQUITA, 2012); c) eletrônica (Fonte: 2MCCTV, 2013).

A variação formal também esteve presente nas edificações que foram construídas em diversas culturas, sem o emprego de materiais industrializados e adotando tecnologias compatíveis com os materiais disponíveis, em cada época e local (figuras 40a, 40b, 40c e 40d). Nesses casos, a otimização no aproveitamento das características dos materiais disponíveis para as funções desempenhadas pelas edificações, produziram soluções que expressaram a cultura de cada local, integrando o edifício às formas de energia disponíveis (expressas em termos de temperatura, luz, ventos e precipitação) e à topografia e mão de obra locais.



(a) (b)

(c)

Figura 40: Edificações com variação formal, com uso de materiais não industrializados: (a) catedral de Milão (Fonte: OLIVEIRA, 2007); (b) Templo Hinduista Matale em Sri Lanka (Fonte: 123RF, 2013); (c) Teto da Mesquita Isfahan Lotfollah (Fonte: MAYWALD, 2008).

Mas, do mesmo modo que a heterogeneidade, a variação formal foi, durante muito tempo, desconsiderada como um conceito passível de aplicabilidade na construção civil. De fato, a grande maioria dos materiais utilizados na construção de edificações apresenta constância formal, em uma ou duas dimensões, como foi visto no item 3.6.3.4 d – constância formal. Essa característica, explicada pelos processos produtivos adotados pelas indústrias de materiais de construção, é expressa nas características geométricas das edificações produzidas com tais materiais (figuras 41 a e b). A escola modernista de arquitetura

impulsionou a demanda por constância formal da indústria de materiais, ao buscar expressar a industrialização em suas soluções, através de uma arquitetura de formas retilíneas e despojadas (LUCCAS, 2008).



(a)



(b)

Figura 41: Exemplos de edifícios utilizando materiais com constância formal. (a) Terry Building (Fonte: MICROSOFT, 2012); (b) Federal Building Hamilton (Fonte: CORDEIRO, 2008).

A única e importante exceção foi a utilização de materiais que não eram produzidos segundo a lógica da industrialização com padrões hegemônicos, quais sejam: a madeira, o concreto, a pedra e a argamassa (figuras 42 a, b, c e d). A argila permitiu, tanto a produção de componentes com constância formal, como os tijolos e blocos, quanto componentes sem constância formal, como louças e telhas, além de propiciar enorme plasticidade nas edificações feitas com adobe. O aço foi tentativamente utilizado com variação formal, mas essa prática caiu em desuso.



Figura 42: Utilizações de materiais que não seguem a constância formal: (a) Metropol Parasol em Sevilha (Fonte: FISHLER, 2011); (b) Aqua Building, Chicago (Fonte: EDELMANN, 2010); (c) Fachada de Pedra (Fonte: TURNBULL, 2006); (d) Norie (Fonte: OLIVEIRA, 2009).

A variação formal na produção de edificações ficou restrita aos processos conectivos, que se realizam a partir da definição dos componentes. Entretanto, os arquitetos tem se mostrado capazes de obter novas formas, mesmo com as limitações impostas pela constância formal dos materiais (figuras 43 a e b). No nível da edificação, a arquitetura icônica se manifesta (SINCLAIR, 2011) buscando formas que consigam se sobrepôr a tais limitações. Entretanto, a variação formal realizada somente a partir dos componentes limita o processo de otimização das soluções, gerando um maior consumo de matéria e energia.



Figura 43: Variação formal na edificação utilizando componentes que apresentam constância formal. (a) City Hall, Londres (Fonte: ILIFF, 2008); (b) South Asian Human Rights Documentation Centre (Fonte: ZONE MEDIA, 2010).

A variação formal não significa que não haja repetição. Ao contrário, a variação formal e a repetição que permite a redundância de funções são perfeitamente compatíveis. Esses dois princípios podem ser combinados em múltiplos níveis hierárquicos de organização da matéria, permitindo a realização de funções de maneira mais eficiente.

6.3.2.3 Anisotropia

No esquema geral dos produtos intermediários da edificação, apresentado no item 2.3 (O produto edificação), a anisotropia é uma característica associada à função dos corpos. Ou seja, ela não é uma característica da estrutura, propriamente dita, mas resulta da sua interação com as diversas formas de energia.

As estruturas biogênicas são quase sempre anisotrópicas, porque as formas de energia com as quais essas estruturas interagem têm direção e sentido preferenciais para seus fluxos. Um osso, por exemplo, tem bem definidos os esforços aos quais será submetido. Neste caso, as rótulas servem, não somente como pontos de articulação, mas, também, como pontos de momento nulo, garantindo que o osso não será submetido a esforços para os

quais sua estrutura não está preparada (figuras 44 a e b). Vale a pena comparar a estrutura interna do osso, que lhe confere um comportamento anisotrópico à compressão, com a simulação, em computador, de uma viga em balanço, otimizada para responder aos esforços causados por uma carga na ponta (figuras 45 a e b). As linhas de tensão são visíveis nos dois casos, porque a otimização da estrutura é obtida através da adição de massa no eixo dessas linhas.

Em muitos casos, a anisotropia não considera a energia de forma isolada, mas associada à matéria ou à informação. Um caso óbvio de anisotropia de energia associada à matéria são as tubulações. A energia cinética do fluido não passa através da parede do tubo, embora essa descrição não seja a usual para uma tubulação. Um caso típico de anisotropia associada à informação são os cabos de telecomunicação, onde a energia elétrica não pode ser dissipada através das paredes do cabo. Para que isso possa ser obtido, o cabo apresenta uma anisotropia radial, em relação à condução de eletricidade.

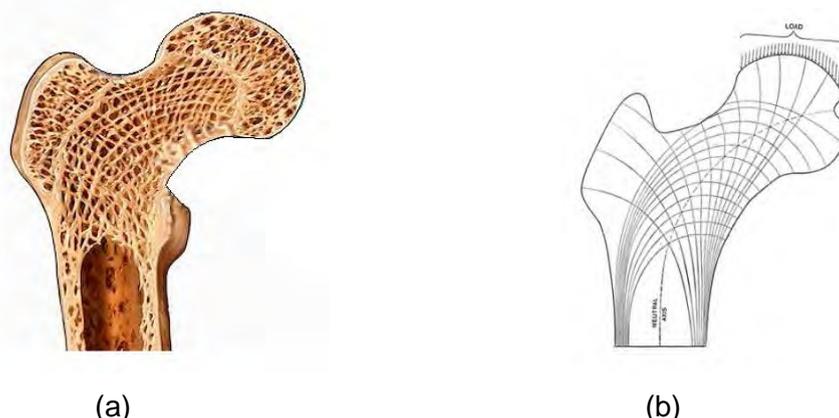


Figura 44: Estrutura anisotrópica biogênica (osso) (a) cabeça do fêmur (Fonte: MASTERFILE, 2012) e (b) as suas linhas de tensão (Fonte: THEODORA, 2012).

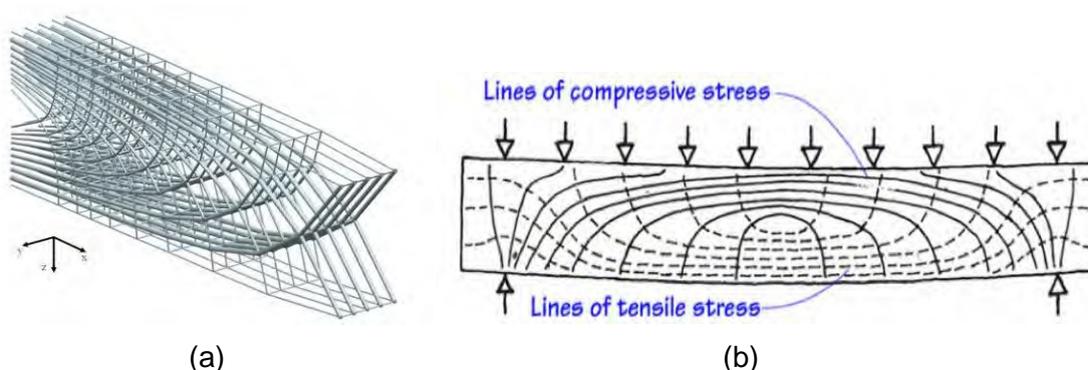


Figura 45: Estrutura anisotrópica antropogênica (viga) (a) Simulação da estrutura segundo as linhas de tensão (Fonte: CHEN, 2010); (b) Linhas de tensão em uma viga (Fonte: KAPLE, 2005).

A anisotropia também é um conceito (assim como a heterogeneidade e a variação formal) que foi considerado, por muito tempo, uma característica negativa dos materiais, especialmente na engenharia civil. Nos materiais fabricados segundo o paradigma atual a anisotropia apresenta o óbvio problema da perda de universalidade do uso, visto que, para aproveitar esta característica, seria preciso conhecer a aplicação, uma condição impossível de ser atendida. Apesar disso, no nível hierárquico dos componentes macroscópicos, a anisotropia é fundamental para a otimização das estruturas. O concreto armado é um caso típico de estrutura anisotrópica, no nível macroscópico. O valor de materiais anisotrópicos, em níveis menores que o macroscópico, passou a ser percebido na engenharia eletrônica, com o desenvolvimento de semicondutores. A anisotropia é uma característica cujo potencial para os princípios de sustentabilidade está associado às tecnologias de produção.

6.3.2.4 Intolerância ao erro

O erro pode estar localizado na constituição ou na forma. A intolerância ao erro significa que, tanto a constituição, quanto a forma, deverão ser geradas a partir de processos que manipulem a matéria, a partir dos níveis mais simples – nível atômico ou molecular – passando por níveis hierárquicos mais altos, de crescente complexidade. Vale dizer que os processos que permitem uma intolerância ao erro são processos *bottom-up*. Evidentemente, defini-los, somente assim, não garante a intolerância, pois essa é uma condição necessária, mas não suficiente. Também podem surgir combinações de processos *bottom-up* e *top-down*, com o mesmo desempenho relativo ao erro. A produção de chips de computador utiliza uma combinação desse tipo. A produção do tarugo de silício é feita por meio de processo *bottom-up*, de deposição e automontagem. O corte dos discos de silício para a impressão dos chips é *top-down*, assim como os sulcos de gravação dos circuitos nodisco. A deposição sequencial dos materiais semicondutores e isolantes é *bottom-up*, novamente. Ter alguns passos *top-down* não interfere no princípio de que a organização da matéria, feita a partir de componentes mais simples, permite um grau de precisão maior do que aquele obtido em processos em que a matéria é organizada de maneira aleatória. No caso do concreto, essa organização aleatória faz com que, embora a definição de forma e constituição das peças de concreto seja determinística, o resultado, tanto de forma, quanto de constituição, sejam estocásticos.

Os processos *bottom up*, além de reduzirem drasticamente o erro, normalmente consomem menos energia e tem menos desperdício de matéria que os processos *top-down*. Entretanto, são processos mais demorados e de execução mais sofisticada. Por isso, em alguns casos, a estratégia de utilizar componentes biogênicos pode se provar interessante nas escalas

menores (da escala atômico-molecular, até a escala milimétrica, ou até maior, dependendo da coincidência de constituição e forma obtida). Um caso clássico é a utilização de fibras animais e vegetais para a fabricação de tecidos. Nesses casos, a fabricação de estruturas, desde o nível molecular, até o nível mesométrico, fica a cargo de um animal (nos casos de seda e lã) ou vegetal (nos demais casos, de fibras orgânicas) e a cargo dos processos industriais, a partir das fibras obtidas. O produto obtido possui diversas qualidades emergentes, não obtíveis em processos *top-down* (não tecido). Tanto é assim que os tecidos produzidos a partir de fibras sintéticas reproduzem esse processo, até um nível de complexidade abaixo do nível do fio. Existem diversas soluções biogênicas, que poderão ser adotadas para a produção de componentes nas escalas menores. Um exemplo é a obtenção de nanofibrilas de celulose cristalina. Essas estruturas, formadas por um feixe de moléculas de celulose alinhadas e ligadas entre si por pontes de hidrogênio, apresentam comportamento mecânico excepcional, com resistência à tração de 7,5 GPa, comparáveis à resistência de nanotubos de carbono (a melhor fibra produzida pela tecnologia humana), com 20 GPa (DODSON, 2012), consumindo uma fração da energia necessária para produzi-los.

Outra estratégia é a utilização de células, para obter nano e micro estruturas biogênicas (BAREITHER; POLLARD, 2010). Células são nano reatores altamente sofisticados, que produzem estruturas por meio de processos aditivos eficientes, com mínimo consumo de energia. Além disso, células capturam do meio ambiente apenas as substâncias de que precisam, na quantidade que precisam. Isso significa que erros eventualmente ocorridos na produção do meio de cultura não interferem no processo produtivo das estruturas moleculares ou nanoscópicas dentro da célula.

6.4 PRODUTOS INTERMEDIÁRIOS DA CONSTRUÇÃO DE EDIFICAÇÕES NO NOVO PARADIGMA

Em um paradigma que não utiliza materiais (definidos por suas características complementares) em uma das etapas do processo produtivo, mas constrói estruturas a partir da escala nanoscópica, os produtos intermediários de seu processo produtivo devem ser compatíveis com essa condição. Assim, os produtos intermediários da produção de edificações, segundo o novo paradigma, são: matérias-primas, componentes nano, micro, meso e macroscópicos, elementos, subsistemas e sistemas construtivos. São descritos, abaixo, os produtos intermediários, que ainda não foram descritos, ou porque não estavam presentes no paradigma atual, ou porque sua descrição nesse paradigma é distinta daquela,

no novo paradigma. São eles: as matérias primas e os componentes nano, micro e mesoscópicos.

6.4.1 Matérias primas

Seguindo a mesma definição do paradigma atual, no novo paradigma os corpos são considerados matéria-prima enquanto estiverem sendo submetidos a processos transformativos. Mas neste paradigma estes processos transformativos são, na sua grande maioria, caracteristicamente desagregadores. Portanto, idealmente, as matérias-primas são beneficiadas, até que a matéria esteja agregada somente no nível atômico ou, no máximo, no nível molecular. Ou seja, até que íons ou moléculas individuais formem o corpo da matéria-prima.

As matérias-primas podem ser obtidas já desagregadas e prontas para os processos conectivos, como o CO_2 dissolvido no ar e o SiO_2 dissolvido na água; ou podem ser extraídas de um corpo natural já com uma estrutura molecular mais complexa, como a resina extraída de uma árvore ou o óleo extraído das sementes de uma oleaginosa; ou podem ser, ainda, estruturas nanométricas biogênicas, como no caso das nanofibrilas de celulose. Em qualquer dos casos, a matéria-prima será processada até que esteja suficientemente pura e dissociada, para poder ser disponibilizada para usos em processos conectivos. Fundamentalmente, o que importa é a identidade entre a funcionalidade da molécula obtida, com o seu uso na construção de edificações. Como foi visto no capítulo 3, se a matéria-prima fosse considerada um material, estes corpos individuais, embora não fossem manipulados individualmente, teriam forma e função. Mas as matérias-primas, ao chegarem no estágio de beneficiamento (desagregação) de íons ou moléculas individuais, perdem completamente as características funcionais dos seus corpos de origem, porque muitas dessas funções somente são obtidas através da agregação da matéria em níveis de maior complexidade. Por exemplo, um corpo vegetal, que poderia ser o tronco de uma árvore, seria desagregado, até que as moléculas individuais de celulose fossem separadas. Estas moléculas de celulose poderiam, então, ser utilizadas para a produção de estruturas mais complexas, como o celofane, por exemplo. Neste caso, as matérias-primas foram sendo transformadas, desde o corpo vegetal, extraído de um corpo natural, até a molécula inicial de celulose. Em outros casos, a matéria-prima deve ser utilizada para produção de outras estruturas mais complexas, em processos que não podem ser caracterizados, simplesmente, como conectivos. Por exemplo, a glicose pode ser utilizada por micro-organismos para a produção de proteínas. Mas a mesma glicose é utilizada no processo para a geração da energia, necessária para o processo de produção das proteínas. Neste caso, a utilização das moléculas de glicose não será somente em processos conectivos,

mas em rotas metabólicas diversas e, em alguns casos, bastante complexas. Entretanto, para simplificação, em todas as situações em que moléculas mais simples participam do processo de produção de moléculas mais complexas, as moléculas simples serão consideradas matérias-primas e as moléculas mais complexas resultantes serão consideradas como componentes nanoscópicos.

6.4.2 Componentes nanoscópicos

São considerados componentes nanoscópicos todos os componentes resultantes de processos conectivos, aplicados sobre matérias-primas iônicas, metálicas ou moleculares, cujas dimensões variem de 0,1 nanômetro até 100 nanômetros. Assim, estes componentes variam em dimensões, desde moléculas relativamente simples, ou cristais, com apenas uma ou algumas células unitárias, até estruturas mais complexas, passando por lamelas de argila, por exemplo, ou micelas e estruturas funcionais. Neste aspecto, o novo paradigma difere do antigo, porque a funcionalidade final não é encontrada apenas em componentes macroscópicos, resultantes da transformação de materiais de construção. No novo paradigma, a funcionalidade ocorre em todos os níveis, porque todos estes níveis, a partir dos componentes nanoscópicos, permanecem com sua constituição e forma definitivos. Consequentemente, sua função também é definitiva. Os diferentes níveis servem, acima de tudo, para definir as qualidades que devem emergir, em cada nível, pela interação entre os componentes do nível anterior. Por exemplo, um compósito nanoscópico pode ser produzido com argila e uma matriz de uma resina plástica e apresentar comportamento que leve a uma qualidade emergente devida à interação entre a matriz e o reforço de argila (MAJI et al., 2009; DJOUANI et al., 2010).

É importante salientar que os compostos nanoscópicos sofrem a influência de forças atômicas e seu comportamento é significativamente diferente dos compostos em outras escalas de constituição. As forças atuantes devem ser fracas o suficiente para garantir a reversibilidade dos processos, de maneira a garantir que as estruturas formadas sejam ordenadas. Forças de automontagem muito intensas produzem estruturas amorfas e não cristalinas (WHITESIDES; BONCHEVA, 2002). Essas forças são utilizadas para a organização das moléculas básicas, em um campo de estudos chamado de química supramolecular, que estuda as interações entre as moléculas: como elas podem reconhecer outras moléculas, realizar automontagens e funcionar na escala supramolecular (ALBRECHT, 2007). A química supramolecular fornece uma abordagem *bottom-up* para sistemas na escala nanométrica, com diversas aplicações. Dentre as estruturas mais estudadas estão os géis, os *foldamers* (estruturas complexas, formadas a partir de diversos

monômeros, que se dobram de maneira precisa) (GUICHARD; HUC, 2011), as micelas (ZENDEJAS, 2011) e as estruturas organizadas a partir de íons.

Também é importante que o meio seja adequado para a realização da automontagem. Esse meio deve permitir a mobilidade das moléculas, através de energia térmica.

Os processos de organização da matéria, em automontagem, são os únicos que podem ser realizados em escala industrial. A manipulação atômica e molecular pode ocorrer em montagem assistida, mas esses processos não são propícios para reprodução em grande escala.

A funcionalidade dos componentes nanoscópicos pode ocorrer de maneira individualizada; ou seja, fazendo uso das características nanoscópicas de sua constituição e forma, ou podem ser agregados a outros componentes, para que sejam obtidas propriedades emergentes, em escalas de maior complexidade. No primeiro caso, pode ser citado, como exemplo, as nanopartículas de dióxido de titânio. No segundo caso, as nano esferas de sílica ativa.

6.4.3 Componentes microscópicos

São considerados componentes microscópicos todos os componentes que apresentarem dimensões que variam de 100 nanômetros a 100 micrômetros. Devido a esta larga faixa dimensional, componentes microscópicos podem acomodar diversos níveis de complexidade. Mas já na ponta inferior, essa escala já não permite a manipulação dos componentes, por meio de automontagem, da mesma maneira que os componentes nanoscópicos permitem, porque as forças atômicas já não são suficientes para mobilizar os componentes de maneira efetiva. Isso significa que outras estratégias de processo devem ser desenvolvidas para esses componentes.

Algumas estratégias utilizadas na indústria de semicondutores são: impressão inkjet, transferência em paralelo, *pick-and-place* robótico e automontagem fluídica (KNUESEL; JACOBS, 2010). Em todas essas estratégias, energia externa necessita ser doada pelo meio, para que os componentes possam ser manipulados. Dentre esses processos, o tipo de energia varia, sendo as mais frequentes a energia cinética fornecida por um fluido, a energia gravitacional, a energia elétrica estática e a energia mecânica por contato direto.

As tecnologias de construção poderão utilizar uma combinação dessas estratégias e energias de montagem, dependendo do tipo de componente a ser manipulado.

Também é importante lembrar que, em alguns casos, é possível utilizar componentes biogênicos, desde que eles atendam as especificações de constituição e forma, necessárias para a realização das funções. Essa possibilidade torna-se mais difícil, à medida que os componentes ganham em complexidade.

6.4.4 Componentes mesoscópicos

Componentes mesoscópicos são a fronteira limite para o uso prático de automontagem, porque o aumento de escala traz várias implicações para os processos, no que se refere à montagem: a) o número de componentes é drasticamente reduzido, e o número de operações para montá-los segue na mesma proporção. Isso significa que as operações de montagem podem ser dirigidas em tempo razoável; b) a energia despendida com o movimento dos componentes é muito maior, porque a principal forma de mobilidade, nas escalas menores (movimentos Brownianos), já não funciona nesta escala; c) as forças que atuam para a automontagem nas escalas micro e, principalmente, nanoscópica (Van der Waals, polaridade e pontes de hidrogênio) não são suficientes para a escala mesométrica, porque sua distância de atuação é nanométrica; d) a engenharia eletrônica já oferece tecnologia de domínio público para manipulação eficiente na escala mesométrica. Existem estudos para a aplicação de automontagem na escala macroscópica (GROB; DORIGO, 2008), mas são de caráter especulativo e ainda no estágio de pesquisa.

Componentes mesoscópicos, caso tenham sido formados a partir de componentes de escalas menores, através de tecnologias aditivas, podem oferecer funcionalidades específicas, que podem ser exploradas na construção, tais como sensores eletrônicos.

6.5 PROCESSOS DO CICLO DE VIDA DE EDIFICAÇÕES, NO NOVO PARADIGMA

6.5.1 Processos produtivos

No novo paradigma, os processos são divididos de maneira similar aos processos levados a efeito pelos seres vivos, que obtêm as matérias-primas para seus processos biológicos por meio de duas rotas: ou desagregam a matéria (quando ingerem e digerem outros seres vivos ou seus restos), ou a capturam no nível molecular (quando absorvem gás carbônico e água, por exemplo) para, a partir deste nível, reorganizá-la. Quando existe a desagregação da matéria, quer ela seja de origem orgânica ou mineral, ocorrem processos transformativos, à semelhança dos processos no paradigma atual. Além da desagregação,

outros processos químicos são realizados para a obtenção de matérias-primas, sem que ocorra, necessariamente, um aumento entrópico na matéria que está sendo transformada.

Este conjunto de processos transformativos, que objetivam a obtenção de matérias-primas, forma uma primeira fase. Em uma segunda fase, os processos são caracteristicamente conectivos. Esta conexão pode ocorrer por meio de produção antropogênica, a partir do nível atômico ou molecular, prosseguindo até o nível macro do edifício, como um todo. Entretanto, os processos conectivos também podem se iniciar em níveis de complexidade maiores, dependendo de diversos fatores, tais como disponibilidade de matérias-primas já em níveis hierárquicos de complexidade mais elevados e com características adequadas aos usos propostos. Para isso, podem ser utilizadas estruturas biogênicas (preferencialmente) ou estruturas naturais inorgânicas. Entretanto, tais estruturas devem apresentar as funcionalidades específicas desejadas. Sempre é tentador obter estruturas já prontas, com elevados níveis de complexidade e cujas funcionalidades não correspondem exatamente ao projetado. A adoção dessas estruturas somente vai ocorrer com o sacrifício de alguns princípios de sustentabilidade expostos anteriormente, tais como eficiência (especificamente, mínimo uso de matéria e energia e customização).

6.5.1.1 Processos transformativos

Os processos transformativos estão concentrados na duas extremidades do ciclo de vida da edificação: na produção de matérias primas e na degradação da edificação. A produção de matérias primas pode ser feita a partir de compostos simples (CO_2 , H_2O), ou mais complexos (polissacarídeos, como celulose; proteínas, como elastina e colágeno; e lipídios, como ácido ricinoleico ou triglicerídeos de óleos secativos ou semisecativos), ou estruturas mais complexas (nano fibrilas cristalinas de celulose, micro fibrilas de celulose, fibras de celulose, fios de seda). Esta visão dos processos transformativos deixa claro que as opções de reutilizar componentes, elementos e subsistemas não são preferenciais neste paradigma. Os motivos para este abandono, em favor do uso de matéria-prima reciclada completamente as moléculas básicas do edifício, ou próximo disto, são diversos, como já foi discutido anteriormente.

A utilização de compostos básicos significa que, no processo cíclico de utilização da matéria, os processos transformativos foram obtidos através dos serviços da natureza.

Quando a intenção é utilizar compostos de maior complexidade ou estruturas em outros níveis hierárquicos, a utilização de processos enzimáticos pode trazer mais eficiência à obtenção de matérias primas a nível molecular, caso seja interessante obter compostos moleculares. Estruturas mais complexas também podem ser obtidas com o auxílio de

enzimas, mas sua função, obviamente, deve ser compatível com a escala do componente, visto que enzimas produzirão essencialmente a mesma molécula, que deverá ser acumulada na estrutura mais complexa.

No novo paradigma, a utilização de processos transformativos, quer seja de escultura ou de moldagem, devem ser evitados, dando-se preferência aos processos conectivos. A grande exceção, neste caso, é a produção de *chips* de processamento, cuja tecnologia de produção foi amadurecida ao longo dos últimos 40 anos.

6.5.1.2 Processos conectivos

No novo paradigma, os processos conectivos passam por muitas escalas dimensionais e níveis de complexidade. Como foi dito anteriormente, com respeito aos componentes, as tecnologias de automontagem se prestam muito bem para as escalas nano e micrométricas, surgindo diversas dificuldades para sua aplicação em escalas maiores, quando, então, as tecnologias de montagem auxiliada são preponderantes. Por isso, a aplicação do princípio de uma estrutura multinível implica na utilização de diferentes tecnologias, à medida que os produtos tornam-se mais complexos e com escalas dimensionais maiores. A utilização de tecnologias aditivas pode ter a colaboração de processos, tais como *layer-by-layer*, tecelagem, trama e montagens tridimensionais. Algumas dessas tecnologias existem para diversas escalas, mas para algumas delas, como aquelas das escalas nano e micro, são ainda incipientes e sua produtividade é muito baixa. Dentre as diversas opções, é necessário estabelecer um critério ou um conjunto de critérios, que possam hierarquizar as diversas tecnologias, pesando as vantagens e desvantagens de cada uma. Atualmente, uma grande variedade de diferentes possibilidades tecnológicas emerge, demonstrando claramente que este é um momento de divergência tecnológica, principalmente para os processos produtivos nas escalas nano e micro. Segundo, a definição de características emergentes, em determinada escala, obriga à transição entre tecnologias de processo. As tecnologias de processo de níveis mais altos devem ser capazes de integrar os produtos de níveis mais baixos, de forma efetiva e eficiente.

6.5.2 Processos degenerativos

6.5.2.1 Utilização

Embora o objetivo precípua da utilização não seja o de degradar a edificação, a interação de suas partes com as diversas formas de energia, quer seja para o atendimento de funções, quer seja pela sua condição de exposição a algumas manifestações energéticas, causam um inevitável aumento entrópico na edificação.

Na utilização da edificação construída segundo o novo paradigma, essa degeneração deverá ser minimizada, sendo prevista a substituição dos componentes ou elementos que, sabidamente, sofrerão mais intensamente com o uso. Por exemplo, nos pisos talvez fosse interessante substituir apenas uma película sobre a placa do piso (seja ela cerâmica ou, preferencialmente, de um material biodegradável).

A durabilidade no uso deve ser ponderada em relação a diversas questões, como já foi discutido no capítulo 4, item 4.4.5.1 – Durabilidade estendida.

6.5.2.2 Degradação

A degradação é a última etapa no ciclo de vida da edificação. Essa degradação pode ser conduzida ativamente até seu final; ou seja, até que a edificação tenha sido reduzida a seus compostos elementares, tais como CO_2 e H_2O , ou pode ser integrada em algum processo degenerativo natural. Nesse caso, a degradação é um serviço da natureza. A degradação pode ser parcial, com a reutilização de componentes da edificação. Esta questão já foi discutida nessa tese, sendo evocadas as dificuldades dessa solução. Por outro lado, a degradação, sem recuperação de valor, parece mais compatível com uma edificação que perdeu seu valor de uso. Por outro lado, mesmo que a degradação seja pensada para ser conduzida por meio de processos tecnológicos, sempre é necessário ponderar a possibilidade de que a edificação, ou partes dela, acabem sendo depositadas ou levadas por desastres naturais, tais como enchentes, deslizamentos e terremotos, para áreas do meio ambiente natural. Assim, a degradação deve causar o mínimo aumento entrópico nesse meio.

Quando esta degradação ocorre em estruturas minerais, o resultado, tanto podem ser estruturas nanoscópicas (como no caso das lamelas de diversos tipos de argilas), microscópicas (como no caso dos siltes), mesoscópicas (como nas areias), ou macroscópicas (como no caso de pedras). Todos os produtos destes processos de desagregação são extensivamente utilizados nas tecnologias de construção atuais e, portanto, podem ser reutilizados. Além disto, são processos caracteristicamente endoscópicos, pois as estruturas minerais, como visto no capítulo 3, não acumulam quantidades significativas de energia em suas ligações atômicas. Esta falta de energia torna estas estruturas desinteressantes para serem metabolizadas pelos seres vivos, para a extração de sua energia, o que aceleraria o processo de desagregação das mesmas. Por isso, caso a degradação ocorra em ambiente natural, o principal processo de desagregação é a ação aleatória de elementos naturais, que contém energia, como a radiação solar, o vento, a chuva e os terremotos. Alguns destes processos contam com a contribuição de seres vivos, principalmente micro-organismos, mas esta contribuição não é significativa o

suficiente para tornar estes processos de desagregação tão velozes quanto os processos de biodegradação.

Quando a degradação de estruturas orgânicas ocorre, normalmente via processos enzimáticos, ela adquire uma velocidade muito maior do que a desagregação de estruturas minerais, porque a maior parte das estruturas orgânicas são formadas por moléculas com ligações exotérmicas. Ou seja, a decomposição destas moléculas traz um grande ganho energético aos organismos que as consomem. A exceção a esta condição são as estruturas com alto percentual de cálcio, como no caso de conchas, ou alto percentual de sílica, como no caso de exoesqueletos de diatomáceas e espículas das esponjas. Tais estruturas contam com material orgânico (polissacarídeos e proteínas) em percentuais baixos, entre 5,0 e 0,1%. Os ossos, com alto teor de cálcio e fósforo (aproximadamente 50% de material inorgânico) são mais interessantes do ponto de vista energético e os micro-organismos tendem a consumir os componentes orgânicos rapidamente.

No novo paradigma, a degradação realizada pela atividade humana deve ser incorporada aos processos transformativos, com a utilização de micro-organismos para a degradação de resíduos de edificações através da compostagem, por exemplo, desde que estes resíduos contêm estruturas biodegradáveis de alta energia, seguindo o princípio enunciado no capítulo 4. Este serviço permite a reciclagem de moléculas básicas (princípio da reciclagem), tais como CO_2 e H_2O , ao mesmo tempo em que aumenta a entropia destas moléculas que compunham antigos organismos, mas mantendo a entropia do meio ambiente constante ou, mesmo, reduzindo-a com o uso da energia obtida das moléculas daqueles organismos (princípio do mínimo aumento entrópico residual). Além da degradação proveniente de serviços da natureza, a atividade humana pode prover a degradação de praticamente todas as estruturas encontradas. Este segundo modo de degradação apresenta vantagens e desvantagens. As vantagens referem-se à recuperação de elementos e substâncias que ainda não encontraram substitutos biodegradáveis, evitando que estes venham a aumentar a entropia do meio ambiente. As desvantagens referem-se à incompletude dos processos de reciclagem conduzidos pelas atividades humanas, quer seja por questões econômicas, quer seja por questões tecnológicas ou logísticas, estas últimas relativas à eventual inacessibilidade das estruturas a serem recicladas, como nos casos de desastres tais como avalanches, terremotos, enchentes e incêndios.

6.6 DESENVOLVIMENTO DE SOLUÇÕES NO NOVO PARADIGMA

O desenvolvimento de soluções, utilizando os princípios de sustentabilidade expostos no capítulo 4, apresentam novos desafios para a indústria da construção e para os profissionais que participam no desenvolvimento destas soluções, quer seja a indústria de matérias primas e componentes, quer seja a indústria de edificações.

Independentemente das tecnologias a serem utilizadas para a produção da edificação e de seus produtos intermediários, o desenvolvimento de soluções, através de tecnologias aditivas, utilizando produtos biodegradáveis, incorporando os múltiplos princípios apresentados, é uma tarefa vasta e complexa, que, evidentemente, deve ser realizada gradualmente. O aspecto fundamental neste processo é manter um tensionamento no sentido de incrementos sucessivos na aplicação dos diversos princípios expostos no capítulo 4, tais como reciclagem, biodegradabilidade, multifuncionalidade e resiliência.

Uma das principais dificuldades é saber como definir quais as características da constituição e da forma dos componentes, nos diversos níveis hierárquicos, para a realização das funções propostas para a edificação. A abordagem proposta aqui será chamada de modelagem energética.

6.6.1 Modelagem energética

A modelagem energética, como estratégia de desenvolvimento de soluções, está baseada no conceito de função, estabelecido no capítulo 2, itens 2.3.1.8 a 2.3.1.11. Ali foi definida a função, como o resultado da interação entre o corpo (a edificação ou um componente da mesma) e as diversas formas de energia. Assim, uma função é atendida, ou realizada, quando o corpo interage de forma adequada com uma forma específica de energia. Por exemplo, um componente que resiste adequadamente à combustão pode ser traduzido como tendo uma constituição e uma forma que absorveram ou refletiram a energia térmica do fogo, sem que suas moléculas fossem oxidadas.

A modelagem energética, proposta por este autor, pode ser realizada através da consecução de alguns passos genéricos, descritos abaixo.

1. Descrição da função a ser atendida pela edificação. Neste ponto, é interessante não identificar a função com algum componente específico da edificação, exceto quando esta identificação é inevitável, como, por exemplo, a função de trafegabilidade, obviamente associada ao piso. A vantagem da não identificação é a flexibilidade que uma definição geral permite;

2. Identificação das formas de energia envolvidas naquela função. As formas de energia, aqui referidas, são as mesmas identificadas no capítulo 2. Em alguns casos, a função da edificação ou de sua parte é simplesmente não ser degradado ou resistir ao máximo à degradação por aquela forma de energia, como é o caso de algum componente exposto à radiação solar. Este é um momento crucial na modelagem energética, porque as formas de energia envolvidas são as de uso, e não as de operação. Por exemplo, se a função é iluminação, a forma de energia envolvida é radiante no espectro visível e não energia elétrica, a ser convertida em energia luminosa. Essa abordagem do problema aumenta enormemente o potencial para o desenvolvimento de novas soluções;
3. Identificação da matéria ou informação que estão associadas àquela forma de energia. Esse item foi destacado aqui, mas a identificação é praticamente simultânea. Por exemplo, a energia mecânica da chuva, quando interage com a fachada da edificação, evidentemente ocorre pelo transporte de matéria;
4. Identificação das operações energéticas, que deverão ocorrer na interação entre a edificação, ou sua parte, e a forma de energia. Por exemplo, no subsistema elétrico, as operações energéticas, em relação à energia elétrica, são: absorção, condução, transformação (caso haja uma bateria), acumulação (na bateria) e emissão. Há, também, um outro tipo de transformação, de energia elétrica em energia térmica, que deve ser minimizado. A energia elétrica dentro do condutor deve ser refletida de suas superfícies, de modo a não haver fuga de energia;
5. Identificação de todas as soluções possíveis para realizar as operações energéticas identificadas. Essa identificação inclui, também, as soluções utilizadas por seres vivos. No caso da transmissão de energia, vários animais realizam algumas das operações energéticas de maneira bastante eficaz, utilizando apenas matéria orgânica (biodegradável). Nesse momento, serão identificadas, também, as formas de energia acessórias, ou seja, aquelas que são necessárias para que a função se realize, mas não são as formas de uso da energia. No exemplo citado no item b, a forma acessória de energia pode ser a energia elétrica; mas também pode ser a energia bioquímica, da bioluminescência ou química, da quimiluminescência;
6. Seleção da solução mais adequada; ou seja, aquela que atende, de maneira mais completa, o maior número de princípios de sustentabilidade descritos;
7. Definição das características de constituição e forma do componente da edificação que deverá cumprir a função, bem como das formas de energia acessórias

envolvidas no processo. Nesse ponto, dependendo da função, da constituição e da forma, serão definidas, também, as escalas do componente e os níveis hierárquicos de sua constituição;

8. Definição da localização do componente, dentro da edificação. Este item deve ser definido somente nesta etapa, porque alguns componentes podem ser nanométricos ou micrométricos e sua posição deverá ser definida em relação a outros componentes e sistemas, de escalas maiores, aos quais poderá ser agregado;
9. Definição dos processos de produção do componente (ou componentes), desde a obtenção de matérias primas, passando por todos os processos conectivos para a sua formação.

6.6.2 O projeto de edificações

No novo paradigma, o projeto de edificações é dividido em projeto do sistema e projeto de cada edificação, de maneira similar aos inúmeros sistemas construtivos já desenvolvidos em todo o mundo. A diferença essencial é o papel exercido pela indústria de edificações e, conseqüentemente, pelo arquiteto e pelo engenheiro. A liderança dessa indústria no processo de desenvolvimento de soluções, apresentada em 6.3.1, implica em uma responsabilidade muito maior na definição das opções tecnológicas adotadas, ao invés de um papel de adoção, ou não, de opções tecnológicas desenvolvidas por outras indústrias. Isto também significa que esta indústria deverá ter departamentos de pesquisa e desenvolvimento, característicos de outros setores industriais, tais como o automobilístico, eletrônico e farmacêutico.

No desenvolvimento do projeto de edificações existem, portanto, dois momentos distintos: em um primeiro momento, de desenvolvimento do sistema, onde o princípio de customização será empregado, para definir as características de constituição e forma dos componentes do sistema, nos diversos níveis hierárquicos; em um segundo momento, de desenvolvimento da edificação, onde o princípio da personalização será empregado, para definir as características de constituição e forma de uma edificação específica.

Do ponto de vista do desenvolvimento tecnológico atual, o segundo momento é mais factível que o primeiro. A indústria da edificação não sabe como trabalhar nos níveis hierárquicos que substituirão funcionalmente os materiais atuais. Menos ainda, como desenvolver soluções multifuncionais, nesses diversos níveis de complexidade. Existem, ainda, outros níveis acima do consumidor individual e da edificação individual, ligados à formação do

tecido urbano, mas esses níveis deverão ser resolvidos através de códigos de compartilhamento e de interface.

7 TRANSIÇÃO PARA UM NOVO PARADIGMA

Uma vez descritas as características importantes de um novo paradigma, compatível com os princípios de sustentabilidade descritos, é importante definir como poderia ocorrer a transição do paradigma atual para este novo paradigma. Evidentemente, tal processo de transição envolve um espectro muito amplo de ações, em diversos setores da sociedade e em diversos níveis em cada setor. Entretanto, tendo esta tese um enfoque eminentemente tecnológico, muitos aspectos, que sabidamente interferem nos processos de evolução tecnológica, tais como valores culturais, ordem econômica, estrutura social e organização política da sociedade, não serão analisados aqui. Sua participação será apenas indicada, para que seja observada a complexidade das estruturas decisórias que determinam, ou ao menos influenciam, quais opções tecnológicas, dentre as muitas disponíveis, serão adotadas em cada circunstância específica.

As etapas de transição sempre serão referenciadas nos princípios de sustentabilidade apresentados no capítulo 4, os quais servirão como justificativa para a proposição de adoção de determinadas ações e decisões. Estas ações e decisões, por sua vez, deverão ser tomadas por diferentes agentes, dependendo de sua natureza. Por exemplo, ações e decisões relativas à legislação deverão ser tomadas pelo Estado, quer seja no ramo legislativo, executivo ou judiciário. Por outro lado, ações e decisões de desenvolvimento ou aprimoramento das diversas tecnologias devem ser tomadas pelos agentes privados de produção, situados ao longo do processo produtivo, descrito nos capítulos 2 (de maneira genérica), 3 (para o paradigma atual) e 4 (para o novo paradigma). Finalmente, sempre é importante lembrar que estes agentes, sejam eles públicos ou privados, devem responder às demandas sociais, formuladas a partir dos valores gerados em um complexo processo de experiências, informações e desinformações emanadas pelos mais diversos atores.

Por outro lado, foram analisadas aqui apenas as duas principais características que diferenciam o paradigma atual do novo paradigma: a estrutura do processo decisório no desenvolvimento de tecnologias e as características dos produtos intermediários da edificação.

7.1 PRINCIPAIS DIFERENÇAS ENTRE OS PARADIGMAS

As características essenciais do paradigma atual estão representadas na figura 46, abaixo.

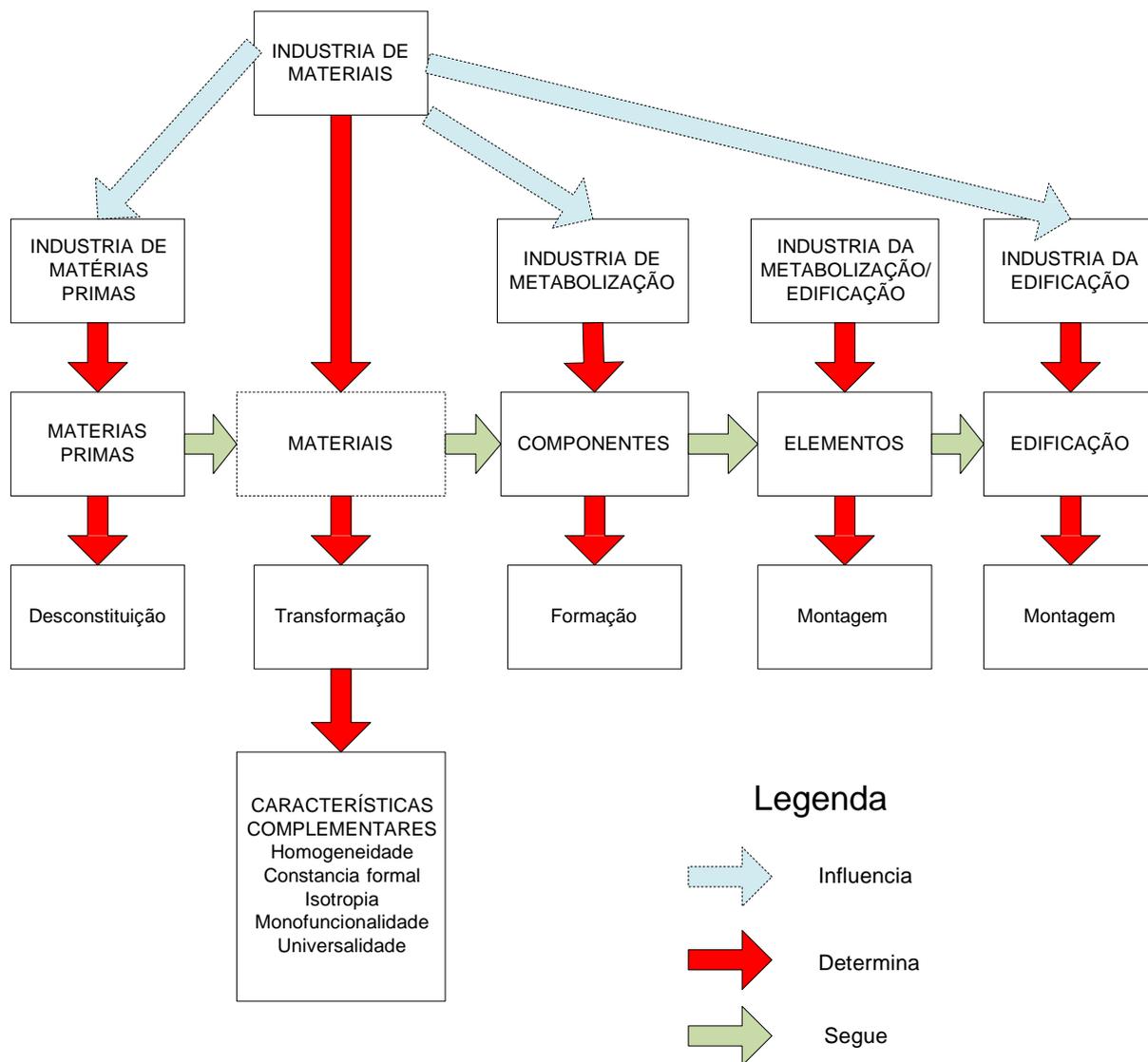


Figura 46: Estrutura básica do paradigma atual.

Nessa figura pode ser observada a hegemonia da indústria de materiais de construção e sua influência sobre as demais indústrias que compõem o macrossetor da construção. Também é possível observar a presença dos materiais, com suas características complementares listadas no quadro. Tais características são consideradas, neste paradigma, como absolutas ou, ao menos, como desejáveis. Sua manifestação nos materiais repercute em todas as etapas de produção, desde as matérias primas, até a edificação.

Na figura 47, estão representadas as características básicas do novo paradigma, compatível com os princípios de sustentabilidade enunciados no capítulo 4.

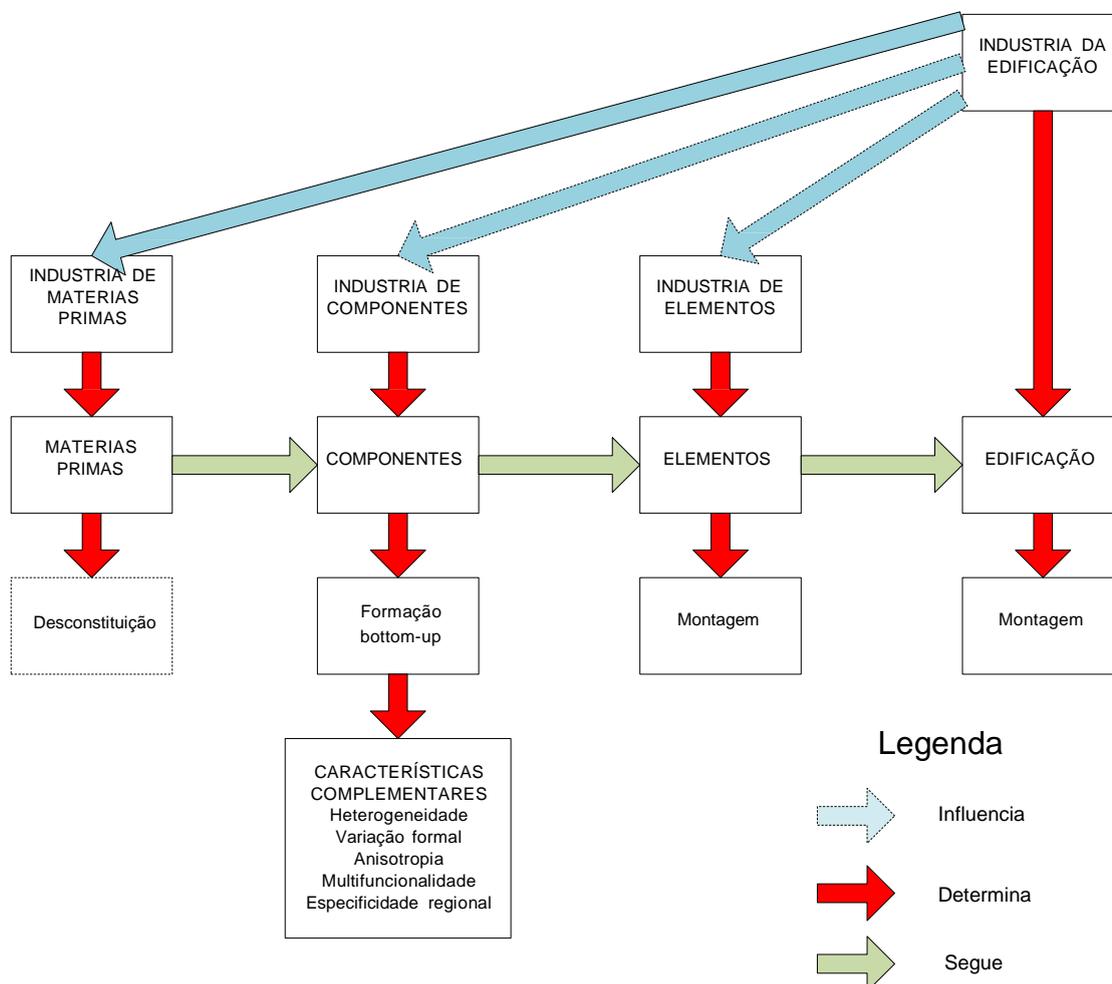


Figura 47: Estrutura básica do novo paradigma.

No novo paradigma, a indústria da edificação passa a ter um papel hegemônico, liderando o processo de definição de novos produtos, bem como da incorporação de novas tecnologias. Neste paradigma, isto é obtido através da utilização de novos processos produtivos, onde as matérias primas processadas são utilizadas diretamente na produção de componentes, sem a etapa de produção de materiais. Ao contrário do paradigma atual, os componentes são produzidos em níveis crescentes de complexidade, desde a escala nanoscópica, passando pelas escalas micro e mesoscópica, com características complementares de heterogeneidade, variação formal, anisotropia, multifuncionalidade e especificidade regional das matérias primas e dos componentes e outros produtos intermediários subsequentes.

7.2 TRANSIÇÃO NA ESTRUTURA DO MACROSSECTOR DA CONSTRUÇÃO DE EDIFICAÇÕES

Para que a indústria de edificações assuma um papel de liderança no processo de produção de edificações e de seus produtos intermediários, são necessárias as seguintes condições:

- a) As indústrias, ao longo das diversas etapas de produção de componentes, de diferentes escalas, devem ter acesso a tecnologias aditivas de produção;
- b) As tecnologias aditivas devem evoluir para a produção, em larga escala e alta produtividade, de maneira a poder competir com as tecnologias de transformação (subtrativas) utilizadas no paradigma atual.

As duas condições acima têm o propósito de permitir que a indústria da edificação possa utilizar, de maneira competitiva, processos produtivos que não dependam da indústria de materiais de construção. No paradigma atual, a vantagem competitiva desta indústria deriva da utilização intensiva e extensiva das características de homogeneidade, constância formal, isotropia, monofuncionalidade e universalidade em seus produtos. Tal vantagem competitiva somente poderá ser reduzida se processos utilizando tecnologias aditivas evoluírem para atender, nas diversas escalas de produção, a demanda da indústria em termos de custo e qualidade.

Atualmente, diversas tecnologias aditivas, em diferentes escalas, estão sendo desenvolvidas. Algumas são voltadas especificamente para a indústria da construção, ainda que de maneira primitiva e sem atender a diversos princípios de sustentabilidade. É o caso, por exemplo, da produção de peças de concreto (escala macroscópica), utilizando um conceito aplicado com sucesso nos equipamentos de impressão 3D.

7.3 TRANSIÇÃO NAS CARACTERÍSTICAS DOS PRODUTOS INTERMEDIÁRIOS DA EDIFICAÇÃO

Para que os produtos intermediários da edificação possam ser produzidos sem o emprego dos materiais, com suas características complementares (heterogeneidade, anisotropia, multifuncionalidade, variação formal, intolerância ao erro e regionalização de insumos e soluções), as seguintes condições devem ser atendidas:

- a) Componentes com crescentes níveis de complexidade poderão ser produzidos com qualidade e custo competitivos em relação aos produtos, especialmente os materiais, do paradigma atual;
- b) Os profissionais responsáveis pelo desenvolvimento dos produtos, nos diversos níveis de complexidade, dominarão tecnologias de projeto que lhes permitam incorporar os princípios de integração, perpetuação e otimização nas características dos produtos intermediários;
- c) Os custos de produção, utilização e descarte, dos produtos intermediários e da edificação, deverão internalizar as externalidades negativas existentes hoje, de maneira a assegurar o MAER (mínimo aumento entrópico residual);

As condições necessárias para que a indústria da edificação passe a desenvolver e utilizar soluções elaboradas a partir dos princípios de sustentabilidade estão relacionadas com três aspectos ligados a áreas completamente distintas.

A primeira condição envolve aspectos tecnológicos, tanto de produto, quanto de processo. Hoje, as tecnologias aditivas, principalmente a impressão 3D, estão sendo desenvolvidas aceleradamente. Também surgem outras tecnologias e desenvolvimentos conceituais, que envolvem automontagem, em diversas escalas de produção (e não somente na escala molecular ou nanométrica), além de outros processos de fabricação em escala nanométrica, como o *spin coating*. Estas tecnologias devem ter seus custos gradualmente reduzidos, ao mesmo tempo em que a qualidade dos produtos poderá ser controlada de maneira mais eficiente.

A segunda condição envolve a atuação de profissionais das áreas de engenharia e arquitetura, cujas tecnologias de projeto, envolvendo dimensionamento e especificação, utilizam extensivamente os conceitos complementares dos materiais. Um engenheiro que dimensiona uma viga de aço, por exemplo, calcula o momento máximo a que ela é submetida e dimensiona toda a viga de acordo com este momento. Para fazer isto, ele se baseia em informações dos fabricantes de perfis de aço, que oferecem materiais com homogeneidade, constância formal e isotropia. Este processo de projetar simplifica enormemente a tarefa do engenheiro, mas o coloca na dependência das decisões da indústria que produz os perfis de aço. Além disto, ocorre um significativo desperdício de material e energia, porque a viga não necessita da mesma quantidade de aço ao longo de sua extensão. Assim como neste caso, em muitos outros, as características complementares dos materiais obrigam a um grande e contínuo desperdício de matéria e energia na produção da edificação. Desenvolver produtos sem estas características

complementares implicará em uma mudança profunda na maneira de desenvolver soluções, porque as decisões relativas às características de constituição (frequentemente heterogênea e em diversos níveis), forma (com variação formal nas três dimensões) e função (com anisotropia e multifuncionalidade) deverão ser tomadas por quem desenvolve o componente ou elemento e não pela indústria de materiais. Se, por um lado, esta abordagem requer um conhecimento muito maior por parte de quem projeta, por outro lado, esta abordagem significa uma redução substancial no consumo de material e energia para produzir componentes e elementos que desempenhem as mesmas funções que agora são desempenhadas por componentes e elementos produzidos a partir de materiais.

As pessoas, talvez em maior intensidade nas sociedades desenvolvidas, desenvolvem uma crescente percepção da questão ambiental. Embora seja um processo cultural complexo, sua direção aponta claramente para a necessidade de mudanças na atividade humana em relação ao meio ambiente. Nesse complexo processo, a percepção de dano ambiental, reversível ou irreversível, torna-se, hoje, cada vez mais generalizada. Esta percepção demanda uma primeira ação, inaugural, no sentido de redução de um dano irreversível. Ela está refletida, no grupo de princípios de perpetuação, no princípio de MAER (mínimo aumento entrópico residual). A implementação deste princípio, por sua vez, implicará na revelação dos verdadeiros custos, para a sociedade, dos processos levados a cabo no paradigma atual para a obtenção dos diversos materiais. Os metais, por exemplo, não poderão mais ser obtidos com a extensiva degradação do meio ambiente, nas áreas de mineração e beneficiamento do minério, como ocorre hoje. A extração de petróleo somente poderá ocorrer se todas as garantias de uma operação segura e sem riscos puderem ser dadas e se forem implementadas as medidas para que sejam realmente efetivas. Tais exigências, definidas em códigos legais e normas, forçarão à internalização das externalidades negativas desses processos. Em função deste aumento substancial dos custos de extração, beneficiamento e transformação de matérias primas metálicas, se tornará muito mais cara, talvez inviável, a utilização de metais em larga escala, da maneira como ocorre no paradigma atual. De fato, como já foi mencionado no capítulo 4, diversos metais tiveram seus usos parcialmente banidos. Este é o caso do mercúrio, do chumbo e do cromo, cujos usos foram drasticamente reduzidos, principalmente em países desenvolvidos, cujas legislações refletem a convicção de que, nesses usos banidos, o custo, principalmente à saúde humana, tornava inviável a continuidade do emprego desses metais. O banimento por dano ao meio ambiente pode não ocorrer na utilização de metais de larga utilização, tais como o ferro, o alumínio e o cobre. Entretanto, sua gradual substituição por soluções menos agressivas ao meio ambiente, economicamente mais viáveis e mais eficientes do ponto de vista de desempenho, é uma possibilidade real. Da mesma maneira, compostos orgânicos

nocivos aos seres vivos, especialmente os VOCs (compostos orgânicos voláteis), utilizados extensivamente em diversos materiais empregados na construção de edificações, que hoje são extensivamente utilizados, deverão ter seu emprego gradualmente reduzido, graças à progressiva exigência de danos, ambientais e à saúde humana, cada vez menores.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As considerações finais irão focar duas questões: a avaliação do trabalho em relação aos objetivos propostos na introdução deste trabalho, para verificar em que extensão tais objetivos foram realizados; e a sugestão de novas pesquisas, com base nos conceitos aqui expressos, de modo a dar prosseguimento a linhas de investigação que retêm potencial para desenvolvimentos futuros.

8.1 ATENDIMENTO DOS OBJETIVOS PROPOSTOS

A tese defendida ao longo deste trabalho pode ser expressa na seguinte afirmativa: o paradigma atual da indústria da construção não é compatível com a plena sustentabilidade ambiental. Tal tese está diretamente relacionada ao objetivo principal do trabalho, enunciado na introdução, qual seja, o de avaliar a capacidade do atual paradigma de incorporar os princípios de sustentabilidade propostos na tese. Para que tal objetivo pudesse ser atingido, foram definidos objetivos secundários, que serviram como elementos intermediários na argumentação lógica da tese. Mais especificamente, os quatro primeiros objetivos secundários foram estabelecidos com o intuito de dar subsídios para que o objetivo principal pudesse ser atingido. A verificação da realização de tais objetivos é, pois, necessária para a verificação da realização do objetivo principal.

O primeiro objetivo secundário, definir com clareza os conceitos básicos da construção de edificações, foi atingido nos capítulos 2 e 3. Para tanto, foi definida uma estratégia de análise de conceitos, onde primeiro foram descritos, no capítulo 2, conceitos básicos da construção. Tais conceitos eram de caráter eminentemente genérico e No capítulo 3 foram descritos os conceitos básicos relacionados diretamente ao paradigma atual. Pode ser observado que os conceitos, como parte da linguagem, são parte ativa na própria percepção da realidade, como foi referido naquele capítulo. Em particular, o conceito de material, que não estava presente nos conceitos enunciados no capítulo 2, surge neste capítulo como central para a compreensão do paradigma. A descrição precisa dos conceitos, levada a cabo de maneira sistemática, pode demonstrar, ainda, que vários conceitos utilizados pela comunidade da construção (referida por Fleck como “coletivo pensante”) não têm seu

significado claramente enunciado, mesmo em normas. Finalmente, é preciso dizer que definir com clareza os conceitos básicos da construção de edificações permitiu ao autor avançar na tese de modo mais consistente do que faria caso adotasse os conceitos sem essa análise.

O segundo objetivo secundário consistiu em formular uma estrutura conceitual geral que possa incorporar os conceitos básicos da construção de edificações, de maneira consistente e integrada. O objetivo foi atingido, no segundo capítulo, com a elaboração de um quadro conceitual de produtos, que relacionou três conceitos básicos: constituição, forma e função, bem como um quadro conceitual de processos, que mostrou a sequência básica de etapas do processo construtivo, desde a obtenção de matérias primas, até o descarte e eventual reciclagem dos resíduos da construção. A função da estrutura geral foi demonstrar que o paradigma atual é um caso específico de um caso mais geral de construção. Evidentemente, este objetivo está intimamente relacionado com o primeiro. De fato, a elaboração de uma estrutura geral somente foi possível através da clara definição dos conceitos envolvidos. Reciprocamente, os conceitos enunciados ganharam seu significado completo apenas quando observados em sua inserção na estrutura descrita. A formulação de uma estrutura geral foi fundamental em dois momentos: primeiro, possibilitando compreender que o paradigma atual não é a única realidade possível, relativizando suas manifestações, tanto em termos de soluções tecnológicas, como em práticas da indústria (produtos e processos), como em soluções desenvolvidas pelos profissionais da área de construção. Ou seja, a estrutura geral permite situar o paradigma atual como um caso particular de uma condição geral da construção. Segundo, facilitando a elaboração, mesmo que em linhas gerais, de outro paradigma, que apresentasse maior compatibilidade com a sustentabilidade ambiental.

O terceiro objetivo secundário tinha por finalidade compreender o paradigma atual da construção, bem como os princípios que o regem. Este objetivo foi realizado no terceiro capítulo, primeiramente através da análise sistemática dos conceitos envolvidos no paradigma atual, tanto em produto, quanto em processo. Nos produtos, os conceitos de matéria prima, material, componente, elemento, subsistema e sistema foram exaustivamente descritos. Ademais, conceitos chamados de complementares, tais como homogeneidade, constância formal, isotropia, monofuncionalidade, dentre outros, foram também analisados para que se pudesse compreender como a coletividade pensante do paradigma atual deles se utiliza para configurar e avaliar as soluções desenvolvidas dentro do paradigma. Nos processos, foi mostrado que a produção de materiais é realizada através

da utilização extensiva de processos transformativos, que ocorrem desde a obtenção de matérias primas até a aplicação de materiais e componentes em obras.

A análise do paradigma atual também incluiu a descrição da estrutura do macrossetor da construção e permitiu observar a função hegemônica que a indústria de materiais exerce no macrossetor da construção de edificações e das funções reservadas à indústria que metaboliza os materiais produzidos e à indústria de edificações propriamente dita.

Como quarto objetivo secundário, foi proposto formular e propor princípios de sustentabilidade que possam ser utilizados no desenvolvimento de soluções tecnológicas na construção de edificações. Este objetivo visava criar uma referência teórica para a elaboração de soluções, na prática da produção de edificações, que fossem sustentáveis desde o ponto de vista ambiental. Ao mesmo tempo, esta referência teórica foi essencial para a consecução do objetivo principal, pois permitiria avaliar se o paradigma atual permitiria, ou não, desenvolver produtos e processos ambientalmente sustentáveis. O objetivo foi realizado no quarto capítulo. Primeiramente, foram compilados e analisados princípios enunciados por outros autores. A partir desses, novos princípios foram enunciados, segundo uma estrutura que os classificou segundo um dos três princípios básicos de sustentabilidade: otimização, perpetuação e integração. Além disso, os princípios foram agrupados de acordo com sua principal aplicação: na interação com o meio, ou no desenvolvimento da solução. Ainda, os princípios, de cada um dos dois grupos, foram classificados como primários ou secundários de acordo com seu grau de generalidade, sendo os princípios mais gerais considerados como primários e os princípios mais específicos – portanto de aplicação direta - como secundários. Os princípios foram individualmente descritos, havendo um esforço no sentido de correlacioná-los, ficando claro que existe uma forte complementariedade entre diversos princípios. Esta formulação de princípios, que buscou ser exaustiva, permitiu que os diversos aspectos da sustentabilidade pudessem ser visitados, dando ao trabalho a possibilidade de analisar o paradigma atual de maneira mais sistemática.

Uma vez completados os quatro objetivos secundários descritos, foi possível a realização do objetivo principal, de avaliar a capacidade de o atual paradigma de incorporar os princípios de sustentabilidade propostos na tese. A realização deste objetivo foi feita tomando-se cada grupo de princípios classificados segundo seu princípio básico (de otimização, perpetuação e integração), e analisando a possibilidade de sua implantação na produção de edificações, segundo o paradigma atual. Em diversos momentos, foram destacados princípios mais específicos, mas não houve uma preocupação em elencar individualmente todos os princípios para uma análise de sua compatibilidade com o paradigma atual, até porque a

intenção do objetivo não era de identificar todas as possíveis incompatibilidades deles, mas demonstrar, utilizando os casos mais evidentes e emblemáticos, a impossibilidade de adoção desses diversos princípios. A análise encontrou dificuldades insuperáveis para a incorporação de diversos princípios de sustentabilidade, tanto nos produtos, quanto nos processos, realizados segundo o paradigma atual. Tais dificuldades, como ficou demonstrado em diversos momentos nesta tese, derivam essencialmente de duas características essenciais do paradigma atual: o papel hegemônico da indústria de materiais, especialmente daqueles setores que sofreram processos de oligopolização; e a posição central que os materiais ocupam, tanto na cadeia de produtos intermediários da edificação, quanto nos processos de projeto dos diversos subsistemas da edificação.

A realização do objetivo principal possibilitou a ratificação da tese central, qual seja, a incompatibilidade entre o paradigma atual e os princípios de sustentabilidade ambiental.

Além dos objetivos mencionados, foram propostos mais três objetivos secundários (quinto, sexto e sétimo objetivos secundários), com a finalidade de permitir avançar na formulação de um novo paradigma. O quinto objetivo secundário consistiu em elaborar as características essenciais de um novo paradigma, que seja compatível com os princípios de sustentabilidade propostos. Este objetivo foi concebido com o intuito de gerar uma alternativa ao paradigma atual, na eventualidade de ficar provada sua incompatibilidade, em maior ou menor grau, com os princípios de sustentabilidade. A realização do objetivo foi descrita no capítulo 6, primeiramente com a descrição das características que deveriam estar presentes no novo paradigma, especificamente: compatibilidade com os três princípios básicos de sustentabilidade (otimização, perpetuação e integração); reestruturação do macrossetor da construção, especialmente da construção de edificações; possibilidade do uso de produtos intermediários que não fossem baseados no conceito de material e em suas características complementares (homogeneidade, constância formal e outras); e, finalmente, desenvolvimento de processos que permitissem o uso extensivo e intensivo de tecnologias *bottom up* na constituição dos produtos intermediários da construção. Após, foram detalhadas estas características, sempre demonstrando como a formulação do paradigma atendia os diversos princípios de sustentabilidade propostos no capítulo 4.

O sexto objetivo secundário foi assim postulado: definir quais as condições necessárias para que ocorra a transição do paradigma atual para o novo paradigma. Para a realização deste objetivo, foram comparados os dois paradigmas e destacadas suas diferenças essenciais. A primeira destas diferenças foi caracterizada como uma mudança na estrutura e na dinâmica do macrossetor da construção, mais especificamente da construção de edificações, onde o papel hegemônico da indústria de materiais na definição das tecnologias utilizadas no

macrosetor é substituído por uma estrutura onde a indústria de edificações passa a liderar o processo de definição tecnológica. A segunda diferença essencial, complementar à primeira, é o abandono do conceito de material, em conjunto com suas características complementares de homogeneidade, constância formal, isotropia, monofuncionalidade e universalidade de uso. O conceito de material é substituído pelo de estrutura heterogênea multinível, onde os conceitos complementares de heterogeneidade, variação formal, anisotropia, multifuncionalidade e especificidade geográfica de uso são adotados.

Finalmente, além do corpo principal da tese, o autor elaborou, para atender o sétimo objetivo, um exercício de aplicação do novo paradigma, onde foi possível propor e avaliar metodologias e tecnologias novas e existentes em outras áreas da engenharia, quanto à sua capacidade de incorporar os princípios de sustentabilidade propostos. Este exercício, apresentado no Apêndice, visava ir além da formulação do novo paradigma, demonstrando que seria possível encontrar e/ou desenvolver novas metodologias e tecnologias que fossem completamente compatíveis com o mesmo.

Para dar mais consistência à proposição e avaliação dessas metodologias e tecnologias, o exercício enfocou o desenvolvimento de soluções para o envelope da edificação. Com relação às metodologias, foi adotada a modelagem energética, que permite a definição das características de desempenho que devem estar presentes na solução, sem a necessidade de definição das suas características físicas. Esta metodologia mostrou-se extremamente útil e revelou-se como uma ferramenta poderosa de análise do problema a ser resolvido do ponto de vista do desempenho. Com relação às tecnologias, a realização do objetivo foi levada a cabo através da proposição de dois cenários. No primeiro, seriam desenvolvidas soluções baseadas em tecnologias já disponíveis no mercado ou que pudessem ser diretamente derivadas de tais tecnologias. No segundo, seriam consideradas possibilidades tecnológicas que não estão no mercado. Neste caso, as propostas foram formuladas com base em pesquisas levadas a cabo em diversos campos, inclusive utilizando informações sobre soluções desenvolvidas por seres vivos, empregando, portanto, o princípio de biomimetismo. É importante ainda salientar que nas proposições de solução, foi manifestado, sempre que ocorria, o atendimento a um ou mais princípios de sustentabilidade, de maneira a demonstrar a preocupação constante do autor em manter as soluções como expressões de tais princípios.

8.2 SUGESTÃO DE NOVAS PESQUISAS

Ao longo do texto foram apresentados diversos conceitos. Dentre eles, três merecem ser destacados, porque trazem um potencial de desenvolvimento através de estudos futuros. São eles: a proposição de que todo o produto intermediário da edificação (e a própria edificação) pode ser descrito como sendo formado por constituição, forma e função; a modelagem energética; e a estruturação dos princípios de sustentabilidade de acordo com três princípios básicos, nominalmente, otimização, perpetuação e integração. Cada um desses tópicos parece merecedor de uma investigação mais profunda em futuros estudos. Cada um desses conceitos será brevemente discutido a seguir.

Descrever um produto intermediário da edificação, seja ele uma matéria prima, um material, um componente ou outro, através de uma estrutura geral, onde ele é formado por constituição, forma e função, permite uniformizar a análise de todos os produtos, ao mesmo tempo em que cria o entendimento de que cada produto deve ter definidos com clareza os três conceitos mencionados. Assim, a constituição, sendo formada por substância e estrutura interna, pode ser compreendida sem dificuldades, ao mesmo tempo em que facilita a percepção da relevância e da interdependência de todos os conceitos envolvidos, quer seja de constituição, forma ou função, de todos os produtos intermediários. De maneira análoga, a forma pode ser definida em função de dois conceitos auxiliares: geometria e escala. Ainda, a definição de função como sendo o resultado da interação entre o produto intermediário (ou o corpo, de maneira genérica) e as diversas formas de energia, tem implicações nos conceitos de desempenho, vida útil e manifestações patológicas. Do ponto de vista do desenvolvimento de soluções, a percepção dos produtos de acordo com esta definição auxilia na organização da pesquisa e na busca de interações entre os diversos aspectos mencionados.

A modelagem energética deriva naturalmente do conceito de função apresentado acima. Este tipo de modelagem talvez devesse ser chamada de ergômica, visto que ela se baseia na descrição de todas as formas de energia que interagem com o corpo e, portanto, induzem aos diversos comportamentos deste corpo. A expressão ergômica seria derivada de outra, ergoma, que, por sua vez, se inspira no paralelo que apresenta com o genoma, que contém todas as informações genéticas de um corpo.

A modelagem energética (ou ergômica) permite que todas as funções de determinado produto intermediário, independentemente de sua complexidade, possam ser associadas a determinadas formas de energia e suas correspondentes operações energéticas, antes da definição das características de constituição e forma deste produto intermediário. Isto

permite que o projetista tenha muito mais liberdade para buscar a melhor solução dentre as diversas alternativas possíveis, sem uma pré-definição das características do produto, que limitaria o leque de opções.

Finalmente, a estruturação dos princípios de sustentabilidade de acordo com os princípios básicos de otimização, perpetuação e integração deve ser analisada e aprofundada, permitindo seu aprimoramento. Eventualmente, outros princípios poderão ser incorporados ou os que já estão presentes possam ser rearranjados. A estruturação permite ver os princípios em um todo consistente e seu estudo mais aprofundado auxiliaria de modo significativo a aplicação dos mesmos no processo de desenvolvimento de produtos.

8.3 ÚLTIMAS OBSERVAÇÕES

A presente pesquisa foi singular em diversos aspectos. Primeiro, para demonstrá-la, não foram utilizados os recursos matemáticos habituais nas ciências da Engenharia, como o cálculo e a geometria. Ao invés disso, o autor esforçou-se por utilizar argumentos lógicos e recursos importados de outras áreas, dentre elas a filosofia e a economia. Segundo, foram analisados muitos aspectos de diferentes esferas de conhecimento e de atividade, com um ponto focal. De fato, as ideias apresentadas nesta tese tentam motivar, tanto a indústria de edificações (e as outras indústrias do macrossetor da construção), quanto a academia e os centros de pesquisa, que desenvolvem e ensinam a ciência da edificação, para um único argumento: é preciso modificar a prática da indústria e o conhecimento da ciência. Se isto não for feito, as consequências já foram anunciadas por muitos. Caso a economia – e mais especificamente o macrossetor da construção – se comporte como um sistema complexo, seu comportamento possivelmente seguirá três fases: na primeira, a robustez do sistema irá absorver o aumento da carga (ou pegada ecológica), tanto em insumos, quanto em resíduos, atuando com feedbacks negativos e por meio de compensações e substituições de insumos. Mas em determinado momento, o sistema chegará a seu limite em algum setor específico. A partir daí, em uma segunda fase, a reação em cadeia, por sobrecarga de outros setores, fará com que o sistema tenha um comportamento errático, ora deformando preços, ora produzindo insumos ou edificações em excesso ou escassez. Finalmente, em uma terceira etapa, o sistema entrará em colapso irreversível de maneira acelerada. Este desfecho, evidentemente, é apenas uma possibilidade.

Esta tese tentou apresentar uma nova visão do que poderão vir a ser as edificações e sua produção. Evidentemente, isto implica, também, novos caminhos para a ciência da construção, onde tecnologias mais sofisticadas e menos agressivas ao meio ambiente e ao

próprio ser humano desempenham um papel central. A utilização dos conceitos enunciados não se limita à indústria da edificação, nem mesmo à indústria da construção em geral. Eles podem ser empregados de modo mais amplo, na ciência e na prática da engenharia, em seus diversos campos. Novas soluções tecnológicas precisam ser desenvolvidas, muitas vezes a partir de abordagens radicalmente inovadoras, alterando a própria estrutura produtiva e decisória da indústria. As propostas apresentadas nesta tese podem parecer, a alguns leitores, excessivamente afastadas da realidade atual da indústria e ciência da construção. Neste caso, outras alternativas, mais próximas às tecnologias construtivas existentes, deverão ser criadas. O fundamental é criar um vetor que tensione na direção desejada, de modo a, gradualmente, transformar a realidade da indústria e da ciência da construção. As tecnologias aqui propostas não são as do passado, nem as do presente. São tecnologias inspiradas nos seres vivos e, na visão do autor, mais sofisticadas e eficientes que as que atualmente estão disponíveis.

Não alterar a prática da indústria e o conhecimento da ciência da construção, vale dizer, substituir o paradigma atual por outro mais compatível com princípios de sustentabilidade, significará, com certeza, a opção por um único desfecho: o esgotamento da capacidade da Terra em prover recursos e absorver resíduos poluidores, levando a um inevitável colapso. Evitar este desfecho depende da mobilização daqueles que participam da produção de ciência da engenharia de edificações, buscando alternativas à situação atual.

REFERÊNCIAS

- ABIKO, A. K. et al. **O futuro da construção civil no Brasil**. São Paulo, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, dez. 2003.
- ABNT. **NBR5706 - Coordenação modular da construção**. Rio de Janeiro, ABNT, 1977.
- ABNT. **NBR8041 - Tijolo maciço cerâmico para alvenaria – forma e dimensões**. Rio de Janeiro, ABNT, 1983.
- _____. **NBR8798 - Execução e controle de obras de alvenaria estrutural de blocos vazados de concreto**. Rio de Janeiro, ABNT, 1985.
- _____. **NBR 9062 - Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado**. Rio de Janeiro, ABNT, 2001.
- _____. **Norma NBR 15575-1 - Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos - Desempenho. Parte 1 – Requisitos Gerais**. Rio de Janeiro, ABNT, 2008.
- _____. **Norma NBR 15873 – Coordenação modular para edificações**. Rio de Janeiro, ABNT, 2010.
- ABRAMAT/FGV. **Perfil da cadeia produtiva da construção e da indústria de materiais e equipamentos – Edição 2010**. São Paulo, FGV Projetos e Abrammat, 2010.
- ALBRECHT M. Supramolecular chemistry – general principles and selected examples. **Naturwissenschaften**. Berlin, v. 94, p. 951-966, 2007.
- ALEXANDER, C. et al. Improving social technologies for recycling. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers Waste and Resource Management**. Londres, v. 162, p. 15-28, 2009.
- ALLEN, P. M. **Cities and Regions as Self-Organizing Systems Models of Complexity**. Londres: Taylor & Francis, 309 p., 2005.
- ALLISON, S. D.; MARTINY, J. D. Resistance, resilience, and redundancy in microbial communities. **PNAS**, Washington, v. 105 supl. 1, p.11512-11519, 2008.
- ALTSHULLER, G. **40 Principles: TRIZ keys to technical innovation**. 1. ed., 148 p., Worcester: Technical Innovation Center, 2001.
- AMORIM, S. R. L. **Tecnologia, organização e produtividade na construção**. 201 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1995.
- ANDO, S. DFT Calculations on Refractive Index Dispersion of Fluoro-compounds in the DUV-UV-Visible Region. **Journal of Photopolymer Science and Technology**. Tokyo, v. 19, n. 3, p. 351-360, 2006.
- ANDRADE, A. C. et al. Estimativa da quantidade de entulho produzido em obras de construção de edifícios, In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL: PRÁTICAS RECOMENDADAS, 4, 2001, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Ibracon, Junho 2001.

ANDRADE, J. J. O. Propriedades físicas e mecânicas dos materiais. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. Ed. Geraldo C. Isaia, São Paulo: Ibracon, v. 1, p. 203, 2007.

ÂNGULO, S. C. et al. Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL: PRÁTICAS RECOMENDADAS, 4, 2001, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Ibracon, Junho 2001.

ARISTÓTELES. **Metaphysics**. 350 a.C. Disponível em: <http://classics.mit.edu/Aristotle/metaphysics.html>>. Acesso em: 19 jun. 2011.

ASHBY, M. F. et al. Selection strategies for materials and processes. **Materials and Design**, New York, n. 25, p. 51-67, 2004.

ASHBY, M.; JOHNSON, K. **Materiais e design**. Rio de Janeiro: Elsevier, 346 p. 2011.

AUROVILLE EARTH INSTITUTE, Ghadames, Libya. Auroville Earth Institute, 2012. Disponível em: http://www.earth-auroville.com/ghadames_libya_en.php>. Acesso em: 02 dez. 2012.

AUSTRALIAN BUREAU OF STATISTICS. Australian home size is growing. Australian Bureau of Statistics 2013. Disponível em: <http://www.abs.gov.au/ausstats/abs@.nsf/products/609E28EB4BA28E14CA256F7200832FF6-OpenDocument>>. Acesso em: 15 mai. 2013.

AUTOMOTIVE BUSINESS. **GM tem primeiro lucro anual desde 2004**. Disponível em: http://www.automotivebusiness.com.br/noticia_det.aspx-id_noticia=9509>. Acesso em: 10 jun. 2012.

AUTUMN, K. et al. Evidence for van der Waals adhesion in gecko setae. **PNAS**, Washington, v. 99, n. 19, p. 12252-12256, 2002.

AYIEKO, C. O. Structural and Optical Characterization of Nitrogen-doped TiO₂ Thin Films Deposited by Spray Pyrolysis on Fluorine Doped Tin Oxide (FTO) Coated Glass Slides. **International Journal of Energy Engineering**, Hong Kong, v. 2, n. 3, p. 67-72, 2012.

AYRES, R.U. Turning point: The end of exponential growth? **Technological Forecasting & Social Change**, Londres, v. 73, p. 1188-1203, 2006.

AZAMBUJA, J. A. Aspectos macro e micro econômicos e tecnológicos da relação homem-equipamento na construção. In: SIMPOSIO LATINO-AMERICANO DE HABITAÇÃO. 1982, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IPT, 1982.

AZAMBUJA, J. A. et al. New foundations for the building industry: nine basic concepts to promote sustainability. In: INTERNATIONAL RILEM CONFERENCE ON PROGRESS OF RECYCLING IN THE BUILT ENVIRONMENT. São Paulo, **Proceedings...**, São Paulo, 2-4 dez. 2009.

AZAMBUJA, J. A. **Metodologia para o desenvolvimento de produtos em construção civil**. Documento para discussão interna - Projeto Compohis, NORIE/CPGEC-UFGRS, 2008.

AZAMBUJA, J. A.; BONIN, L. C. **Contribuição para uma teoria da conectividade na edificação**. Documento para discussão interna, NORIE/CPGEC-UFGRS, 2010.

BACK, N. et al. **Projeto integrado de produtos: planejamento, concepção e modelagem**. Barueri: Manole, 601 p., 2008.

BALDWIN, D. R.; MARSHALL, W. J. Heavy metal poisoning and its laboratory investigation. **Annals of Clinical Biochemistry**. Berlim, v.36, p. 267-300, 1999.

BANCO MUNDIAL. **Aluminum Manufacturing**, 1998. Disponível em: <[http://www.ifc.org/ifcext/enviro.nsf/AttachmentsByTitle/gui_alummfg_WB/\\$FILE/alum_PPAH.pdf](http://www.ifc.org/ifcext/enviro.nsf/AttachmentsByTitle/gui_alummfg_WB/$FILE/alum_PPAH.pdf)>. Acesso em: 19 jun. 2011.

BANCO MUNDIAL. **Population Growth Rate**. Disponível em: <<http://www.worldbank.org/depweb/english/modules/social/pgr/index.html>>. Acesso em: 18 jun. 2011.

BANDARIN, F. **Fotografia de uma esquina do templo budista de Angkor Wat**. UNESCO, 2005. Disponível em: <http://whc.unesco.org/pg.cfm?cid=31&l=en&id_site=668&gallery=1&&maxrows=54>. Acesso em: 17 jan. 2013.

BAREITHER, R.; POLLARD, D. A Review of Advanced Small-Scale Parallel Bioreactor Technology for Accelerated Process Development: Current State and Future Need. **Biotechnological Progress**. Nova Iorque, v. 27, n. 1, p. 2-14, 2011.

BARLOW, J.; OZAKI, R. Building mass customised housing through innovation in the production system: lessons from Japan. **Environment and Planning**. Londres, v. 37, p. 9-20, 2005.

BARRETT, P. S.; SEXTON M. G.; LEE. A. The Relationship Between Performance Based Building and Innovation: An Evolutionary Approach. In: CIB W65 COMBINING FORCES INTERNATIONAL SYMPOSIUM, Helsinki, **Proceedings ...**, Helsinki, 2005.

BARROS, F. V., O melhor da tecnologia. **Folha de São Paulo**, São Paulo, p. F1-F2, 29 mai. 2011.

BENDER, R. **Una vision de la construccion industrializada**. Barcelona: Gustavo Gili, 1976.

BENYUS, J. **The promise of biomimicry**. In: TED Conferences, Disponível em: <http://www.ted.com/talks/janine_benyus_shares_nature_s_designs.html>. Acesso em: 20 out. 2012.

BERTO, R. M. V. S.; NAKANO, D. N.. Metodologia de pesquisa e a Engenharia de Produção. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 18. Niterói, **Anais...**, Niterói: UFF / ABEPRO, 1998.

BLACHÉRE, G. **A reasoned introduction to the work of standardization for the development of the use of componentes and for the "open system"**. Garston: Building Research Establishment, 1973.

BLACHÉRE, G. **Tecnologias de la construccion industrializada**. Barcelona: Gustavo Gili, 168 p., 1977.

BLAISZIK, B. J. et al., Self-healing polymers and composites. **Annual review of materials research**, Palo Alto, v. 40, p. 179-211, 2010.

BLANCHARD, B. **Logistics engineering and management**. 4 ed., Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1992.

BOKOR, N et al. Concentration of diffuse light at the thermodynamic limit with an aplanatic curved diffractive element. **Optics Communications**, Londres, v. 191, p. 141-147, 2001.

BOTTI, S. H. O.; REGO, S. Preceptor, supervisor, tutor e mentor: quais são seus papéis? **Revista brasileira de educação médica**, Rio de Janeiro, v. 32, n. 3, 2008.

BRAUNGART, M. **Cradle to cradle: remaking the way we make things**. 1 ed., Nova York: North Point, 208 p., 2002.

BREWER, G.; MOONEY, J. A Best Practice Police for Recycling and Reuse in Buildings. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Engineering Sustainability**. Londres, v.161, ed. ES3, p. 173-180, 2008.

BRITISH PETROLEUM. **Sustainability Review 2009**. Disponível em: <<<http://www.bp.com/sustainability>>. Acesso em 22 jun. 2010.

BROCHMANN, C.; GIRMSCHIED, G. Global players in the world's construction market. In: PROCEEDINGS OF THE JOINT 2006 CIB W065/W055/W086 INTERNATIONAL SYMPOSIUM, Rome, **Proceedings...**Napoli, p.40-51, 2006.

BRUET, B. J. F. Nanoscale morphology and indentation of individual nacre tablets from the gastropod mollusc *Trochus niloticus*. **Journal of Materials Research**, Palo Alto, v. 20, n. 9, 2005.

BRUNDTLAND, G. H. **Our common future – Report of the World Commission on Environment and Development**. Nova York: Nações Unidas, 1987. Disponível em: <<http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm>>. Acesso em: 16 jun. 2011.

BUEHLER, M.J. Tu(r)ning weakness to strength. **Nano Today**, Londres, v. 5, p. 379-383, 2010.

CALLISTER JR., W. D. et al. **Ciencia e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2000.

CANON. **Sustainability Report 2008**. Disponível em: <<http://www.canon.com/environment/report/pdf/report2008e.pdf>>. Acesso em: 14 jun. 2010.

CAPRA, F. **The Web of Life**. New York: HarperCollins, 288p, 1997.

Carlson, J. M.; Doyle, J. Complexity and robustness. **PNAS**, Washington, v. 99, supl. 1, p. 2538-2545, 2002.

CASAVANT, T. **Dematerialization and Buildings**. Vancouver: Ligth House: Sustainability Building Center,. 2012. Disponível em: <<http://www.metrovancouver.org/region/breakfasts/Presentations/TracyCasavantDematerializationAndBuildings.pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2012.

CBID – CENTER FOR BIOLOGICALLY INSPIRED DESIGN. **Research – Biological Materials**. Disponível em: <<http://www.cbid.gatech.edu/>>. Acesso em: 30 nov. 2012.

C-C. CHEN et al. Visibly Transparent Polymer Solar Cells Produced by Solution Processing. **Acsnano**, Washington, v. 6, n. 8, p. 7185–7190, 2012.

CHAVES, J. **Introduction to nonimaging optics**. Londres: CRC, 560 p., 2008.

CHU, S., St. James Nobel Laureate Symposium, Cambridge: Media release - palestra, 26 a 28 mai. 2009. Disponível em: <<http://www.nobelcause.org/press/Pages/default.aspx>>. Acesso em 29 mar. 2011.

CIB. **Agenda21 on Sustainable Construction (Report Publication 237)**. Rotterdam: CIB, 120 p., 1999.

CLARKE, J. R. **Research Models and Methodologies**. HDR Seminar Series, University of Wollongong, Sidney, 2005. Disponível em: <<http://www.uow.edu.au/content/groups/public/@web/@commerce/documents/doc/uow012042.pdf>>. Acesso em: 08 jan. 2013.

CLEVELAND, C.; RUTH, J.M. Indicators of Dematerialization and the Materials Intensity of Use. **Journal of Industrial Ecology**, v. 2, n 3, p. 15-50, Nova York, 1999.

CLEVELAND, C.J.; RUTH, M. When, where, and by how much do biophysical limits constrain the economic process? A survey of Nicholas Georgescu-Roegen's contribution to ecological economics. **Ecological Economics**, Londres, v. 22, p. 203-223, 1997.

CONGRESUL. **Produtos**. Disponível em: <<http://www.congresul.com/CongresulSite/website/carregarProduto/11>>. Acesso em: 14 jan. 2012.

CONSEIL INTERNATIONAL DU BÂTIMENT (CIB). **Working With the Performance Approach in Building**. Rotterdam: CIB, 1982.

CONSTANZA et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. **Ecological Economics**, Londres, v. 25, p. 3-15, 1998.

CONSTANZA, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. **Nature**, Nova Iorque, v. 387, p. 15, 1997.

COOPER, T. **Beyond recycling: the longer life option**. Londres: New Economics Foundation, 1994.

CORTRIGHT, J. New Growth Theory, Technology and Learning - A Practitioners Guide. **Reviews of Economic Development Literature and Practice**. Portland, v. 4, 40p., 2001.

CREAMER, T. **Building materials firms fined a combined R40m after cartel admissions**. Disponível em: <<http://www.engineeringnews.co.za/article/building-materials-firms-fined-a-combined-r40m-after-cartel-admissions>>. Acesso em: 30 jun. 2012.

CURWELL, S.; COOPER, I. The implications of urban sustainability. **Building Research and Information**. Londres, v. 26, n.1, p.17-28, 1998.

DASHKOVSKIY, S. et al. Nacre properties in the elastic range: Influence of matrix incompressibility. **Computational Materials Science**, Londres, v. 41, p. 96 – 106, 2007.

DELL. **Sustainability Report 2007**. Disponível em: <<http://www.dell.com/downloads/global/corporate/environ/report07.pdf>>. Acesso em: 22 ago. 2011.

DODSON, B. **Wood pulp extract stronger than carbon fiber or Kevlar**. Disponível em: <<http://www.gizmag.com/cellulose-nanocrystals-stronger-carbon-fiber-kevlar/23959/>>. Acesso em: 11 dez. 2012.

DOOLEY, K. The paradigms of quality: evolution and revolution in the history of the discipline. **Advances in the Management of Organizational Quality**, Greenwich, v. 5, p. 1-28, 2000. Disponível em: <<http://www.public.asu.edu/~kdooley/papers/qualityparadigm.pdf>>, Acesso em: 12 jun. 011.

DOU, L. et al. A Selenium-Substituted Low-Bandgap Polymer with Versatile Photovoltaic Applications. **Advanced Materials**, Londres, 2012. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adma.201203827/abstract>>. Acesso em: 18 out. 2012.

DU PLESSIS, C. **An approach to studying urban sustainability from within an ecological worldview**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia) – School of the Built Environment, Universidade de Salford, Salford.

DU PONT. 2008 Sustainability Progress Report. Disponível em: <<http://www2.dupont.com/Sustainability/en_US/assets/downloads/DuPont_2008_Sustainability_Progress_Report.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2011.

DURANT, W.; DURANT, A. **The story of civilization v. 9: The age of Voltaire**. Nova Iorque: Simon and Schuster, 1965. 1091 p. Inclui índice.

_____. **The story of civilization v. 10: Rousseau and Revolution**. New York: Simon & Schuster, 1967. 898 p. Inclui índice.

DURAY, R. et al. Approaches to mass customization: configurations and empirical validation. **Journal of Operations Management**, Londres, v. 8, p. 605-625, 2000.

EDMUND OPTICS. **Compound parabolic concentrator**. Disponível em: <<http://www.edmundoptics.com/learning-and-support/technical/learning-center/application-notes/optics/optics-spotlight-series-compound-parabolic-concentrators/>>. Acesso em: 07 fev. 2012.

EHMANN, K. F. et al., Micro/Meso-scale Mechanical Manufacturing - Opportunities and Challenges. JSME/ASME INTERNATIONAL CONFERENCE ON MATERIALS AND PROCESSING, (*Keynote presentation*), Honolulu. **Proceedings...**, Honolulu, 15-18 de outubro, 2002. p.6-13.

EKINS, P. et al. **Reducing Resource Consumption – A Proposal for Global Resource and Environmental Policy**. Osnabrück: GWS, 2009, 20 p. Disponível em: <<http://www.worldresourcesforum.org/files/file/gws-paper09-5-versionDavos.pdf>>. Acesso em: 15 set. 2012.

EPA. **Treatment Technologies for Mercury in Soil, Waste, and Water**. Washington: Environmental Protection Agency, 2007.

EPSON. **Sustainability Report 2011**. Disponível em: <http://global.epson.com/SR/report/2011/pdf/2011_en_sr.pdf>. Acesso em: 23 nov. 2012.

ERELL, E. et al. **Urban Microclimate: Designing the spaces between buildings**. 1. ed., Londres: Earthscan, 2011, 269 p.

ERNST, R.; KAMRAD, B. Evaluation of supply chain structures through modularization and postponement. **European Journal of Operational Research**, Londres, v. 124, p. 495-510, 2000.

ESA. Ecosystem Services: Benefits Supplied to Human Societies by Natural Ecosystems. **Issues in Ecology**, n. 2, Ythaca, primavera 1997. Disponível em: <<http://www.esa.org/sbi/issue2.htm>>. Acesso em: 20 jun. 2011

EUROPEAN COMMISSION. **Tackling the challenges in commodity markets and on raw materials**. Bruxelas, 2011.

EWING, B. et al. **Calculation Methodology for the National Footprint Accounts, 2010 Edition**. Oakland: Global Footprint Network, 2010.

EWING, B. et al. **Ecological Footprint Atlas 2010**. Oakland: Global Footprint Organization, 2010. Disponível em: <http://www.footprintnetwork.org/en/index.php/GFN/page/ecological_footprint_atlas_2010>. Acesso em 18 jun. 2011.

FABRICIO, Márcio M. Os limites da globalização e da concorrência estrangeira na construção de edifícios brasileira. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GESTÃO E ECONOMIA DA CONSTRUÇÃO, 3. - III SIBRAGEC, São Carlos, **Anais...**, São Carlos, 2003.

FATAS-VILLAFRANCA, F. et al. Modeling the co-evolution of national industries and institutions. **Industrial and Corporate Change**, Oxford, v. 17, ed. 1, 2008. p. 65-108.

FEDERICI, D.; DOWNING, K., Evolution and Development of a Multi-Cellular Organism: Scalability, Resilience and Neutral Complexication. **Artificial Life**, Cambridge, v. 12, n. 3, p. 381-409 Cambridge: Mit Press, 2006.

FERREIRA, A. B. H. **Novo Dicionário da Língua Portuguesa**. 2 ed. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1986.

FIDJESTØL P.; M. DÅSTØL. **The History of Silica Fume in Concrete – from Novelty to Key Ingredient in High Performance Concrete**. Apresentação Power-point, Disponível em: <http://www.ibracon.org.br/eventos/50cbc/plenarias/PER_FIDJESTOL.pdf>. Acesso em: 04 ago. 2012.

FISKEL, J. Designing Resilient, Sustainable Systems. **Environmental Science & Technology**, Washington, v. 37, n. 23, 2003. p. 5330-5339.

FOUCAULT, M. **A verdade e as formas jurídicas**. Rio de Janeiro: Nau Editora, 2009, p. 8.

FRAME, B.; BROWN, J. Developing post-normal technologies for sustainability. **Ecological Economics**, Londres, v. 65, 2008. p. 225-241.

FRAMPTON, K. Towards a Critical Regionalism: Six Points for an Architecture of Resistance. In: **The Anti-Aesthetic. Essays on Postmodern Culture**, ed. Hal Foster, Seattle: Bay Press, 1983.

FRANZ BRÜMMER et al. Light inside sponges. **Journal of Experimental Marine Biology and Ecology**, Londres, v. 367, n. 2, 2008, p. 61–64.

FRIIS, E. A. et al. Negative Poisson's Ratio Polimeric and Metallic Foams. **Journal of Materials Science**, Nova Iorque, v. 23, 1988, p. 4406 -4414.

FRITZ, J. **Fotografia de detalhe do templo budista de Angkor Wat**. WHC, 2012. Disponível em: <http://whc.unesco.org/pg.cfm?cid=31&l=en&id_site=668&gallery=1&&maxrows=54>. Acesso em: 17 jan. 2013.

FROMM, J. **The Emergence of Complexity**, Kassel Univ., Kassel, 2004, 200p.

GAFISA, **Release de resultados 4T2010**. Disponível em: <<http://www.gafisa.com.br/ri/>>. Acesso em: 10 jun. 2012.

GAIA. **Incinerators: Myths vs. Facts about “Waste to Energy”**. Disponível em: <http://www.no-burn.org/downloads/Incinerator_Myths_vs_Facts_Feb2012.pdf>. Acesso em: 17 jan. 2013.

GAO, H. Materials become insensitive to flaws at nanoscale: Lessons from nature. **PNAS**, Washington, v. 100, n. 10, 2003. p. 5597–5600.

GEORG, S. The social shaping of household consumption. **Ecological Economics**, Londres, v. 28, 1999. p. 455–466.

GERHARDT, C. H. **Multifunctionality as a strategy to decrease resource use in building envelopes**. 2009. Tese (Mestrado em Arquitetura), Victoria University of Wellington, Victoria.

GERSHENSON, J. K.; PRASAD, G.; ZHANG, Y. Product modulariy: definitions and benefits. **Journal of Engineering Design**, v. 14, n. 3, 2003. p. 295-313.

GEYER-ALLÉRY et al. Towards Sustainable Household Consumption? Trends and policies in OECD countries. Paris: OECD, 2002, 162 p.

GIEDION, S. **Mechanization takes command: a contribution to anonymous history**. Nova Iorque: W. W. Norton, 1969, 743 p.

GIRMSCHIED, G. Industrialization in Building Construction - Production Technology or Management Concept. In: Kähkönen, K.; Sexton, M. (eds.): Understanding the Construction Business and Companies in the New Millennium: JOINT CIB INTERNATIONAL SYMPOSIUM: COMBINING FORCES - ADVANCING FACILITIES MANAGEMENT AND CONSTRUCTION THROUGH INNOVATION, 11. Helsinki, **Proceedings...** VTT - Technical Research Centre of Finland and RIL - Association of Finnish Civil Engineers, Helsinki, v. 1, 2005. p. 427-441.

GLEICH, A. et al. **Sustainable metals management: securing our future - steps towards a closed loop economy**. Dordrecht: Springer, 2006, 607p.

GLOBAL REPORTING INITIATIVE. **Sustainability Reporting Guidelines**. Global Reporting Initiative, 2011. Disponível em: <<https://www.globalreporting.org/information/sustainability-reporting/Pages/default.aspx>>. Acesso em: 15 mai. 2013.

GLOBAL REPORTING INITIATIVE. **Sustainability Disclosure Database**. Disponível em: <<http://database.globalreporting.org/search>>. Acesso em: 15 mai. 2013.

GM DO BRASIL. **Gm lança programa zero aterro visando a 100% de reciclagem em gravataí (RS)**. Disponível em: <http://www.chevrolet.com.br/universo-chevrolet/noticias/2011/noticias_atuais/20120625.html>. Acesso em: 10 jun. 2012.

GRADVOHL, R. F.; FREITAS, A. A.; HEINECK, L. F. M. Desenvolvimento de um modelo para análise da acumulação de capacidades tecnológicas na indústria da construção civil: subsector de edificações. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 11, n. 1, jan./mar. 2011. p. 41-51.

GRAMSCI, A. **Prison notebooks**. Nova Iorque: International Publishers, 1985.

GREVEN, A. H.; BALDAUF, A. S. F. **Introdução à coordenação modular da construção no Brasil – Uma abordagem atualizada**. Porto Alegre: ANTAC, 2007. (Coleção Habitar, 9).

GRIMM, N. B. et al. Global Change and the Ecology of Cities. **Science**, Washington, v. 319, n. 756, 2008.

GRIMSCHED, G.; KRÖCKER, M. **Innovative sales concept and knowledge-platform for prefabricated building construction**. In CIB World Building Congress, 2007. p. 2515-2526

GROB, R.; DORIGO, M. Self-Assembly at the Macroscopic Scale. **Proceedings of the IEEE**, Washington, v. 96, n. 9, 2008.

GRUZEN SAMTON, **Construction & Demolition Waste Manual**. New York: Department of Design and Construction, City of New York, 2003.

GUICHARD, G.; HUC, I. Synthetic foldamers. **Chemical Communications**, Londres, v. 47, 2011. p. 5933–5941.

GUINE´E, J.B. et al. Evaluation of risks of metal flows and accumulation in economy and environment. **Ecological Economics**, Londres, v. 30, 1999. p. 47–65.

GUNDERSON, L. H. Ecological resilience - in theory and application. **Annual review of ecology and systematics**, Palo Alto, v. 31, 2000. p. 425-439.

GUNDERSON, L. H.; PRITCHARD, L. **Resilience and the Behavior of Large-Scale Systems**. Washington: Island Press, 2002. 312 p.

HABIBOVIC, P. et al. **New Biomimetic Coating Technologies and Incorporation of Bioactive Agents and Proteins**. In: Learning from Nature How to Design New Implantable Biomaterials, Kluwer: Dordrecht, 2004. p. 105-121.

HAGA, H. C. R. **Produção e comercialização de insumos da cadeia produtiva da construção habitacional: diagnóstico para o desenvolvimento de estudos de prospecção tecnológica**. Tese (Doutorado em Engenharia), Escola Politécnica - USP, São Paulo, 2008. 216 p.

HAHN, T. J. Leed-ing Away from Sustainability - Toward a Green Building System Using Nature's Design. **Sustainability**, Basel, v. 1, n. 3, 2008. p. 196-201.

HAMMOND, G; JONES, C. **Inventory of Carbon & Energy (ICE)**. Bath: University of Bath, 2008. Disponível em: <<http://perigordvacance.typepad.com/files/inventoryofcarbonandenergy.pdf>>. Acesso em: 21 dez. 2012.

HANSEN, V. G. **Innovative daylighting systems for deep-plan commercial buildings**. Tese (Doutorado em Arquitetura) School of Architecture, Queensland University of Technology, 2006. 348 p.

HANSSON, C. B.; WACKERNAGEL, M. Rediscovering place and accounting space: how to re-embed the human economy. **Ecological Economics**, Londres, v. 29, 1999. p. 203-213.

HART, D.; GREGOR, S.(eds) **Information System Foundations: Constructing and Criticising**. Canberra: ANU E Press, The Australian National University, 2005. Disponível em: <http://epress.anu.edu.au/info_systems/mobile_devices/ch11s05.html>. Acesso em: 16 jan. 2013.

HASCOET, J.Y.; MULLER, P.; MOGNOL, P. Manufacturing of complex parts with continuous functionally graded materials (FGM). In: SYMPOSIUM OF THE LABORATORY OF FREEDOM FABRICATION, Austin, **Proceedings...** Austin, University of Texas at Austin, 2012.

HAUSLADEN, G. et al., **Climate Skin, Building-skin, Concepts that Can Do More with Less Energy**. Berlin: Birkhäuser, 2008. 191 p.

HAWKEN, P. et al., **Natural Capitalism**. 2 ed., Londres: Earthscan, 2010. 448 p.

HEATH, J.R. Nanoscale Materials. **Accounts of Chemical Research**, Washington, v. 32, n. 5, 1999.

HEINECK, L. F. M. *et al.* **Introdução aos conceitos Lean – Visão geral do assunto**. Coletânea Edificar Lean – Construindo com o Lean Management, v. 1, 2009.

HENKEL. **2009 Sustainability Report: A global team – winning together**. Disponível em: <http://www.henkel.com/com/content_data/172157_2010.02.25_2009_sustainabilityreport_en.pdf>. Acesso em: 23 jun. 2011.

HERMAN, R. et al. Dematerialization. **Technological forecasting and social change**, Londres, v. 38, n. 4, 1990. p. 333-348.

HESS CORPORATION. **2009 Corporate Sustainability Report**. Disponível em: <<http://www.hess.com/reports/sustainability/US/2009/default.pdf>>. Acesso em: 18 mar. 2011.

HOFFMAN, P.S.; ELZEN, B.; GEELS, F.W. Socio-technical scenarios as a new policy tool to explore system innovations: Coevolution of technology and society in the Netherland's electricity domain. **Innovation: management, policy & practice**, v. 6, 2004. p. 344-360.

HOLLAND, T. C. **Silica Fume User's Manual**. Lovettsville: Silica Fume Association, 2005. 193 p. Disponível em: <<http://www.silicafume.org/pdf/silicafume-users-manual.pdf>>. Acesso em: 03 ago. 2012.

HORNBORG, A. Towards an ecological theory of unequal exchange: articulating world system theory and ecological economics. **Ecological Economics**, Londres, v. 25, 1998. p. 127-136.

HUMPHREYS, D. The great metals boom: A retrospective. **Resources Policy**, Londres, v. 35, 2010. p. 1-13.

IBGE. **Tabela 7 - Estrutura do valor bruto da produção das empresas de construção, segundo as divisões, os grupos e as classes de atividades - Brasil – 2009**. Disponível

em:

<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/industria/paic/2009/tabelas_pdf/tabela7.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2011.

____. **Tabela 2 - Economia Nacional - Contas de produção, renda e capital - 2004-2008.**

Disponível

em:

<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/contasnacionais/2008/tabelas_pdf/tab02.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2011.

IEEE – Technical Committee on Robot Learning. **Introduction.** Disponível em: <<http://learning-robots.de/>>. Acesso em: 22 jan. 2013.

IISD. **The sustainable development timeline.** International Institute for Sustainable Development, Winnipeg 2012. Disponível em: <http://www.iisd.org/pdf/2012/sd_timeline_2012.pdf>. 14 fev. 2012.

INDIGO SOCIETY, Foto de Patras, Grécia, 2010. Disponível em: <<http://indigosociety.com/showthread.php?33325-Show-me-your-country-Teach-me-your-language>>. Acesso em: 30 jan. 2013.

INGVALDSEN, T. et al., **Productivity studies in Nordic building - and construction industry.** Project Report 377-2004, Norwegian Building Research Institute, Oslo, 2004.

INTER ENVIRONMENTAL INSTITUTE. **Landmark events in protecting the global environment 1945-present.** Disponível em: <<http://www.interenvironment.org/wd1intro/events.htm>>. Acesso em: 12 jan. 2012.

ISAIA, G. C. A ciência e a engenharia de materiais de construção. In: **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**, v. 1, p. 1-36, Geraldo C. Isaia (Ed.), São Paulo: IBRACON, 2007.

ISATTO, E. L.; FORMOSO, C. T. Design and production interface in lean production: a performance improvement criteria proposition. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL GROUP FOR LEAN CONSTRUCTION, 6. Guarujá, **Proceedings...**, Guarujá, 1998.

ISATTO, E. L.; FORMOSO, C. T. Método para a formulação da política de fornecedores por parte de empresas de construção. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 11. Florianópolis, **Anais...** Florianópolis: ANTAC, 2006.

ISO. **ISO 6241 - Performance Standards in building – Principles for their preparation and factors to be considered.** 1984, 10 p.

IUCN, UNEP, WWF. **Caring for the Earth - A Strategy for Sustainable Living.** Gland, 1991. Disponível em: <<http://coombs.anu.edu.au/~vern/caring/caring.html>>. Acesso em: 16 jun. 2011.

JABBOUR, J. et al. Internationally agreed environmental goals: a critical evaluation of progress. **Environmental Development**, Londres, v. 3, 2012. p. 5–24.

JENCKS, C. **Iconic Buildings.** Nova Iorque: Rizzoli, 2005. 224 p.

JOHN, V. M. ;SATO, N. M. N. Durabilidade de componentes da construção. In: Miguel Aloysio Sattler; Fernando Oscar Ruttikay Pereira. (Org.). In: **Construção e Meio Ambiente**, Porto Alegre: ANTAC, v. 7, 2006. p. 21-57.

JOHN, V. M. et al. **Durabilidade e Sustentabilidade: Desafios para a Construção Civil Brasileira**. Disponível em: <<http://durar.pcc.usp.br/artigos/durabilidade%20e%20sustentabilidade.pdf>>. Acesso em: 22 nov. 2012.

JOHN, V. M. Materiais de construção e o meio ambiente. In: **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**, v. 1, p. 95-118, Geraldo C. Isaia (ed.), São Paulo: Ibracon, 2007. 832 p.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil**. Tese (Livre docência em Engenharia Civil), Escola Politécnica, USP, São Paulo: USP, 2000. 102 p.

JOHN, V. M.; ÂNGULO, S. C. Metodologia para desenvolvimento de reciclagem de resíduos. In: **Utilização de resíduos na construção habitacional**, Coleção Habitare, n. 4, Porto Alegre: Antac, 2006.

JOHNSON & JOHNSON. **2007 Sustainability Report**. Disponível em: <<http://www.jnj.com/wps/wcm/connect/944bde004f5565a09eb7be1bb31559c7/2007-sustainability-report.pdf?MOD=AJPERES>>. Acesso em: 26 mai. 2011.

JOHNSON, S. **Emergence: The Connected Lives of Ants, Brains, Cities, and Software** New York: Touchstone, 2002. 231 p.

JORDAN, T. M.; PARTRIDGE J. C.; ROBERTS, N. W. Non-polarizing broadband multilayer reflectors in fish. **Nature Photonics**, Washington, v. 6, p. 759–763, 2012.

JORDAN, T. M.; ROBERTS, N. W.; PARTRIDGE, J. C. An omnidirectional broadband mirror design inspired by biological multilayer reflectors. In: **Bioinspiration, Biomimetics, and Bioreplication**, Lakhtakia, A.; Martin Palma; R.J. (Ed.), 2012.

JORNAL DO OESTE. **Santa helena chega a quase 100 km de calçamento com pedra irregular**. ed. 09 nov. 2011. Disponível em: <<http://www.jornaldooeste.com.br/cidade/regiao/santa-helena-chega-a-quase-100-km-de-calçamento-com-pedra-irregular-13819/>>. Acesso em: 14 jan. 2012.

KAZI, A. S. et al. **Open building manufacturing – core concepts and industrial requirements**. VTT – Technical Research Centre of Finland, 2007.

KHANNA, N. On the economics of non-renewable resources. In: **Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS) - Economics interactions with other disciplines**, John M. Gowdy (ed.), Oxford: Eolss Publishers, Desenvolvido sob os auspícios da UNESCO, 2003. Disponível em: <www.eolss.net> Acesso em 10 jun. 2011.

KIBERT, C. J. The next generation of sustainable construction – Editorial. **Building Research & Information**, Nova Iorque, v. 35, n. 6, p. 595-601, 2007.

KIGAWA, T.; FURUYAMA, M. Kyoto: A morphological cycle between a city of rituals and a city of games. INTERNATIONAL SPACE SYNTAX SYMPOSIUM, 5. Delft, **Proceedings...**, Delft, 2005. p. 697 -713.

KLAASSEN, R. et al. **Preserving cultural heritage by preventing bacterial decay of wood in foundation poles and archaeological sites - EVK4-CT-2001-00043**. European Commission, 2005.

- KLEIDON, A.; LORENZ, R. **Non-equilibrium thermodynamics and the production of entropy: life, earth, and beyond**. 1. ed., New York: Springer, 2004. 260p.
- KNOPPERS, G. E. et al. The reality of functionally graded material products. In SYMPOSIUM OF THE LABORATORY OF FREEDOM FABRICATION, Austin, **Proceedings...**, Austin: University of Texas at Austin, 2004.
- KNUESEL, R. J.; JACOBS, H. O. Self-assembly of microscopic chiplets at a liquid–liquid–solid interface forming a flexible segmented monocrystalline solar cell. **Proceedings of the National Academy of Science**, Washington, v. 107, n. 3, p. 993–998, 2010.
- KOEBEL, C. T. et al., **The diffusion of innovation in the residential building industry**, Blacksburg: Center for Housing Research, Virginia Polytechnic Institute and State University, jan. 2004.
- KONCZ, T. **Construccion industrializada**. Madrid: H. Blume, 1977. 134 p.
- KUHN, T. **The structure of scientific revolutions**, 2. ed., Chicago: The University of Chicago Press, 1970.
- LALAND, K. N.; BOOGERT, N. J. Niche construction, co-evolution and biodiversity. **Ecological Economics**, Londres, 2008.
- LARSEN, T. A.; GUJER, W. The Concept of Sustainable Urban Water Management. **Water Science and Technology**, Londres, v. 35, 1997. p. 3-10.
- LE CORBUSIER. **Towards a new architecture**. Createspace, Scotts Valley, 2011. 292 p.
- LEJA, K.; LEWANDOWICZ, G. Polymer biodegradation and biodegradable polymers – a review. **Polish Journal of Environmental Studies**, Olsztyn, v. 19, n. 2, p. 255-266, 2010.
- LENOVO. **Sustainability Report 2009/10**. Disponível em: <http://www.lenovo.com/social_responsibility/us/en/sustainability_reports.html>. Acesso em: 09 nov. 2011.
- LI, C. et al. Synthesis and characterization of organo-soluble thioether-bridged polyphenylquinoxalines with ultra-high refractive indices and low birefringences. **Polymer**, Londres, v. 51, n. 17, p. 3851-3858, 2010.
- LIDDLE, B. T. Construction for sustainability and the sustainability of the construction industry. In: CIB TG16 SUSTAINABLE CONSTRUCTION. Tampa, **Proceedings...**, Tampa, 6-9 nov. 1994, p.47-56.
- LIN, A.; MEYERS, M. A. Growth and structure in abalone shell. **Materials Science and Engineering A**. New York, v. 390, 2005, p. 27-41.
- LIOU, K. N. An introduction to atmospheric radiation. **Science**, Nova Iorque, p. 52, v. 84, 2002.
- LOTKA, A. J. **Elements of Physical Biology**. Baltimore: Williams & Wilkins, 1925. 495 p.
- LONDON, K., **Construction Supply Chain Procurement Modelling**. Tese (Doutorado em Arquitetura), Faculty of Architecture, Building and Planning, University of Melbourne, Melbourne, 2004.

LUCCAS, L. H. H. Arquitetura contemporânea no Brasil: da crise dos anos setenta ao presente promissor. **Arquitextos**, v. 9, Outubro, 2008. Disponível em: <<http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/09.101/99>>. Acesso em: 07 dez. 2012.

LUDWIK, F. **Genesis and development of a scientific fact**. Chicago: The University of Chicago Press, 1979.

LUKASKO, J. J.; MURPHY, J. E. **Electrolytic Production of Calcium Metal**. Washington: Bureau of Mines, United States Department of the Interior, 1990.

MALTHUS, T. **An Essay on the Principle of Population**. London: J. Johnson, 1798. Disponível em: <<http://www.faculty.rsu.edu/users/f/felwell/www/Theorists/Malthus/essay2.htm>>. Acesso em: 16 jun. 2011.

MARX, K., **Capital**, v. 1, Nova Iorque: Random House, 1977.

MC DONOUGH, W.; BRAUNGART, M. **Cradle to cradle – remaking the way we make things**. Nova Iorque: North Point, 2002. 208 p.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P., **Unit Operations of Chemical Engineering**, 7. ed., Nova York: McGraw-Hill, 2005.

MCDOWELL, D. L.; OLSON, G. B. Concurrent design of hierarchical materials and structures. **Scientific modeling and simulations - lecture notes in computational science and engineering**, v. 68, p. 207-240, 2009.

MCLENNAN, J. F. **The philosophy of sustainable design**. Bainbridge Is.: Ecotone, 2004. 324 p.

MEADOWS, D. H. et al. **The Limits to Growth**. Washington: Potomac, 1972.

MEADOWS, D. et al. **Limits to Growth: The 30-Year Update**. White River Junction: Chelsea Green, 3. ed., 2004. 368 p.

MEDINECKIEN, M. et al. Sustainable construction taking into account the building impact on the environment. **Journal of Environmental Engineering and Landscape Management**, v.18, n. 2, p. 118–127, 2010.

MEMON, M. A. **Industrial Relocation for Urban Environmental Management: Special Focus on Ho Chi Minh City (HCMC), Vietnam – Overview and Analysis**. Disponível em: <<http://kitakyushu.iges.or.jp/docs/mtgs/seminars/theme/ir/5.Analysis.pdf>>. Acesso em: 14 set. 2012.

MENON, B. D.; IYENGAR, S. P. **CCI finds cement firms guilty of forming cartel**. 19 JUN. 2012. No site: <<http://www.thehindubusinessline.com/industry-and-economy/article3547504.ece>>. Último acesso em 30 jun. 2012.

MICROCHIP. **Sustainability Report 2010**. Disponível em: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/EnvironmentalInformation/2010_MicrochipSustainabilityReport.pdf>.

MIHELICIC, J. R.; ZIMMERMAN, J. B. **Environmental engineering**. Hoboken: John Wiley & Sons, 695 p., 2010.

MILANI, B. **Building materials in a Green economy: Community-based strategies for dematerialization**. PhD thesis, OISE-UT AECDPC / U. of T. Institute for Environmental Studies, University of Toronto, 2005.

MIRANDA, M. et al., **Mining and critical ecosystems: Mapping the Risks. Appendix 2** Washington: World Resources Institute, 2003. 16 p.

MMTA. **Minor metals in the periodic table: Ca – Calcium**. Disponível em: <www.mmta.com.uk/metals/Ca/>. Acesso em: 23 dez. 2012.

MOLINEIRAS, A. **Foto de Osaka, Japão**. Disponível em: <[http://alfredomoreirinhas.blogspot.com.br/2012 set. japao-osaka.html](http://alfredomoreirinhas.blogspot.com.br/2012/set/japao-osaka.html)>. Acesso em: 30 jan. 2013.

MOEHLECKE, J. **Uma contribuição para o desenvolvimento de assentamentos humanos mais sustentáveis: identificação de padrões urbanos relacionados aos princípios de sustentabilidade**. Dissertação (Mestrado em Engenharia), NORIE/PPGEC/UFRGS, 2010.

MOREIRA, E., **O mistério de telhado**. Disponível em <[http://helpcompras.blogspot.com.br/2010 mai. o-misterio-do-telhado-i.html](http://helpcompras.blogspot.com.br/2010/mai/o-misterio-do-telhado-i.html)>. Acesso em: 07 jun. 2012.

MOSER, A. Ecotechnology in industrial practice: implementation using sustainability indices and case studies. **Ecological Engineering**, Elsevier, Londres, v. 7, p. 117-138, 1996.

MOSLEY, S. **The Chimney of the World: A History of Smoke Pollution in Victorian and Edwardian Manchester**. Cambridge: White Horse Press, 2001. 271 p.

MÜLLER, W. et al. Novel photoreception system in sponges?: Unique transmission properties of the stalk spicules from the hexactinellid *hyalonemasieboldi*. **Biosensors and Bioelectronics**, Elsevier, Londres v. 21, n. 7, p. 1149-1155, 2006.

NAKAMURA et al. Quality and dilution losses in the recycling of ferrous materials from end-of-life passenger cars: input-output analysis under explicit consideration of scrap quality. **Environmental science and technology**, American Chemical Society, Washington, v. 46, p. 9266-9273, 2012.

NISSEN, H. **Construccion industrializada y diseño modular**. Madrid: H. Blume, 1976. 480 p.

NOGUCHI, T. et al. Completely recyclable concrete of aggregate-recovery type by using microwave heating technology. In: INTERNATIONAL RILEM CONFERENCE ON PROGRESS OF RECYCLING IN THE BUILT ENVIRONMENT, 2, São Paulo, **Proceedings...**, São Paulo: RILEM, p. 333-344, 2009.

NOLAN, D. **Predatory pricing in an oligopolistic framework**. 1999. Disponível em: <<http://www.rhul.ac.uk/economics/documents/pdf/discussionpapers/1998/dpe9804.pdf>>. Acesso em 22 set. 2012.

NOSONOVSKY, M.; BHUSHAN, B., Multiscale friction mechanisms and hierarchical surfaces in nano- and bio-tribology. **Materials Science and Engineering**, Elsevier, Londres, v. 58 p. 162-193, 2007.

NOVAES, M. V.; MOURÃO, C. A. M. **Manual de gestão ambiental de resíduos sólidos na construção civil**. Fortaleza: COOPERCON/CE, 2008.

- NOVAK, M. A. et al. Evolution of genetic redundancy. **Nature**, Nova Iorque, v. 388, 10 jun. 1997.
- ODLING-SMEE, F. G. et al. Niche construction and gene-culture co-evolution: an evolutionary basis for the Human Sciences. **Perspectives in Ethology: v. 13 - Evolution, Culture and Behavior**, 4. ed., Elsevier, Nova Iorque, p. 89-109, 2000.
- OKUBO, T.; TOMIURA, E. **Industrial Relocation Policy and Heterogeneous Plants Sorted by Productivity: Evidence from Japan**. RIETI Discussion Paper Series 10-E-016, 2010. Disponível em: <<http://www.rieti.go.jp/jp/publications/dp/10e016.pdf>>. Acesso em: 14 set. 2012.
- OLMSTED, J. **Japan's Recycling: More Efficient than U.S.A.** Disponível em: <www.uwstout.edu/rs/2007/Recycling.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2011.
- ONU. **World Urbanization Prospects - The 2005 Revision**. Nova Iorque: Nações Unidas, 2006.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **A declaração universal dos direitos humanos**. Dez. 1948. Disponível em: <<http://www.un.org/en/documents/udhr/index.shtml#atop>>. Acesso em: 17 jun. 2011.
- OUDOIRE, J.-M. **Cathédrales de France**. Genebra: Minerva, 1998. 176 p.
- PACKARD, V. **The Waste Makers**. Techlink: Ig Publishing, 1960. 216 p.
- PANORAMIO, 2012. Foto de mina de ferro em Tilden. Disponível em <<http://www.panoramio.com/photo/46621>>. Acesso em: 11 ago. 2012.
- PARKER, D.C. et al. Multi-Agent Systems for the Simulation of Land-Use and Land-Cover Change: A Review. **Annals of the Association of American Geographers**, Washington, v. 93, ed.2, 2003. p. 314-337.
- PAUL, B. D. A History of the Concept of Sustainable Development: Literature Review. **The Annals of the University of Oradea: Economic Sciences**, tomo 17, v. 2, 2008. Disponível em: <<http://steconomice.uoradea.ro/anale/volume/2008/v2-economy-and-business-administration/101.pdf>>. Acesso em 25 set. 2012.
- PEPER, P. J. et al. **City of New York: New York municipal forest resource analysis**. Nova Iorque, 2007. Disponível em: <http://www.milliontreesnyc.org/downloads/pdf/nyc_mfra.pdf>. Acesso em: 29 nov. 2012.
- PETERSON, G. et al. Ecological Resilience, Biodiversity, and Scale. **Ecosystems**, Springer, Londres, v. 1, p. 6-18, 1998.
- PETROBRAS S.A. **Relatório de Sustentabilidade 2009**. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/rs2009/pt/relatorio-de-sustentabilidade/>>. Acesso em: 11 fev. 2012.
- PETRUCCI, E. G. R. **Materiais de construção**. Rio de Janeiro: Globo, 1987. 435 p.
- PHILLIPS, C. **Socrates café: A fresh taste of philosophy**. Nova York: W. W. Norton, 2001.
- PIGOU, A. C. **The Economics of Welfare**. Londres: Macmillan, 1932.

PILE, J. F. **Design – Purpose, Form and Meaning**. Boston: The University of Massachusetts Press, 1979. 203 p.

PILKINGTON. **Global Glass Handbook 2012 - Architectural Products**. Pilkington, 2012. Disponível em: <<http://www.pilkington.com/south-america/brazil/portuguese/default.htm>>. Acesso em: 13 jan. 2012.

PILKINGTON. **Handling, Inspecting and Fabricating Pilkington Activ™ Self-Cleaning Glass**. Pilkington, 2012. Disponível em: <http://www.pilkington.com/resources/ats168handleinspfabactiv2001_8_15.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2012.

PILLER, F., **Glossary: Mass Customization, Open Innovation, Personalization and Customer Integration**. Disponível em: <<http://www.iimcp.org/glossary.htm#pers>>. Acesso em: 14 nov. 2012.

PODSIADLO, P. et al. Ultrastrong and stiff layered polymer nanocomposites. **Science**, Washington v. 318, out. 2007. p. 80-83.

PRINCEN, T. Consumption and environment: some conceptual issues. **Ecological Economics**, Londres, v. 31, 1999. p. 347-363.

PRODUCT-LIFE INSTITUTE. **Cradle to cradle**. Disponível em: <<http://www.product-life.org/en/cradle-to-cradle>>. Acesso em: 16 jun. 2011.

R. A. ROHDE. **Solar spectrum** (figura) <http://www.globalwarmingart.com/wiki/File:Solar_Spectrum_png>. Acesso em: 15 jan. 2013.

RAMSDEN, J. **Essentials of nanotechnology**. Frederiksberg: Ventus, 2009. Disponível em: <<http://bookboon.com/int/student/nano/nano-technology>>. Acesso em 17 jun. 2011.

RAPOPORT, A. **Culture, Architecture and Design**. Chicago: Locke, 2005.

RECELLULAR. **Sustainability Report 2009**. Disponível em: <http://reccellular.com/images/ReCel_Sustainability.pdf>. Acesso em 22 jun. 2011.

RECHBERGER, H.; GRAEDEL, T.E. The contemporary European copper cycle: statistical entropy analysis. **Ecological Economics**, Londres, v. 42, 2002. p. 59-72.

REED, B. Shifting from 'sustainability' to regeneration. **Building Research & Information**, Londres, v. 35, n. 6, p. 674-680, 2007.

RESENDIZ-VAZQUEZ, A. **L'industrialisation du bâtiment - Le cas de la préfabrication dans la construction scolaire en France (1951-1973)**. Tese (Doutorado em História) Conservatoire National des Arts et Métiers, Centre d'Histoire des Techniques et de l'Environnement, Paris, 2010.

RIDIN, Y. et al. Shaping cities for health: complexity and the planning of urban environments in the 21st century. **The Lancet**, Londres, v. 379, p. 2079-2108, 2012.

ROBINS, N. Making sustainability bite: Transforming global consumption patterns. **The Journal of Sustainable Product Design**, Londres, 1999. Disponível em: <<http://www.cfsd.org.uk/journal/archive/index.html>>. Acesso em: 20 jan. 2013.

- ROCHA, C. G. **A conceptual framework for defining customization strategies in the house-building sector**. Tese (Doutorado em Engenharia), NORIE/CPGEC, UFRGS, 2011.
- ROCHA, C. G. **Proposição de diretrizes para ampliação do reuso de componentes de edificações**. Dissertação (Mestrado em Engenharia), NORIE/PPGEC, UFRGS, 2008.
- ROCHE. **2003 Sustainability Report**. Disponível em: <www.roche.com/sb03e.pdf>. Acesso em 09 ago. 2011.
- Rohde, R. A. **Espectro da radiação solar**. Disponível em <http://www.globalwarmingart.com/wiki/File:Solar_Spectrum.png>. Acesso em 28 dez. 2012.
- ROSEN, H. J. **Construction materials evaluation and selection: systematic approach**. New York : John Wiley & Sons, 1979. 163p.
- ROTH, R. **Consolidation in the Distribution of Residential Building Products**. Boston: Joint Center for Housing Studies, Harvard University, 2003.
- ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING. **Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties**, Londres: Royal Society & Royal Academy of Engineering, 2004.
- ROYAL DUTCH SHELL PLC. **The Shell Sustainability Report 2006 – Meeting the Energy Challenge**. Disponível em: <http://www.shell.com/static/envirosoc-en/downloads/sustainability_reports/shell_sustain_report_2006.pdf>. Acesso em: 29 mai. 2011.
- RUSSO, M. A. et al. **Green Building: Retrofit and Renovation**. Bedford: McGrall-Hill Construction, 2009. 68 p. Disponível em: <http://mts.sustainableproducts.com/Capital_Markets_Partnership/BusinessCase/MHC%20Green%20Building%20Retrofit%20%26%20Renovation%20SMR%20%282009%29.pdf>. Acesso em: 15 set. 2012.
- RUTH, M. A quest for the economics of sustainability and the sustainability of economics. **Ecological Economics**, Londres, v. 56, p. 332-342, 2006.
- RYDIN, Y. Shaping cities for health: complexity and the planning of urban environments in the 21st century. **Lancet**, Londres: Elsevier, v. 379, p. 2079-2108, 2012.
- SALIM NETO, J. J.; SOUZA, U. E. S. **Diretrizes de projeto para melhorar a produtividade na montagem de componentes pré-cortados e pré-dobrados de aço para estruturas de concreto armado de edifícios - BT/PC/539**. São Paulo: EPUSP – Dep. Engenharia Civil, 2009.
- SANDERS, L. Slime mold grows network just like tokyo rail system. **Wired science**, San Francisco, 22 jan. 2010. <Disponível em: <<http://www.wired.com/wiredscience/>>. Acesso em: 23 fev. 2011.>
- SAN-JOSÉ, J. T. et al. Approach to the quantification of the sustainable value in industrial buildings. **Building and Environment**, Elsevier, v. 42, n. 11, p. 3916-3923, 2007.
- SANTOS JUNIOR, A. **Um estudo sobre estimativas de erro de modelagem em estruturas de materiais heterogêneos**. Maceió: Universidade Federal de Alagoas, 2008.

SANTOS, R. C., Cobertura contínua e eficiente, **Conceitos Concretos**, nº 5, ano 1, p.12-13, 2008. Disponível em: <<http://www.usti.com.br/munte/admin/imagens/upload/Conceitos5.pdf>>. Acesso em: 02 fev. 2011.

SATTERTHWAITE, D. **The transition to a predominantly urban world and its underpinnings**, HUMAN SETTLEMENTS, DISCUSSION PAPER SERIES - URBAN CHANGE, Londres: IIED, 2007.

SATTLER, M. A. **Habitacões de baixo custo mais sustentáveis: a casa Alvorada e o Centro Experimental de tecnologias habitacionais sustentáveis**. Coleção Habitare, v. 8, Porto Alegre: ANTAC, 2007.

SATTLER, M. A.; PEREIRA, F. O. R. Introdução. In: **Construção e meio ambiente**, Coletânea Habitare, v. 7, Porto Alegre: Antac, 2006.

SCHOPENHAUER, A. **On the Will in Nature**. Disponível em: <http://en.wikisource.org/wiki/On_the_Will_in_Nature>. Acesso em: 19 jun. 2011.

SCOTT, W.R.; BACKMAN, E. Institutional theory and the medical care sector. In: S. Mick (ed.), **Innovations in Health Care Delivery: Insights from Organizational Theory**, San Francisco: Jossey-Bass, 1990. p. 20-21q852.

SHI, J.; GHANEM, R. Nonlocal, Stochastic Modeling of Materials with Multiscale Structures. In: COMPUTATIONAL MECHANICS WCCM, 6. e APCOM'04, Beijing, **Proceedings...**, Beijing: Tsinghua University Press & Springer-Verlag, 2004.

SHIN, N. et al. R&D, Value Chain Location and Firm Performance in the Global Electronics Industry. **Industry and Innovation**, Taylor & Francis, Londres, v. 16, n. 3, p. 315-330, 2009.

SHONNARD, D. R. Chapter 3: Environmental Laws and Regulations: From End-of-Pipe to Pollution Prevention. In: **Green Engineering: Environmentally Conscious Design of Chemical Processes**, eds. David T. Allen e David R. Shonnard, Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001. Disponível em: <<http://my.safaribooksonline.com/book/chemical-engineering/9780132442510>>. Acesso em: 17 jan. 2013.

SILVA FILHO, E. B.; ALVES, M. C. M.; DA MOTTA, M. Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas. **Matéria**, Rede Latino-Americana de Materiais, Rio de Janeiro, v. 12, n. 2, 2007.

SILVA, M. G. Cimentos Portland com adições minerais., in: **Materiais de Construção Civil**, ed. Geraldo C. Isaia, São Paulo: Ibracon, vol. 1, 2007.

SILVA, M. R. **Materiais de construção**. São Paulo: Pini, 1985. 266 p.

SILVA, R. R. **La participation de l'usager dans Le processus de construction**. Tese (Mestrado em Arquitetura), Faculté d'Aménagement, Université de Montréal, 1980.

SINCLAIR, L. The Transnational Capitalist Class and Contemporary Architecture in Globalizing Cities. **International Journal of Urban and Regional Research**, Wiley-Blackwell, Hoboken, v. 29, n. 3, p. 485-500, 2005.

SKANSKA. **Green Urban Development Report n. 2: Material Revolution**. Skanska, 2011. Disponível em: <http://group.skanska.com/Sustainability/Our-Journey-to-Deep-Green/Green->

Publications/Green-Urban-Development-reports/Green-Urban-Development-Report-No-2---Material/. Acesso em: 22 nov. 2012.

SOUZA, D. T. P. **Corredores verdes: uma abordagem para o seu planejamento em municípios brasileiros de pequeno porte**. Dissertação (Mestrado em Engenharia), NORIE/CPGEC – UFRGS, 2012.

SOUZA, U. E. L. et al. Diagnóstico e combate à geração de resíduos na produção de obras de construção de edifícios: uma abordagem progressiva. **Ambiente Construído**, Porto Alegre: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, v. 4, n. 4, p. 33-46, out./dez. 2004.

SPARNINS, E. **Mechanical properties of flax fibers and their composites**. Tese (Doutorado em Engenharia), Divisão de Engenharia de Polímeros, Lulea University of Technology, Lulea, 2006. 69 p.

STERN, N. **The Stern Review final report**. 2006. Disponível em: <http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/+http://www.hm-treasury.gov.uk/stern_review_report.htm>. Acesso em: 16 jun. 2011.

STINE, W. B.; GEYER, M. **Power from the sun**. 2001. Disponível em: <http://www.powerfromthesun.net/book.html>. Acesso em: 23 nov. 2012.

STO. **Lotusan**. Disponível em: <http://www.sto.de/de/unternehmen/innovationen/lotusan/sto_color_lotusan_lotuseffect.htm> Último acesso: 23 jan. 2013.

SULLIVAN, B. J. **Industrialization in the building industry**. Nova York: Van Nostrand Reinhold, 1980.

SULLIVAN, L. H. **The tall office building artistically considered**. Disponível em: <<http://academics.triton.edu/faculty/fheitzman/tallofficebuilding.html>>. Acesso em: 12 fev. 2011.

SUSLICK, S. B.; MACHADO, I. F. Non-renewable resources. In: **Earth system: history and natural variability**, Oxford: Eolss Publishers, Desenvolvido sob os auspícios da UNESCO, 2003. Disponível em: <www.eolss.net>. Acesso em 10 jun. 2011.

THACKARA, J. **In the bubble: Designing in a complex world**. Cambridge: MIT Press, 2005.

TOGERO, A. **Leaching of hazardous substances from concrete constituents and painted wood panels**. Tese (Doutorado em Engenharia), Department of Building Technology, Calmers University of Technology, Gotemborg, 2004.

ULSEN, C. **Caracterização e separabilidade de agregados miúdos produzidos a partir de resíduos de construção e demolição**, Tese (Doutorado em Engenharia), Escola Politécnica, USP, São Paulo, 2011. 222 p.

UMEREZ, J. et al. **Emergence and functionality**. Universidade Basca.

UN DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS. **Urban and rural population**. Disponível em: <http://esa.un.org/unpd/wup/unup/index_panel1.html>. Acesso em: 01 mai. 2012.

UNEP SBCI. **Draft briefing on the sustainable building index**. United Nations Environment Programme, Sustainable Buildings and Climate Initiative, Paris, 2010. Disponível em: <http://www.unep.org/sbci/pdfs/SYM2010-UNEP-SBCI_SB_Index_Briefing.pdf>. Acesso em 18 jun. 2011. Acesso: 10 set. 2012.

UNEP, **Paving the Way to Sustainable Consumption and Production. Commission on Sustainable Development** 18. seção, 3-14 maio 2010. Disponível em <<http://www.unep.fr/scp/marrakech/pdf/Marrakech.Process.Progress.Report.Paving.the.Road.to.SCP.pdf>>. Acesso em: 23 nov. 2012.

UNEP, **Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication**, 2011.

UNEP, **Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication**, Nova Iorque: Nações Unidas, 2011.

UNEP. **Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication**. 2011. Disponível em: <<http://www.unep.org/greeneconomy/GreenEconomyReport/tabid/29846/Default.aspx>>. Acesso em: 16 jun. 2011.

US BUREAU OF STATISTICS. **Median and average square foot of floor area in new single-family houses completed by location**. US Bureau of Statistics, Washington, 2013. Disponível em: <<http://www.census.gov/const/C25Ann/sfttotalmedavgsqft.pdf>>. Acesso em: 15 mai. 2013.

USGBC. **LEED**. Disponível em <http://www.usgbc.org/leed>. Acesso em 16 jan. 2013.

VAN DER RYN S.; COWAN, S. **Ecological Design**. Washington, Island Press, 1996.

VANEGAS, J. et al. Sustainable Technologies for the Building Construction Industry. SYMPOSIUM ON DESIGN FOR THE GLOBAL ENVIRONMENT, COLLEGE OF ARCHITECTURE, Atlanta, **Proceedings...**, Georgia Institute of Technology, Atlanta, 1995.

VERÇOZA, E. J. **Materiais de construção**. v.1, Porto Alegre: PUC/Cae, 1970.

VERRAN, G.O. et al. **Reciclagem de latas de alumínio usando fusão em forno elétrico à indução**. Estudos tecnológicos, v. 3, p. 01-11, 2007.

VICTOR, P. A.; ROSENBLUTH, G. Managing without growth. **Ecological Economics**, Londres, v. 61, 2007. p. 492-504.

VITRUVIUS POLLIO, M. **Ten Books On Architecture**. The Project Gutenberg eBook, 2006. Disponível em: <<http://www.gutenberg.org/files/20239/20239-h/29239-h.htm>>. Acesso em: 13 jan. 2012.

VOET, D., VOET, J. G.; PRATT, C. W. **Fundamentos de Bioquímica**. Porto Alegre: Artmed, 2000, 282p.

VOROBIEV, V. A. **Building materials**. Moscow: Higher School Publishing House, 1965. 360 p.

VRIJHOEF, R.; KOSKELA, L., The four roles of supply chain management in construction, **European Journal of Purchasing & Supply Management**, v. 6, p. 169-178, 2000.

- WALDRON, A. et al., **The world too small to see**. Cornell University, Ithaca, NY, 2004. Disponível em: <<http://www.research.cornell.edu/KIC/events/Journalists2004/Nanotech%20101.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2011.
- WALLIMAN, N.S.R. **Your Research Project: A step-by-step Guide for the First-time Researcher**. Londres: Sage, 2001.
- WANG, X. et al. The Largest Bio-Silica Structure on Earth: The Giant Basal Spicule from the Deep-Sea Glass Sponge *Monorhaphis chuni*. In: **Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine**, Cairo: Hindawi, 2011. 14 p.
- WASTE MANAGEMENT. **Sustainability Report 2008**. Disponível em: <http://www.wm.com/sustainability/pdfs/WM_SRR_2008.pdf>. Acesso em: 23 mai. 2011.
- WEAVER, P. **Carnoules Statement**. Apresentado na reunião do clube em setembro de 1996, Factor 10 club, 1997.
- WEDGE. **Sustainability Report 2010**. Disponível em: <<http://www.wedge.coop/pdf/wedge-sustainability-report-2010.pdf>>. Acesso em: 17 out. 2011.
- WEIZSACKER, E. U. et al. **Factor five**. Londres: Earthscan, 2009. 448 p.
- WEIZSACKER, E. U. et al. **Factor four: doubling wealth, halving resource use**. Londres: Earthscan, 1998. 224 p.
- WEN, L. et al. Construction of biomimetic smart nanochannels with polymer membranes and application in energy conversion systems. **Physical Chemistry - Chemical Physics**, Londres: Royal Society of Chemistry, v. 14, p. 4027- 4042, 2012.
- WOJES, R. **Prestressed steel cartel fined in EU**. Disponível em: <http://metals.about.com/b/2010/07_mar_prestressed-steel-cartel-fined-in-eu.htm>. Acesso em: 30 jun. 2012.
- WOODWARD, E. L. **The age of Reform, 1815 – 1870**. Oxford: Clarendon, 1938.
- WORLDWATCH INSTITUTE. **Vital Signs 2005**. Washington: Worldwatch Institute, 2005.
- WRI, **Material flows accounts - A tool for making environmental policy**. Washington: WRI, 2009.
- WUPPERTAL INSTITUTE, **Functional Integration: the resource-efficient building envelope**. Wuppertal: Wuppertal Institute, 2009. Disponível em: <http://www.wupperinst.org/uploads/tx_wibeitrag/Ecolnno_Building_en.pdf>. Acesso em: 18 nov. 2012.
- XU, J.; LAVAN, D. A. Designing artificial cells to harness the biological ion concentration gradient. **Nature Nanotechnology**, Nature, Nova Iorque, v. 3, p. 666-670, 2008.
- YEN, J.; WEISSBURG, M. Perspectives on biologically inspired design: introduction to the collected contributions. **Bioinspiration & Biomimetics**, v. 2, 2007.
- ZENDEJAS, F. J. Orienting lipid domains in giant vesicles using an electric field. **Chemical Communications**, Royal Society of Chemistry, Londres, v. 47, p. 7320-7322, 2011.

ZHAO, R. et al. Emerging biodegradable materials: starch and protein-based biocomposites. **Journal of Materials Science**, Springer, Berlin, v. 43, p. 3058-3071, 2008.

ZUKOWSKI, D. Estrutura Multinível do sistema elétrico em uma enguia. Disponível em: <<http://patapsco.nist.gov/ImageGallery/retrieve.cfm?imageid=584&dpi=300&fileformat=jpg>>, 2008. Acesso em: 16 dez. 2012.

**APÊNDICE A – DESENVOLVIMENTO DE UMA SOLUÇÃO SEGUNDO O
NOVO PARADIGMA DA CONSTRUÇÃO DE EDIFICAÇÕES**

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	6
2	FUNÇÕES A SEREM ATENDIDAS	7
3	FORMAS DE ENERGIA ENVOLVIDAS	8
3.1	OPERAÇÕES ENERGÉTICAS	11
3.2	ESTRUTURA BÁSICA DA SOLUÇÃO ENERGÉTICA	16
4	SOLUÇÕES POSSÍVEIS PARA AS OPERAÇÕES ENERGÉTICAS	17
4.1	SOLUÇÕES PARA USO DE ENERGIA SOLAR	17
4.2	SOLUÇÕES PARA USO DE ENERGIA ELÉTRICA	19
4.3	SOLUÇÕES PARA USO DE ENERGIA QUÍMICA.....	23
4.4	SELEÇÃO DA SOLUÇÃO MAIS ADEQUADA.....	24
5	PRIMEIRO CENÁRIO: TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS	26
5.1	ABSORÇÃO DE ENERGIA SOLAR.....	26
5.2	CONDUÇÃO DE ENERGIA SOLAR	29
5.3	EMISSÃO DE ENERGIA SOLAR VISÍVEL	31
5.4	EMISSÃO DE ENERGIA SOLAR ULTRAVIOLETA.....	31
5.5	EMISSÃO DE ENERGIA SOLAR INFRAVERMELHA.....	32
5.6	ABSORÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	32
5.7	CONDUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	34
5.8	ACUMULAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	34
5.9	TRANSFORMAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM ENERGIA LUMINOSA ...	35
6	SEGUNDO CENÁRIO: TECNOLOGIAS NÃO DISPONÍVEIS	36
6.1	ABSORÇÃO DE CONDUÇÃO DE ENERGIA SOLAR.....	36
6.2	EMISSÃO DE ENERGIA SOLAR	45
6.3	OUTRAS OPERAÇÕES ENERGÉTICAS	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Utilização de energia solar	13
Figura 2: Utilização de energia elétrica	13
Figura 3: Utilização de energia química	14
Figura 4: Espectro de radiação solar	15
Figura 5: Gráfico da modelagem energética da solução adotada	16
Figura 6: Operações energéticas utilizando material fosforescente	19
Figura 7: Estrutura multinível do sistema de acumulação de energia elétrica da enguia	22
Figura 8: Sequência de reações químicas para a geração de luz	24
Figura 9: Estrutura e amostra de filme transparente de célula fotovoltaica	27
Figura 10: Separação das diversas radiações do espectro solar	28
Figura 11: Concentrador parabólico composto	29
Figura 12: Sistema de absorção e condução de energia luminosa	30
Figura 13: Incidência de radiação solar sobre a superfície da terra	33
Figura 14: Complementariedade entre duas formas de energia	35
Figura 15: Placas para absorção de luz direta	37
Figura 16: Uma lente fresnel e detalhe da seção A - A'	37
Figura 17: Espícula gigante de Monorhaphis Chuni	38
Figura 18: Após passar pelas lentes fresnel, a luz é convergida para um ponto onde é colimada	39
Figura 19: Convergência de diversos feixes de luz colimada, através de espelho côncavo	39
Figura 20: Tronco de cone de absorção de luz difusa	41
Figura 21: Estruturas hexagonais formadas por conjuntos de cones	42
Figura 22: Esquema do trajeto da luz incidente sobre cada estrutura hexagonal	43
Figura 23: Vista superior de uma plaqueta retangular	43
Figura 24: Condução da luz difusa através das plaquetas quadradas	44

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Funções que devem ser atendidas pelo envelope.	7
Quadro 2: Exigências e requisitos funcionais para um envelope	8
Quadro 3: Funções a serem atendidas pelo envelope - final	9
Quadro 4: Funções e formas de energia relacionadas.....	10
Quadro 5: Operações energéticas presentes nos sistemas lumínicos utilizando três formas de energia inicial	12

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparação entre as condutividades e densidades de vários metais.....20

1. INTRODUÇÃO

Neste apêndice será apresentado um exercício de desenvolvimento de uma solução segundo o novo paradigma da construção de edificações apresentado no capítulo anterior. Este exercício fornecerá apenas algumas características gerais dessa solução, mostrando a aplicação dos princípios de sustentabilidade apresentados no capítulo 4. Tal aplicação não pode ocorrer em abstrato, mas deve orientar cada decisão no processo de desenvolvimento da solução. Por isso, a cada decisão tomada, serão informados quais os princípios utilizados, justificando assim a aderência ao novo paradigma.

Esta solução focará essencialmente nos produtos e processos envolvidos, assumindo que a indústria da edificação responderá pelo processo de desenvolvimento de soluções deste tipo.

O exercício foi aplicado sobre o envelope da edificação, porque é um elemento que está presente na grande maioria das edificações e deve desempenhar inúmeras funções. Um estudo semelhante foi realizado por GERHARDT (2009), que buscou a máxima eficiência na solução, utilizando materiais de construção. Entretanto, seguir com a metodologia para todas as funções do envelope seria tarefa demasiado longa. À guisa de exemplo, foram consideradas todas as funções até a etapa de definição das formas de energia envolvidas. A partir da etapa de operações energéticas com cada forma de energia de cada função, o presente exemplo concentrou-se apenas na função de iluminar os ambientes internos da edificação para atender o requisito de conforto lumínico, aplicando, simultaneamente, os princípios de sustentabilidade descritos no capítulo 4.

Para o desenvolvimento, foi aplicada a modelagem energética na sequência de passos descrita em 6.6.1 – Modelagem energética.

2. FUNÇÕES A SEREM ATENDIDAS

Gerhardt (2009) classificou as funções que devem ser atendidas pelo envelope em: de proteção, de suprimento e reguladoras, ambientais, estruturais e culturais. No quadro abaixo são apresentadas as funções específicas de cada grupo.

Quadro 1: Funções que devem ser atendidas pelo envelope. (Fonte: GERHARDT, 2009).

GRUPO	FUNÇÃO
Proteção	Proteger contra o frio, o calor, a água, a radiação solar, o fogo, animais, de propriedade e alimentos, contra a poeira e a poluição do ar, e dano mecânico.
De suprimento e reguladoras	Prover de maneira controlada: luz natural, ar, vistas do exterior e do interior, ganhos de calor de sistemas ativos, ganhos de energia solar, absorção de som, proteção visual, proteção contra o vento, proteção contra o ofuscamento, proteção contra o vapor de água.
Ambientais	Prover um habitat para animais e plantas, retenção de água, filtragem do ar, produção de calor e energia elétrica, sequestro de CO ₂ .
Estruturais	Transferir as cargas próprias do envelope e de outros elementos, acomodar os movimentos diferenciais da edificação.
Culturais	Prover representação e identidade cultural.

Azambuja (2008) desenvolveu outro grupo de funções em três níveis: grupo (a característica geral das funções), a exigência funcional (o tipo específico de função a ser atendida dentro do grupo) e o requisito (a característica específica a ser atendida na exigência). Esta classificação foi desenvolvida para esquadrias, mas pode ser aplicada para o caso do envelope como um todo. As funções de segurança, habitabilidade e sustentabilidade foram retiradas da norma NBR 15575-1 (ABNT, 2008), às quais foram acrescentados os grupos de construtibilidade e economicidade. O quadro abaixo apresenta o quadro de funções selecionadas.

Quadro 2: Exigências e requisitos funcionais para um envelope (AZAMBUJA, 2008).

GRUPO	EXIGÊNCIA	REQUISITO
Segurança	Segurança estrutural	Estabilidade e resistência estrutural Rigidez e integridade física (fissuras) Resistência ao impacto de corpo duro e corpo mole
	Segurança contra o fogo	Inflamabilidade Emissão de gases de combustão
	Segurança no uso	Segurança em uso e operação do EC
Habitabilidade	Estanqueidade	Infiltração de água Umidade
	Desempenho térmico	Transmitância térmica
	Desempenho acústico	Isolação acústica
	Saúde, higiene e qualidade do ar	Higienização Indisponibilidade a organismos patogênicos
	Funcionalidade e acessibilidade	Funcionalidade em uso Absorção de dilatação térmica
	Conforto tátil e antropodinâmico	Condicionamento superficial Conforto e segurança tátil Conforto termo-tátil
	Desempenho lumínico	Conforto lumínico
Sustentabilidade	Durabilidade	Durabilidade em uso normal
	Manutenibilidade	Acessibilidade Intercambiabilidade
	Impacto ambiental	Biodegradabilidade em ambiente hostil Incorporação de energia Reciclabilidade
Construtibilidade	Trabalhabilidade	Moldabilidade Esculturabilidade Montabilidade
	Conectividade	Padronização Coordenação modular
	Transportabilidade	Ergonomia Transportabilidade
Economicidade	Viabilidade econômica	Valor presente Externalidades

É interessante observar que as funções apresentadas por Azambuja incluem requisitos relativos aos processos produtivos, além daqueles relativos aos processos degenerativos de uso e de degradação.

A partir dos dois quadros é possível gerar um terceiro quadro de funções, que também leve em consideração explicitamente as etapas do ciclo de vida da edificação.

Quadro 3: Funções a serem atendidas pelo envelope - final.

ETAPA NO CICLO DE VIDA DA EDIFICAÇÃO	GRUPO FUNCIONAL	FUNÇÃO
Processos produtivos	Construtibilidade	Facilidade de transporte Facilidade de montagem Resistência à manipulação
	Economicidade na produção	Minimização no consumo de insumos Utilização de recursos locais
Processos degenerativos de uso	Segurança	Segurança estrutural Segurança contra fogo Segurança contra VOCS Segurança contra invasores
	Regulação	Conforto lumínico Conforto acústico Salubridade ambiental relativa ao ar e outros gases Salubridade relativa a invertebrados Conforto higroscópico Estanqueidade à água Salubridade relativa a vertebrados
	Expressão cultural	Prover representação e identidade cultural
	Economicidade no uso	Acumulação de energia calorífica Acumulação de água Transformação de energia radiante em energia elétrica Facilidade de manutenção
Processos degenerativos de degradação	Degradabilidade	Biodegradabilidade em ambiente hostil Reciclabilidade

3. FORMAS DE ENERGIA ENVOLVIDAS

A partir da definição das funções, é identificar quais as formas de energia envolvidas em cada função. O quadro abaixo associa cada função da coluna da direita do quadro acima com as formas de energia envolvidas em sua realização.

Quadro 4: Funções e formas de energia relacionadas.

FUNÇÃO	FORMA DE ENERGIA
Facilidade de transporte Facilidade de montagem Resistência à manipulação	As formas de energia a serem utilizadas nestas funções somente poderão ser definidas durante a definição dos processos produtivos correspondentes.
Minimização no consumo de insumos Utilização de recursos locais	
Segurança estrutural	Mecânica e térmica
Segurança contra fogo	Térmica e química
Segurança contra VOCS	Química
Segurança contra invasores	Mecânica e química
Conforto lumínico	Eletromagnética de amplo espectro (solar) e visível, elétrica, química
Conforto acústico	Mecânica sonora
Salubridade ambiental relativa ao ar e outros gases	Mecânica com transferência de massa
Salubridade relativa a invertebrados	Mecânica com transferência de massa
Conforto higroscópico	Mecânica com transferência de massa
Estanqueidade à água	Mecânica com transferência de massa
Prover representação e identidade cultural	Eletromagnética (luz visível). Outras formas de energia podem estar envolvidas, dependendo da solução.
Acumulação de energia calorífica	Eletromagnética, térmica, química, elétrica
Acumulação de água	Mecânica, iônica, química
Transformação de energia eletromagnética em energia elétrica	Eletromagnética, elétrica, química
Facilidade de manutenção	Mecânica, química
Biodegradabilidade em ambiente hostil	Química
Reciclabilidade	Química, mecânica, eletromagnética

3.1. OPERAÇÕES ENERGÉTICAS

Como foi dito no início deste capítulo, as operações energéticas correspondentes a cada uma das funções e forma de energia restringiu-se à função de conforto lumínico da edificação. Portanto, a energia deve estar na forma final de energia luminosa quando for emitida pelo sistema desenvolvido.

A energia luminosa é sempre resultado da transformação da energia de excitação de um elétron. A energia de excitação, por sua vez, se manifesta quando um elétron que está em uma órbita baixa absorve energia de alguma fonte, mudando sua órbita e passando para um estado excitado (uma órbita mais alta, isto é, mais afastada do núcleo). A transformação em energia luminosa ocorre quando o elétron retorna ao seu estado básico (decai) e perde a energia adquirida emitindo um fóton de luz. Dependendo da frequência desse fóton, a luz será ultravioleta, visível, infravermelha, ou outra forma de radiação. A forma de energia que permitiu a excitação do elétron determina o tipo de fenômeno: incandescência (energia térmica), quimiluminescência (energia química), eletroluminescência (energia elétrica), sonoluminescência (energia mecânica de vibração), cintilação (energia radiante), dentre outros. Na prática, os artefatos que emitem energia luminosa no espectro visível transformam somente energia radiante (normalmente solar), elétrica e química. Estas são, portanto, as formas de energia que foram selecionadas para interagir com o sistema lumínico e realizar as funções previstas para ele.

A transformação em energia de excitação de elétrons é feita através da utilização de dois tipos de substâncias: fluorescentes e fosforescentes. Substâncias fluorescentes decaem quase instantaneamente, enquanto substâncias fosforescentes decaem mais lentamente, até um intervalo de horas.

No primeiro caso, existem várias classes de substâncias que transformam os vários tipos de energia em radiação de luz visível. Sua utilização, entretanto impede que haja acumulação de energia no sistema, devido ao decaimento instantâneo.

No segundo caso, existem dois tipos de substâncias que apresentam comportamento fosforescente: aluminato de estrôncio (SrAl_2O_4) e sulfeto de zinco (ZnS), dopados com várias substâncias para emitir diferentes cores. O aluminato emite luz com intensidade 10 vezes superior ao sulfeto, porém seu custo também é 10 vezes maior. A intensidade de emissão do aluminato é da ordem de 300 mcd/m^2 , ou seja, sua iluminação serve tão somente para definir os limites de um espaço interno, mas não pode substituir uma fonte de iluminação na função de iluminar outros objetos.

As operações energéticas para cada forma de energia podem ser diferentes. Portanto, foi desenvolvido um grupo de operações energéticas para cada forma. Tais operações são descritas no quadro abaixo. Foi excluída em cada grupo a transformação em energia de excitação do elétron, porque ela é comum a todos.

Quadro 5: Operações energéticas presentes nos sistemas lumínicos utilizando três formas de energia inicial.

ENERGIA SOLAR	ENERGIA ELÉTRICA	ENERGIA QUÍMICA
Absorção	Condução	Acumulação
Condução	Acumulação	Condução
Transformação	Transformação	Transformação
Emissão	Condução	Condução
	Emissão	Emissão

Nos casos das energias elétrica e química, foi acrescentada a operação de acumulação. A inclusão desta operação energética resulta da aplicação do princípio de robustez, visto que criar uma reserva de energia permite que o sistema absorva as variações de entrada de energia sem afetar seu desempenho. A energia solar não tem esta operação energética porque não pode ser acumulada¹. A operação de acumulação é importante porque a forma de energia que é absorvida pelo sistema pode ser inconstante. Esse é o caso, por exemplo, da energia solar. Além disso, muitos sistemas contam com subsistemas de acumulação para regulação do fluxo de saída.

A descrição das operações energéticas apresentada é provisória, porque não foram incluídas operações que estivessem além do escopo definido nesta descrição inicial. Entretanto, a definição das soluções que foram utilizadas e adaptadas exigiu a inclusão de outras operações energéticas. Especificamente no caso da energia elétrica, por exemplo, não foram incluídas operações energéticas de transformação de outro tipo de energia (tais como solar, eólica ou química) nessa forma de energia. Essas operações serão incorporadas mais adiante na descrição da solução.

Para facilidade de visualização, foram produzidos gráficos das sequências das operações energéticas para cada forma de energia: solar (figura 1), elétrica (figura 2) e química (figura 3). Nesses gráficos, foram acrescentadas as transformações em energia térmica, que não

¹ A rigor, energia luminosa pode ser acumulada em lasers, mas sua utilização não é considerada aqui.

são funcionais, mas mostram perdas importantes de eficiência ao longo do processo de iluminação.

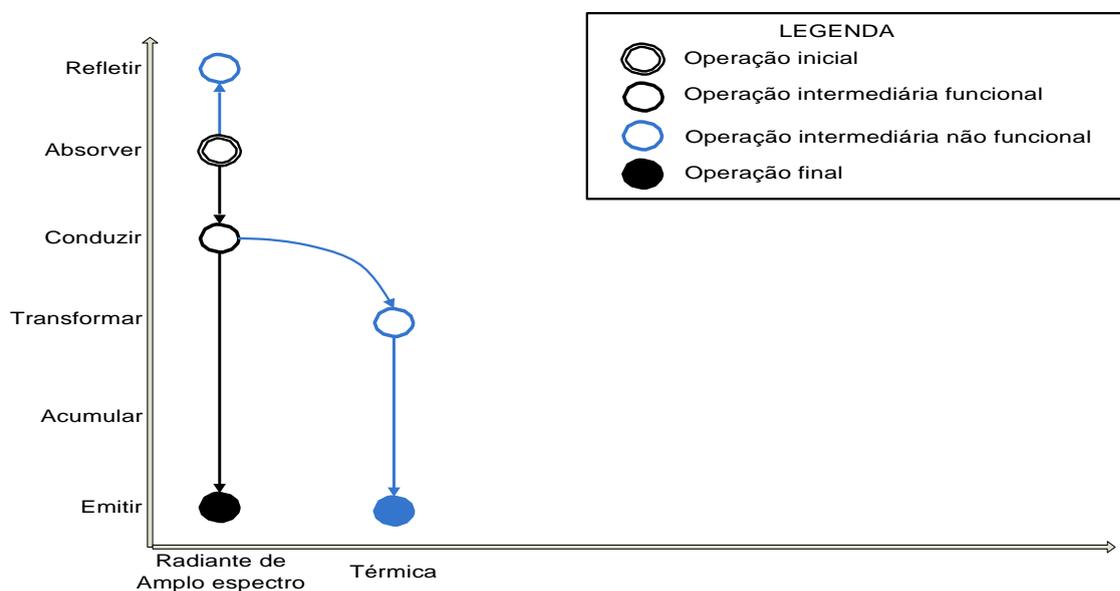


Figura 1: Utilização de energia solar

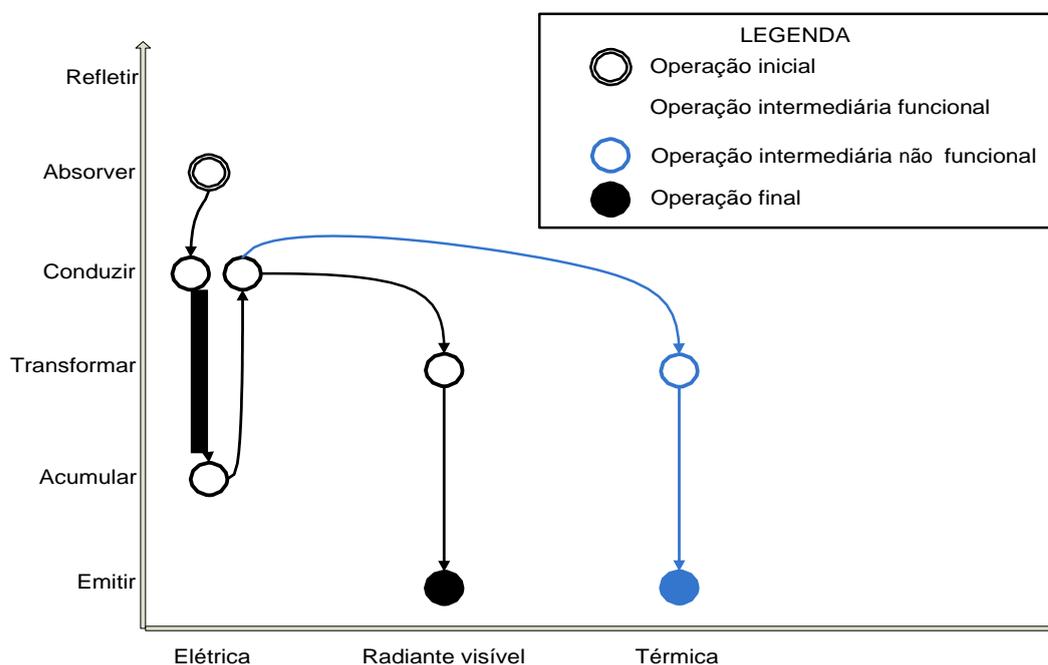


Figura 2: Utilização de energia elétrica.

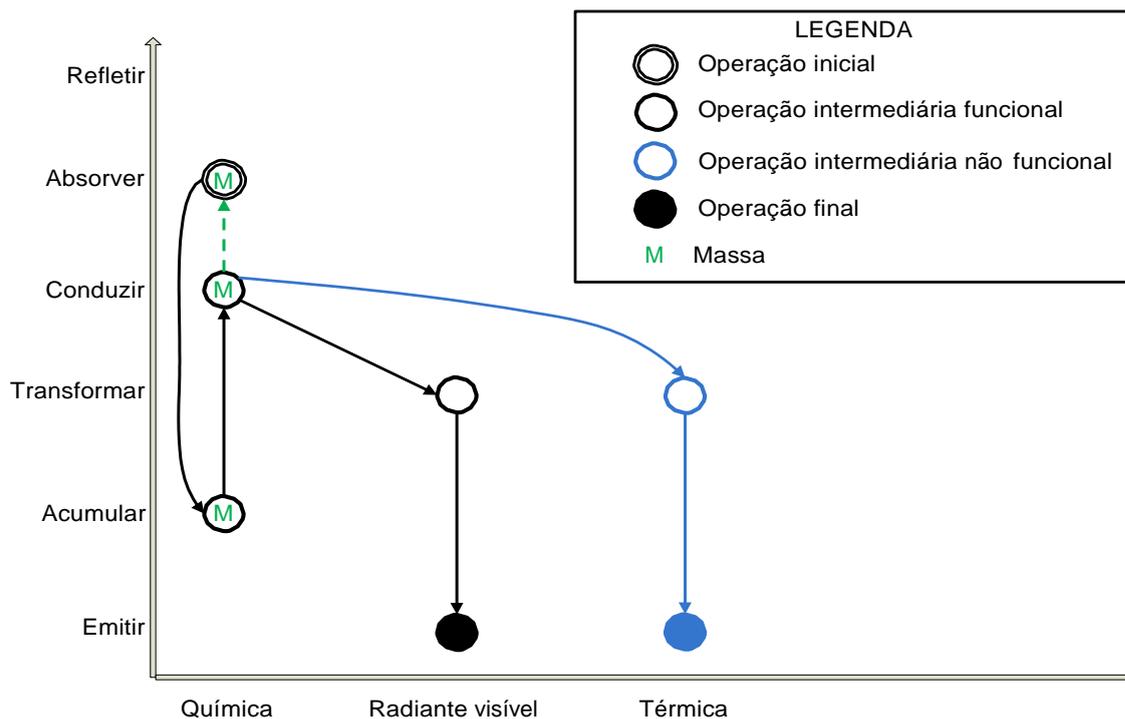


Figura 3: Utilização de energia química.

É importante notar que a energia química exige o transporte de massa em uma parte do processo, porque a energia está armazenada nas substâncias químicas. Entretanto, a energia mecânica cinética, responsável pela propulsão nesse transporte, foi obtida através da transformação de outra forma de energia (elétrica, por exemplo), operação que não é mostrada no gráfico para não carregá-lo com excesso de informação.

Considerando que havia três formas de energia que poderiam ser utilizadas, foi adotada uma estratégia geral de priorização da energia solar em relação às outras formas que também poderiam ser utilizadas. Esta estratégia baseia-se em diversas considerações. Primeiro, ela pode ser utilizada diretamente para iluminação sem ser transformada em outra forma de energia, portanto sem perda de energia em uma operação de transformação, uma aplicação do princípio de mínimo consumo de energia. Segundo, por suas características de energia limpa e distribuída em todas as regiões do globo sem nenhum custo, aplicando os princípios de minimização de externalidades e de utilização de recursos locais. Além disso, com as tecnologias atualmente disponíveis, a energia solar pode ser facilmente transformada em energia elétrica ou de excitação de elétrons. A energia elétrica, por sua vez, pode ser transformada em energia química e em energia de ionização. Finalmente, essas formas de energia podem ser transformadas em energia luminosa, em outras vias de atendimento da função de iluminação, atendendo os princípios de redundância e de

robustez, por permitir que o sistema continue operando mesmo que alguns de seus artefatos cessem o seu funcionamento.

A energia solar é uma radiação de amplo espectro, isto é, além da luz visível, as ondas eletromagnéticas também têm frequências acima e abaixo desta banda, como é visto na figura 4 abaixo. Isto significa que a função de iluminação é atendida pelas frequências de luz visível, enquanto a parte da energia não visível – essencialmente ultravioleta e infravermelho – pode ser transformada em energia elétrica ou de excitação de elétrons, sem perda de eficiência da função de iluminação. Para tanto, é necessário separar, da luz visível, a parte não visível do espectro solar (ultravioleta e infravermelho). Esta separação é justificada pelo princípio de desmaterialização, porque o mesmo aparato pode obter mais energia útil do que seria possível caso toda a energia solar fosse utilizada diretamente na iluminação.

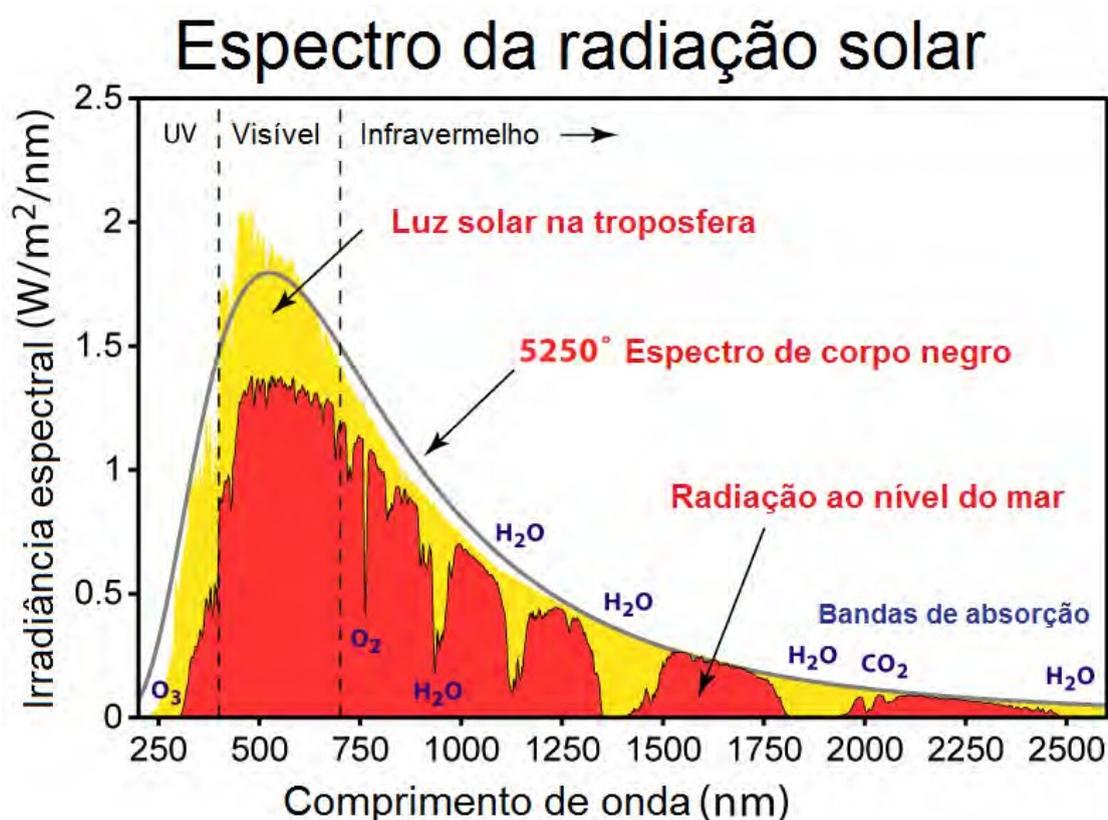


Figura 4: Espectro de radiação solar, adaptado de Rohde (2012).

4. SOLUÇÕES POSSÍVEIS PARA AS OPERAÇÕES ENERGÉTICAS

As soluções possíveis foram divididas em operações para o uso de cada forma de energia (solar, elétrica ou química). A discussão dessas tecnologias não tem a intenção de ser exaustiva. Para isso, existem trabalhos bem mais completos. No caso específico do uso da energia solar para a iluminação de edificações, principal forma de energia a ser utilizada neste exercício, a tese de Hansen (2006) faz um apanhado bastante completo das tecnologias atualmente disponíveis. Livros como o de Chaves (2008) complementam as descrições com uma análise teórica dos fenômenos.

4.1 SOLUÇÕES PARA USO DE ENERGIA SOLAR

A energia solar é disponibilizada de duas maneiras: direta e difusa. A energia solar direta apresenta duas grandes vantagens: grande intensidade e baixa entropia porque os raios estão, para todos os efeitos práticos, incidindo paralelamente sobre o artefato que fará a absorção da energia. A intensidade da radiação que chega à terra é, em média, de 1369 $\text{watts}\cdot\text{m}^{-2}$, enquanto ao nível do mar ocorre uma perda de aproximadamente 15%, girando em torno de 1163 watts/m^2 . Por outro lado, a luz solar difusa tem intensidade bem menor e os raios não estão alinhados. Além disso, a concentração de luz difusa apresenta um limite termodinâmico, que faz com que a eficiência do processo seja bastante baixa, o que significa que, para que uma quantidade significativa de luz difusa possa ser concentrada, as dimensões do aparato devem ser bem maiores do que seria necessário para a concentração de luz direta e sua geometria otimizada é diferente. Assim, nos casos em que há necessidade de concentração da luz para sua condução a uma área interna da edificação que não esteja adjacente ao ponto de absorção o aparato que efetua essa absorção deve ter uma geometria adequada tanto para captar luz direta como luz difusa.

As soluções para a absorção de radiação solar podem ter duas finalidades: conduzir a radiação através de um meio que possa conduzi-la; ou transformar essa forma de energia em outra. A absorção da luz solar pelo sistema pode ser feita com aparatos que, ou reflitam ou conduzam a radiação. Nos dois casos o objetivo é concentrar a luz para conduzi-la no sistema. Hoje, essa absorção é feita principalmente com o emprego de vidro, normalmente produzido em chapas planas. Este vidro tende a ser uma estrutura amorfa homogênea, cuja espessura é determinada basicamente por dois critérios de uso: esforços de manipulação e transporte antes da sua instalação; e, após a instalação, esforços mecânicos de impacto e causados pelo vento. A principal característica mecânica do vidro é ser um material frágil, o que obriga a um aumento considerável na espessura das chapas. Por outro lado, a

produção do vidro é feita em alta temperatura para a moldagem do material em fase líquida. Isto significa que uma grande quantidade de energia, normalmente fornecida por gás ou eletricidade, é despendida. A energia incorporada do vidro é de 15 MJ/kg (HAMMOND; JONES, 2008).

A utilização de resinas, principalmente policarbonatos, tem sido uma alternativa para o uso de vidro. A grande vantagem é a menor espessura necessária, devido ao comportamento resiliente do material, mais resistente ao choque que o vidro comum e mesmo ao vidro temperado. Entretanto, esta tecnologia ainda apresenta um custo bastante superior ao do vidro, com alta quantidade de energia incorporada, de 112,9 MJ/kg. É um material pouco utilizado.

Uma alternativa a essas tecnologias de alta intensidade energética e não biodegradáveis seria a mimetização de sílica biogênica para a produção de vidro. Diversos animais, principalmente diatomáceas e esponjas, produzem estruturas utilizando sílica. Essas estruturas e seus processos de produção têm sido estudados para serem mimetizados, por dois motivos essenciais: a formação da estrutura pode ser feita com um controle de desenhos complexos na escala nanométrica e a formação dessas estruturas é feita à temperatura ambiente, consumindo muito menos energia que a fabricação de vidro. Além disso, como elas contêm uma pequena parte orgânica, podem ser biodegradadas ao longo do tempo. Entretanto, as pesquisas no campo ainda não geraram uma tecnologia confiável e muito menos um produto comercial. O desenvolvimento de soluções desse tipo atenderia o princípio de biomimetismo.

A condução de energia é feita utilizando substâncias ou estruturas que permitam que a luz viaje através de um meio material sólido, líquido ou gasoso ou através do vácuo. A condução através de um meio deve ter duas características: a transformação de energia radiante em outro tipo de energia deve ser mínima (ou seja, o meio deve ser transparente para aquela frequência de onda) e a energia deve ser refletida (impedida de seguir) em direções diferentes daquela que leva ao local de outra operação energética (transformação, acumulação ou emissão). Estas duas características devem ser combinadas na forma do corpo, de tal maneira que a energia possa ser conduzida a distâncias que tornem funcional a solução. Neste caso, tal distância é a maior dimensão de edificações de um pavimento. De modo geral, tal distância pode ser tomada como a dimensão de um pavimento tipo de edificações de vários andares. Existem hoje duas soluções gerais para a condução dessa forma de energia: cabos de fibra ótica e tubos de luz. As vantagens da primeira solução são a grande flexibilidade para fazer curvas e a pequena perda lateral. A desvantagem é o custo. Os tubos de luz apresentam (obviamente) exatamente o oposto em termos de

vantagens e desvantagens. A reflexão especular em uma superfície nunca é tão eficiente quanto a reflexão devida à mudança de densidade (impossibilidade de refração, calculada pela Lei de Snell²), mas o custo é mais baixo. Além disso, curvas acabam criando mais reflexão e difusão da luz dentro do tubo.

Uma possibilidade interessante é a transformação de energia ultravioleta em energia de excitação de elétrons em substâncias fluorescentes ou fosforescentes. No caso de excitação em substâncias fosforescentes, esta operação energética teria a vantagem de armazenar energia e pode ser uma opção a ser analisada. As operações energéticas para a utilização desse tipo de substância são mostradas no gráfico abaixo.

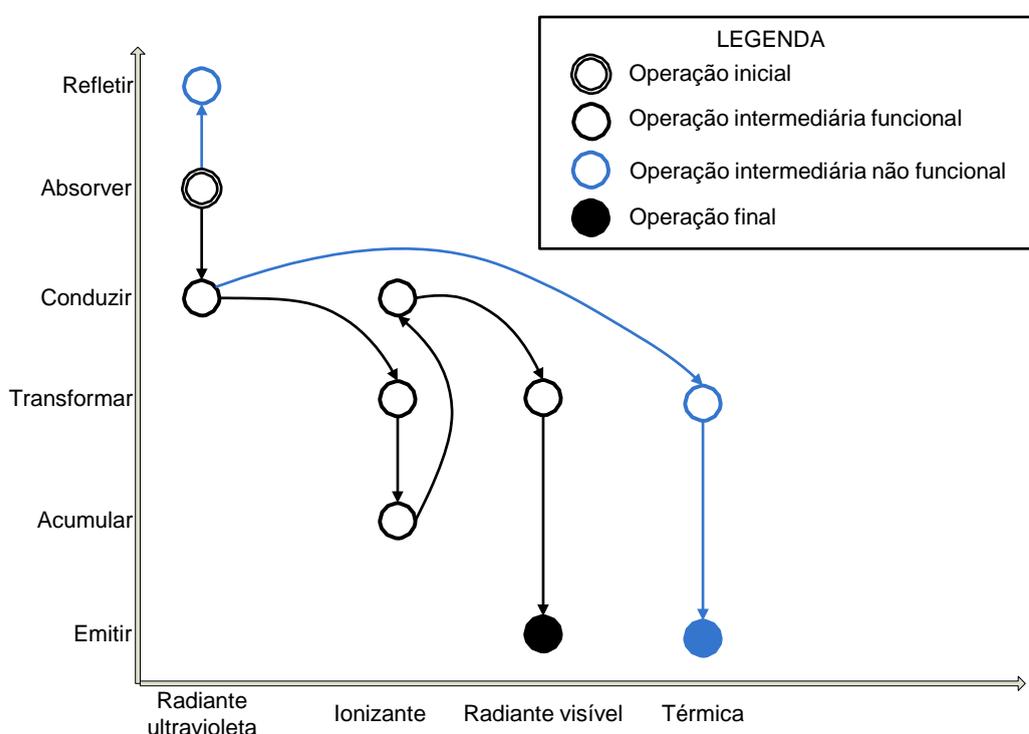


Figura 6: Operações energéticas utilizando material fosforescente.

4.2 SOLUÇÕES PARA USO DE ENERGIA ELÉTRICA

A condução de energia elétrica é realizada de dois modos distintos. A tecnologia humana conduz a eletricidade através da movimentação de elétrons e utiliza fios metálicos para este fim. São utilizados cobre e alumínio para sistemas em larga escala. Entretanto, para

²A Lei de Snell pode ser representada pela fórmula $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$, onde n_1 e n_2 são os índices de refração dos materiais 1 e 2 e θ_1 e θ_2 são os ângulos de incidência e saída do raio de luz da superfície entre 1 e 2. Assim, $\sin \theta_2 = n_1 \sin \theta_1 / n_2$. Caso este valor seja superior a 1, surge a impossibilidade física da refração e o raio de luz é refletido. Evidentemente, a superfície deve estar suficientemente polida para que a reflexão seja completa.

condução em pequena escala e maior responsabilidade ou em que a relação custo-benefício justifica, são empregados ouro, prata e algumas ligas desses metais, que são melhor condutores e não oxidam com facilidade. Para o controle do fluxo são empregados interruptores de diversos tipos e ligas de elementos semicondutores que permitem que o fluxo ocorra em um único sentido. Os animais conduzem a eletricidade utilizando íons, normalmente de metais alcalinos (essencialmente sódio e potássio) e alcalino-terrosos (principalmente cálcio, mas também magnésio). Para a condução, utilizam estruturas celulares que empregam íons de metais alcalinos e alcalino-terrosos. O controle do fluxo é feito através de membranas lipídicas e são utilizadas válvulas de passagem dos íons e bombas de íons para definir o sentido do fluxo.

A utilização dos metais alcalinos e alcalino terrosos apresenta duas grande vantagens. Primeiro, sua toxicidade é muito baixa, significando que sua liberação no meio ambiente terá impacto desprezível, mesmo porque eles já são encontrados em abundancia no meio natural, disponibilizados para os seres vivos. Este baixo impacto atenderia o principio da minimização de externalidades. Segundo, são metais abundantes em praticamente todas as regiões e sua obtenção ou extração não causa um aumento significativo na entropia dos sistemas naturais. Utilizá-los atenderia o principio de máxima utilização de recursos locais. O sódio e o cálcio, principalmente, podem ser obtidos de maneira muito simples. O primeiro pode ser obtido através da eletrolise do cloreto de sódio. O segundo pode ser obtido de fontes biológicas, tais como ossos e conchas, sem a necessidade de extração de rochas calcárias. A utilização destas fontes atenderia o principio da reciclagem.

A grande dificuldade na utilização de íons desses metais é que ela deveria ser restrita a um circuito fechado, pois toda a estrutura de distribuição de eletricidade utiliza a movimentação de elétrons. A produção e circulação de íons também apresenta alguns problemas tecnológicos que, embora não sejam insuperáveis, tornam essas alternativas de difícil implantação. Por outro lado, a redução química dos compostos que contém esses elementos em sódio e cálcio metálico apresenta uma possibilidade real de utilização. A tabela 1 apresenta a condutividade e a densidade desses elementos, assim como do cobre.

Tabela 1: Comparação entre as condutividades e densidades de vários metais.

METAL	CONDUTIVIDADE $S.m^{-1}$	DENSIDADE $ton.m^{-3}$	CONDUTIVIDADE/DENSIDADE $S.m^2/ton$
Sódio	2,1	0,97	2,16
Cálcio	3,0	1,55	1,93
Alumínio	3,5	2,70	1,30
Cobre	5,9	8,96	0,66

É possível constatar que a condutividade do sódio é bastante baixa (equivalente a pouco mais de 60% da condutividade do cálcio), enquanto a condutividade do cálcio é bastante próxima da condutividade do alumínio (equivale a 86%). A condutividade do cobre é substancialmente superior à dos outros metais. Por outro lado, as densidades também aumentam com o aumento de condutividade. Considerando-se que a condutividade tem um componente geométrico que independe da massa (ela é medida por unidade de área), dividindo-se a condutividade pela densidade, o sódio passa a ter a melhor relação de condutividade/massa, seguido de perto pelo cálcio, enquanto o cobre tem a pior relação.

Esses dados tornam interessante a exploração do uso de fios de sódio e cálcio metálicos, visto que a energia incorporada para a obtenção desses metais é medida por unidade de massa.

Entretanto, a utilização de sódio tem dois problemas adicionais. Ele reage fortemente com a água, em uma reação exotérmica. Além disso, a reação produz hidróxido de sódio, uma base forte. O cálcio também reage com a água, mas com intensidade bem menor e o composto resultante (cal hidratada), embora cáustico, não é tão agressivo quanto o do sódio. Esses dois elementos também reagem com o oxigênio do ar (assim como o alumínio e o cobre). Entretanto, nos casos do cálcio, alumínio e cobre, o óxido resultante protege o metal que está abaixo dele.

Pelas razões expostas, a utilização do cálcio metálico é uma possibilidade na condução de energia elétrica. Além disso, o uso de cálcio permite que o mesmo seja incorporado no ciclo do cálcio, que existe em mananciais naturais, é concentrado (ou seja, tem sua entropia reduzida) pela atividade de seres vivos, principalmente animais. Isto significa que, após o uso, o cálcio pode ser descartado para ser disperso nos sistemas naturais, com a utilização dos serviços da natureza. Além disso, ele existe localmente em praticamente todas as regiões, atendendo o princípio da máxima utilização de recursos locais.

A produção de cálcio metálico pode ser feita por via eletrolítica, que consome grande quantidade de energia, ou pelo processo desenvolvido por Lukasko e Murphy (1990), conhecido como aluminotérmico, que reduz significativamente a quantidade de energia necessária e tem como produto cálcio com uma pureza de 99,5%. Cálcio metálico com pureza de 98,5 % pode ser encontrado no mercado mundial por valores tão baixos quanto US\$ 1,00/kg, mas os de melhor qualidade giram em torno de US\$ 2,00 a 4,00/kg, sendo a China o maior produtor mundial (MMTA, 2012).

Para evitar que o fio sofra uma oxidação acelerada e para impedir que a energia elétrica seja emitida pelas paredes laterais do fio, o mesmo deve ser isolado. A alternativa ideal

seria um composto orgânico apolar com alta resistividade. Bons candidatos incluem polímeros baseados no ácido ricinoleico, que apresenta grupo funcional OH, que podem ser ligados, formando poliuretanos hidrofóbicos e biodegradáveis.

A acumulação de energia elétrica também pode ser obtida através de duas soluções básicas. A primeira é a tecnologia humana, que utiliza íons diversos, sendo Lítio (Li^+) o mais popular pela capacidade de criar baterias de alta densidade (grande capacidade de acumulação) e bastante leves. Entretanto, o eletrodo positivo dessas baterias contém metais, tais como ferro, cobalto, manganês e titânio. A segunda é a solução utilizada por animais que acumulam energia elétrica. Dentre esses animais, a enguia é capaz de acumular energia elétrica suficiente para produzir uma corrente de até 600 volts com uma corrente de 1 ampere. A acumulação é realizada em células especiais chamadas eletrócitos. A figura 7 mostra os diversos níveis hierárquicos desta estrutura.

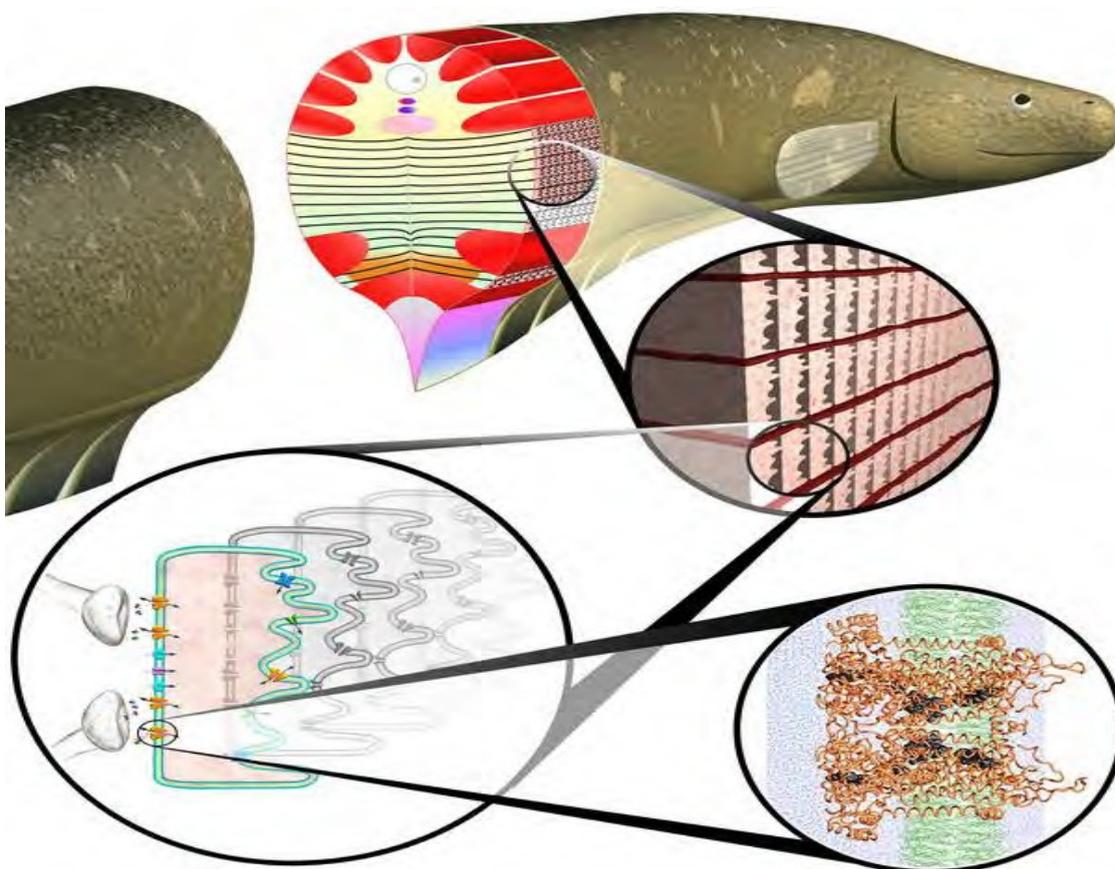


Figura 7: Estrutura multinível do sistema de acumulação de energia elétrica da enguia (ZUKOWSKI, 2008).

As duas grandes vantagens da estrutura da enguia são sua biodegradabilidade e a não utilização de metais que precisam ser extraídos de minas. Assim como no caso da

condução de eletricidade, a enguia utiliza somente íons. Neste caso, são utilizados íons de sódio.

Algumas pesquisas foram realizadas para o desenvolvimento de baterias biodegradáveis. Xu e Lavan (2008) demonstraram que é possível reproduzir a estrutura dos eletrólitos e aprimorar o seu desempenho. Outras pesquisas têm estudado as válvulas que bombeiam íons e prótons na membrana celular (WEN et al., 2012). Entretanto até agora estas pesquisas não resultaram em um produto comercial. Este tipo de solução atenderia os princípios de biodegradabilidade, banimento de metais, reciclagem, estrutura multinível, processo bottom up, desenho biologicamente inspirado, utilização de recursos locais, redundância, robustez e minimização de externalidades. Por isso, pesquisas de tecnologias com íons de metais alcalinos e alcalino terrosos possivelmente levarão a soluções com maior sustentabilidade do que as atuais tecnologias de acumulação de energia iônica.

4.3. SOLUÇÕES PARA USO DE ENERGIA QUÍMICA

A transformação da energia química em energia luminosa pode ser feita utilizando dois grandes grupos de substâncias: quimiluminescentes e bioluminescentes. O primeiro grupo é sintetizado pela indústria química para a produção de iluminação, enquanto o segundo é produzido por seres vivos para gerar luz visível. A luz assim produzida é obtida com substâncias fluorescentes, ou seja, a luz emitida é resultado do decaimento orbital de um elétron que havia sido excitado pela reação química de oxidação.

A quimiluminescência pode ser obtida com diversas substâncias, sendo uma das mais comuns o difenil oxalato, que reage com peróxido de hidrogênio para iniciar uma série de reações. Estas reações produzem diversas cores, dependendo do corante presente e que reage com o peróxido cíclico resultante da reação inicial (figura 8). Uma possibilidade de uso desta solução seria a combinação de diversos corantes em microcélulas, de maneira a obter uma cor homogênea mais próxima da luz clara. Entretanto, essas reações deveriam ser reversíveis para que as mesmas substâncias pudessem ser utilizadas e recicladas dentro do sistema.

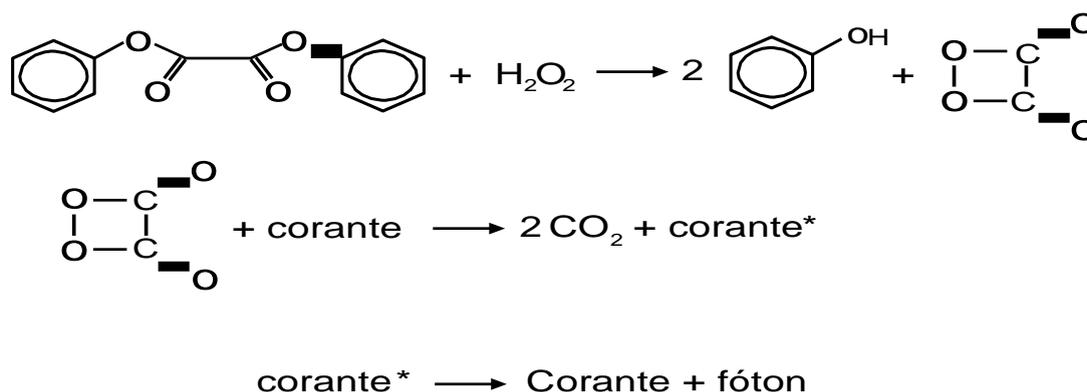


Figura 8: Sequência de reações químicas para a geração de luz.

A bioluminescência é produzida por diversos animais utilizando diversos grupos de proteínas. As reações são normalmente de oxidação e são reversíveis. A luz emitida pelo decaimento do elétron tem uma cor característica. Aqui, novamente, uma combinação de diversas substâncias deveria ser desenvolvida para que a luz emitida se aproximasse do padrão existente nas edificações. Uma classe dessas substâncias são as luciferinas, proteínas que são oxidadas na presença de enzimas chamadas luciferases. A outra classe importante dessas substâncias são as fotoproteínas. A utilização de bioluminescência atenderia os princípios do desenho biologicamente inspirado, da reciclagem e da minimização de externalidades.

As duas grandes vantagens da energia química seriam a versatilidade de aplicação e a possibilidade de acumulação de energia. O líquido contendo a substância básica a sofrer reação de oxidação poderia ser bombeado para qualquer superfície onde a reação então ocorreria. As substâncias a reagir poderiam ser acumuladas separadamente.

4.4. SELEÇÃO DA SOLUÇÃO MAIS ADEQUADA

A partir das tecnologias descritas, foram considerados dois cenários. No primeiro, somente foram selecionadas tecnologias disponíveis comercialmente, ou que podem ser rapidamente adaptadas para o uso projetado. No segundo, foram selecionadas tecnologias que podem não estar disponíveis, mas cujo desenvolvimento permitiria a utilização dos princípios de sustentabilidade de maneira mais completa.

Para a seleção da solução mais adequada, foi necessário desenvolver critérios de avaliação. Abaixo são listados os critérios utilizados. Os critérios a) e b) são aplicáveis apenas no primeiro cenário. O critério c) é aplicável nos dois cenários.

Critério a) Nível de amadurecimento tecnológico da solução. Dentre as diversas soluções apresentadas, algumas têm soluções tecnológicas mais amadurecidas, enquanto outras, embora bastante interessantes sob vários aspectos, estão ainda incipientes no seu desenvolvimento ou não existem. O critério privilegia as tecnologias maduras e que estejam no mercado.

Critério b) Custo. A implementação da solução não pode ser inviabilizada pelo seu alto custo. Por isso, este critério foi utilizado quando a diferença de custo de duas alternativas tornou proibitiva a adoção de uma delas.

Critério c) Potencial para aplicação dos princípios de sustentabilidade. Embora na etapa de descrição das alternativas tecnológicas já tenha havido uma preocupação em buscar soluções que não conflitassem diretamente com alguns princípios, tais como a não utilização de metais, principalmente metais pesados, este critério passa a considerar o potencial de aplicação de todos os princípios.

5. PRIMEIRO CENÁRIO: TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS

5.1. ABSORÇÃO DE ENERGIA SOLAR

A absorção dessa energia tem quatro finalidades distintas: condução de energia luminosa visível para áreas internas adjacentes ao ponto de captação; condução de energia luminosa visível para áreas distantes do ponto de captação; transformação de radiação infravermelho em energia elétrica; transformação de radiação ultravioleta em energia de excitação de elétrons.

A absorção para áreas adjacentes ao ponto de absorção pelo sistema pode ser realizada através de janelas convencionais, com a utilização de filmes transparentes para a transformação de energia do espectro infravermelho em energia elétrica. Esta tecnologia é descrita mais abaixo.

Na absorção da radiação solar para utilização em áreas distantes do ponto de absorção, o sistema deve ser capaz de concentrar a luz, porque ela será conduzida em tubos ou fibras de pequeno diâmetro. A concentração de luz da radiação direta é relativamente simples. A luz difusa apresenta diferentes características e sua concentração é mais problemática.

No caso da luz direta, também é interessante a utilização de um aparato que permita a utilização separada das diversas frequências de radiação. Para essa utilização separada, a absorção deve permitir que elas sejam conduzidas por diferentes circuitos, necessitando, portanto serem separadas logo após a absorção. Isto é feito através de dois mecanismos distintos. Primeiro, a radiação no infravermelho é absorvida por um filme fotovoltaico orgânico que gera energia elétrica (figura 9) e cujo desenvolvimento está sendo realizado em diversos centros de pesquisa (DOU, 2012). Segundo, a separação da radiação ultravioleta é realizada através de prismas ópticos. O prisma óptico proposto é uma combinação de um prisma triangular utilizando material transparente, tendo uma face utilizando um prisma composto, do tipo Fresnel, mas com ângulo de saída constante, para o desvio dos raios ultravioleta. Após os prismas, a luz é conduzida por canais separados através de espelhos.

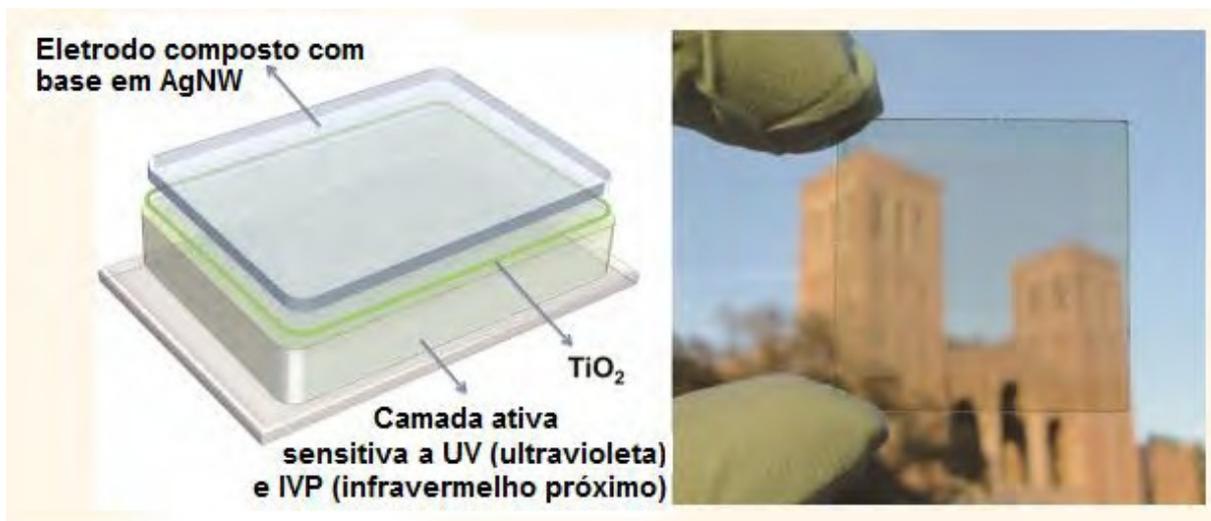


Figura 9: Estrutura e amostra de filme transparente de célula fotovoltaica (CHEN et al, 2012).

O sistema descrito requer ângulos precisos de incidência de luz para que a separação das diferentes frequências ocorra com eficiência. Isto significa que o sistema é ativo, ou seja, adaptável à direção dos raios solares. Sistemas ativos são mais caros que os sistemas passivos, mas apresentam um desempenho melhor (HANSEN, 2006). Neste caso específico, o sistema consistiria de placas contendo um determinado número de prismas. Estas placas rotariam sobre dois eixos para manter sempre um ângulo definido em relação aos raios que estão sendo absorvidos. A movimentação das placas exige que após os espelhos, a luz seja conduzida através de fibras ópticas flexíveis antes de ser conduzida por tubos de luz.

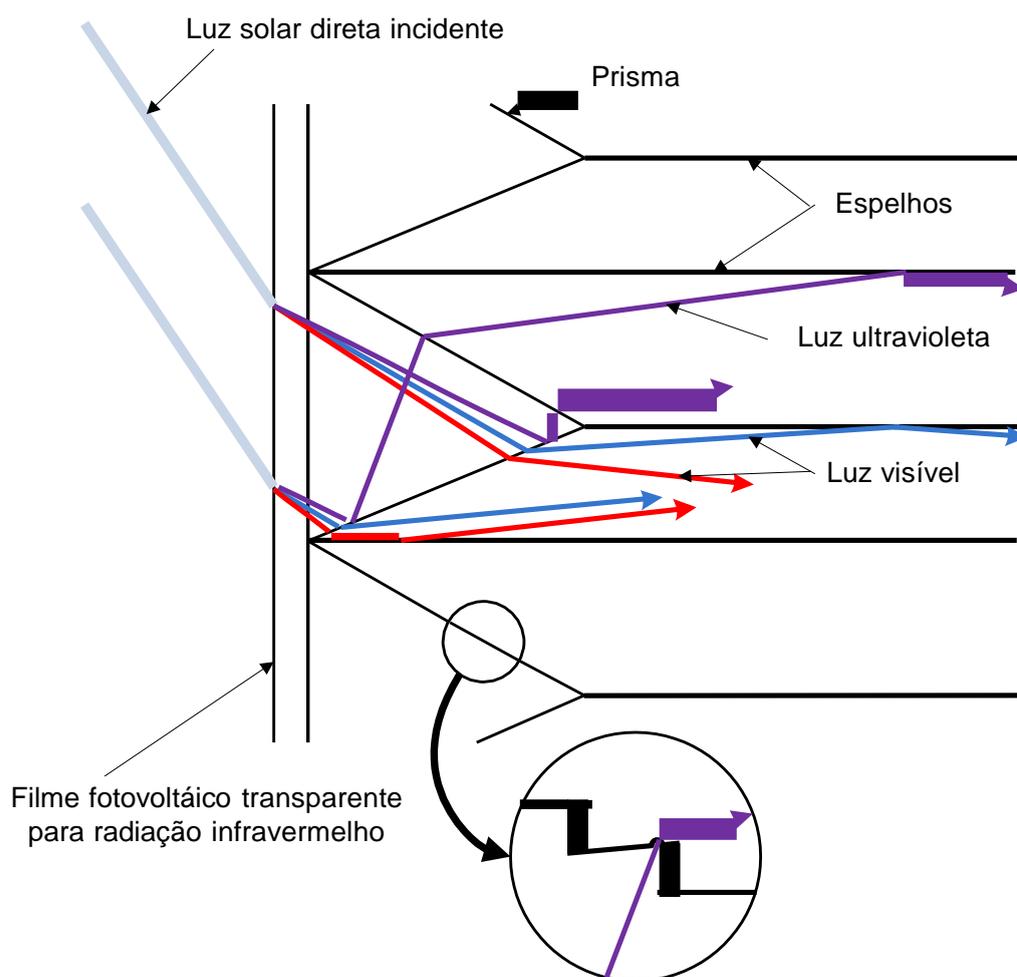


Figura 10: Separação das diversas radiações do espectro solar.

Evidentemente, a separação do espectro nas diversas bandas é bastante eficiente para a luz direta, mas pouco eficiente para luz difusa. A condução da luz difusa necessita de um mecanismo concentrador, porque sua intensidade é muito menor que aquela da luz direta (aproximadamente 15%). Além disso, a luz não está orientada, isto é, sua entropia é muito maior e o número de reflexões dentro do condutor reduz drasticamente a eficiência do sistema. Existe, portanto, um limite termodinâmico para a possibilidade de concentração desta luz (CHAVES, 2008) e sua condução, definido pela fórmula

$$C = 1/\sin^2 Q$$

Onde:

C = máxima concentração

Q = metade do ângulo de incidência

Para que a concentração de luz difusa pode ser obtida, o conceito a ser utilizado é de pontos virtuais no espaço, por onde passa a luz a ser concentrada. A partir deste ponto virtual, a luz está orientada. Ela passa, então, através de um aparato concentrador. Este aparato pode ser um conjunto de lentes Fresnel, que direcionam os raios solares e focam em uma pequena área, de onde a luz pode ser adequadamente conduzida. Entretanto, a solução mais utilizada é um concentrador parabólico composto (BOKOR, 2001). Este conceito está representado na figura 11.

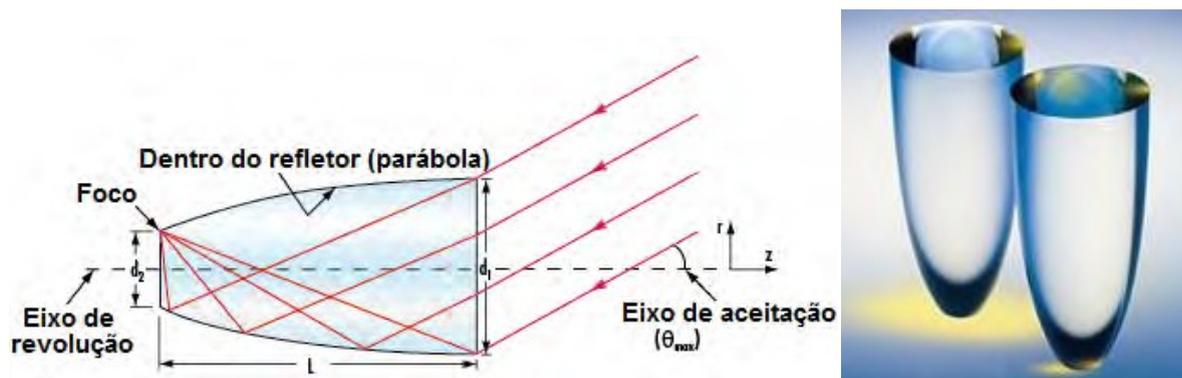


Figura 11: Concentrador parabólico composto: esquerda – corte; direita: produto comercial (EDMUND OPTICS, 2012).

5.2. CONDUÇÃO DE ENERGIA SOLAR

A energia absorvida pelo sistema é conduzida por diferentes meios, dependendo de sua origem (direta ou difusa) e de sua frequência (visível ou UV).

A luz direta na frequência visível é conduzida através de tubos de luz, uma das opções apresentadas em 7.1.4.1., caracterizados por sua superfície interna reflexiva. A luz se desloca através do tubo com reflexões especulares ao longo da sua trajetória. Entretanto, a condução através de tubos com superfície refletora interna sempre apresenta perdas, porque a reflexão sempre é parcial. Uma parte da energia é absorvida pela parede do tubo. Por isso, o número de vezes que a luz reflete nas paredes deve ser o mínimo possível. Para isso, a situação ideal é a energia estar em feixes paralelos entre si e com o eixo do tubo. Nas mudanças de direção, ao invés de uma curva, um espelho a 45° é indicado.

Esses tubos normalmente são comercializados em diâmetros que variam de 200 mm a 400 mm (HANSEN, 2006). Entretanto, estes diâmetros causam dois problemas: consomem espaço valioso da edificação, já que não podem ser embutidos na parede; e consomem muito material em sua fabricação. A utilização de tubos de menor diâmetro implica a necessidade de concentração da luz em algum ponto após a absorção. A luz direta, mesmo

depois de passar por prismas para separar a luz UV, pode ser concentrada através de lentes e depois reorientada em direções que estejam próximas do eixo do tubo. Com isto, os tubos podem ser reduzidos para diâmetros bem menores. Tubos de diâmetro entre 50 mm e 100 mm poderiam cumprir esta função e serem embutidos nas paredes ou nos forros da edificação. Além disso, esses tubos podem ser confeccionados com polímeros biodegradáveis, reforçados com fibras vegetais tratadas. As fibras de linho apresentam uma resistência bastante alta, entre 500 e 900 MPa, com um módulo de elasticidade entre 50 e 70 GPa e uma densidade de 1,4 a 1,5 g/cm³ (SPARNINS, 2006).

A luz ultravioleta pode ser concentrada da mesma maneira que a luz visível. Depois, ela é conduzida para o interior da edificação para ser convertida em energia de excitação de elétrons ou (opcionalmente) em energia elétrica.

A redução do diâmetro dos tubos atende o princípio da desmaterialização. A utilização de um polímero biodegradável reforçado com fibra de vidro atende os princípios de biodegradabilidade e de estrutura multinível.

A luz difusa (visível e UV, que neste caso não foram separadas) pode ser conduzida por tubos de luz de diâmetros maiores (entre 100 e 120 mm), porque a colimação de seus raios é praticamente impossível. Além disso, na saída do concentrador deve ser colocado um trecho de tubo com material fotovoltaico, de maneira que os raios de maior ângulo de saída não percorram toda a extensão do tubo, o que acarretaria uma perda de eficiência muito grande. Após este trecho, o tubo seguiria com o material reflexivo (figura 12).

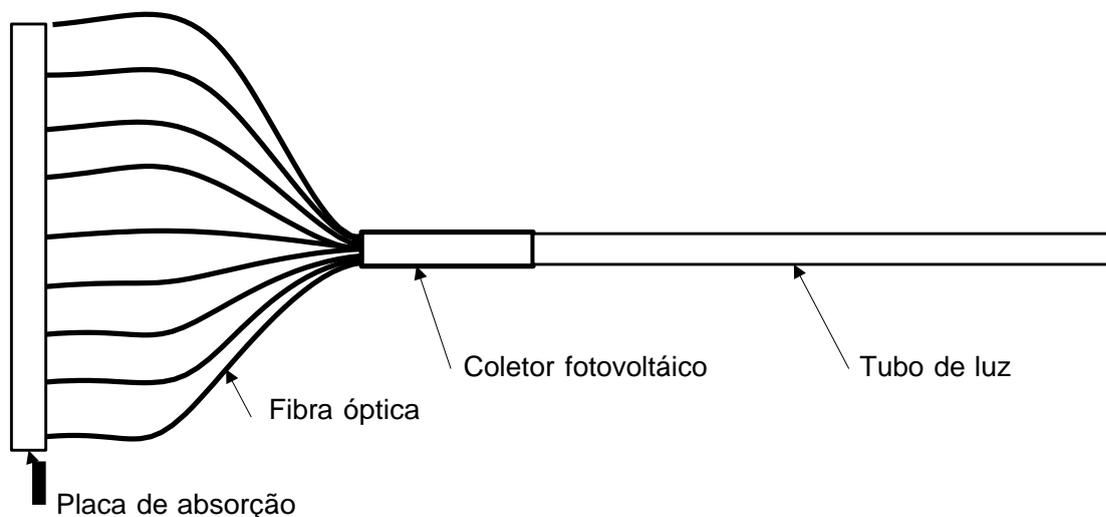


Figura 12: Sistema de absorção e condução de energia luminosa.

5.3. EMISSÃO DE ENERGIA SOLAR VISÍVEL

Em situações normais, a emissão de energia solar visível deve ser a mais homogênea possível em uma área interna da edificação. Nesses casos, a energia que é conduzida por tubos de luz deve ser refletida em uma superfície difusora. Essa superfície pode ser refletora ou pode ser a superfície de saída de um feixe de luz que foi conduzido através do corpo a que esta superfície se encontra anexada. Em qualquer dos casos existe perda, seja por absorção, seja por reflexão. Entretanto, superfícies refletoras apresentam a vantagem de poderem estar fixadas diretamente no forro ou laje, por isso deve ser a solução preferida. Em alguns casos, há interesse em concentrar a luz (iluminação de área de leitura, análise, ou para destacar um objeto como uma obra de arte). Nesses casos, a saída do tubo de luz pode ser direta ou pode ser colocada uma película levemente translúcida para aumentar a dispersão.

5.4. EMISSÃO DE ENERGIA SOLAR ULTRAVIOLETA

A energia ultravioleta tem maior intensidade que a energia da luz visível. Isto propicia o uso desta energia para a utilização de substâncias fluorescentes, algumas delas chamadas de branqueadores ópticos. Essas substâncias absorvem a luz ultravioleta e emitem luz no espectro visível. O artefato para esta transformação consistiria essencialmente de uma superfície onde a substância estaria depositada. Sobre esta superfície incidiria a luz ultravioleta, excitando os elétrons da substância luminescente. No decaimento orbital, os elétrons emitiriam luz na banda visível.

Esta energia também pode ser transformada em energia de excitação de elétrons em substâncias fosforescentes. Neste caso, existem duas possibilidades. Na primeira, a substância fosforescente está dispersa em um líquido e pode circular em uma tubulação que leva esta substância até o ponto de absorção da energia ultravioleta. Neste caso, a emissão desta energia ultravioleta ocorre sem que ela seja conduzida por um percurso longo, com perdas. No segundo caso, a substância fosforescente está fixada em um sólido de grande superfície e a energia ultravioleta é conduzida até ela. A vantagem dessa alternativa é a eliminação da bomba para o deslocamento do líquido. A vantagem do sistema bombeado é a possibilidade de ter ou não iluminação em uma área da edificação, bastando para isto bombear o líquido com a substância para dentro ou para fora do circuito. Como estas operações energéticas são opcionais, não serão analisadas em maior profundidade.

5.5. EMISSÃO DE ENERGIA SOLAR INFRAVERMELHA

A energia no espectro infravermelho não possui fótons com energia suficiente para excitar elétrons de maneira que possam reemitir luz no espectro visível. Por isso, essa forma de energia foi utilizada para a produção de energia elétrica, não precisando ser conduzida para depois ser emitida longe do ponto de absorção. Ao contrário, para minimizar a perda na condução, o aparato de absorção e transformação em energia elétrica foi integrado ao aparato de absorção da energia solar, sendo a primeira operação energética que ocorre depois da absorção.

5.6. ABSORÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A absorção de energia elétrica de fora do sistema será feita através de alimentação da grade de fornecimento da rede pública. Esta energia somente será utilizada quando a energia solar que for absorvida pelo sistema não for suficiente. A intensidade da luz solar depende da exposição da superfície terrestre em determinado local, a qual varia em função dos movimentos de rotação e translação do globo terrestre, além do grau de transparência do ar e da intensidade da atividade solar. Desconsiderando os dias nublados, a radiação solar direta sobre a superfície terrestre varia de acordo com a hora do dia e o dia do ano, como pode ser visto na figura 13, onde são mostradas as intensidades médias diárias (24 horas, em watts) para todas as latitudes durante o ano. A intensidade da luz solar difusa é, evidentemente menor que a direta e depende de uma série de outros fatores, tais como as camadas de nuvens que bloqueiam a radiação solar.

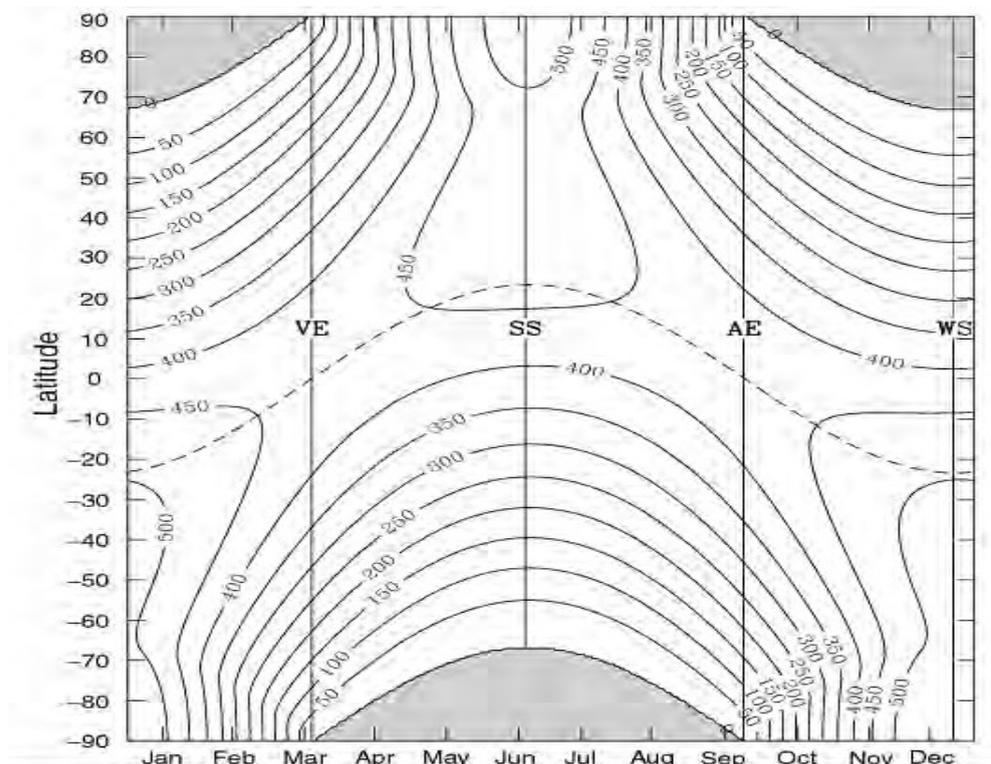


Figura 13: Incidência de radiação solar sobre a superfície da terra (LIOU, 2002).

A imensa maioria da população humana se encontra em latitudes menores do que 50°. Isto significa que o mínimo de radiação média em um dia de sol em qualquer local é de algo em torno de 90 w nos dias de menor incidência. A média anual nessa latitude gira em torno de 300 w. Considerando que o consumo médio de energia luminosa no interior das edificações gira em torno de 100 lux, equivalente a $1,1 \text{ watt/m}^2$, e considerando ainda uma eficiência de conversão de 5%, para cada m^2 de piso da edificação seriam necessários em média $0,14 \text{ m}^2$ de captação de energia solar, caso o consumo fosse contínuo. Como o consumo é geralmente intermitente, e considerando um fator de ineficiência de 2, seriam necessários $0,28$ ou aproximadamente $0,3 \text{ m}^2$, caso toda a energia luminosa fosse suprida desta maneira. Mas uma parte considerável da energia luminosa é absorvida diretamente através de janelas, o que significa que seriam necessários menos de $0,1 \text{ m}^2$ de superfície de absorção por metro de piso de edificação. Estas estimativas são muito grosseiras, mas dão a ordem de grandeza da área necessária para a absorção de energia luminosa e mostram que um sistema que absorva a energia solar para atender a função lumínica de uma edificação é perfeitamente viável, mesmo em edificações de vários andares. Portanto, a necessidade de absorção de energia elétrica da rede pública é extremamente baixa se o sistema for bem dimensionado.

5.7. CONDUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A condução de energia elétrica do sistema lumínico será feita através de um sistema de condutores de cobre, visto que estão disponíveis no mercado. A condução também utilizará diversos componentes elétricos e eletrônicos para a interrupção, direcionamento e intensidade da energia elétrica. Assim, sensores de um sistema de monitoramento podem definir qual a necessidade de complementação de energia luminosa solar por energia luminosa artificial em cada área da edificação. Estes sensores enviarão de forma autônoma a ordem para a condução de determinada intensidade de energia elétrica para o sistema de iluminação artificial construído com LEDs.

5.8. ACUMULAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A energia elétrica será acumulada em baterias de lítio, que tem maior densidade de acumulação. Isto atende o princípio de desmaterialização. A quantidade de baterias será definida em função da demanda e da capacidade de absorção de energia solar. O gráfico abaixo mostra uma situação de complementariedade entre duas formas de energia (figura 14). Evidentemente, as variáveis de captação direta de energia solar para uso e para acumulação são definidas em cada projeto ou sistema. Elas podem ser ampliadas, de maneira que a utilização de outra forma de energia fique reduzida a um mínimo ou a uma situação eventual. Nesse caso, o sistema teria mais de 100% de capacidade de uso. A capacidade ociosa, tendo custo, deveria ser cuidadosamente dosada, para não conflitar com o princípio de desmaterialização.

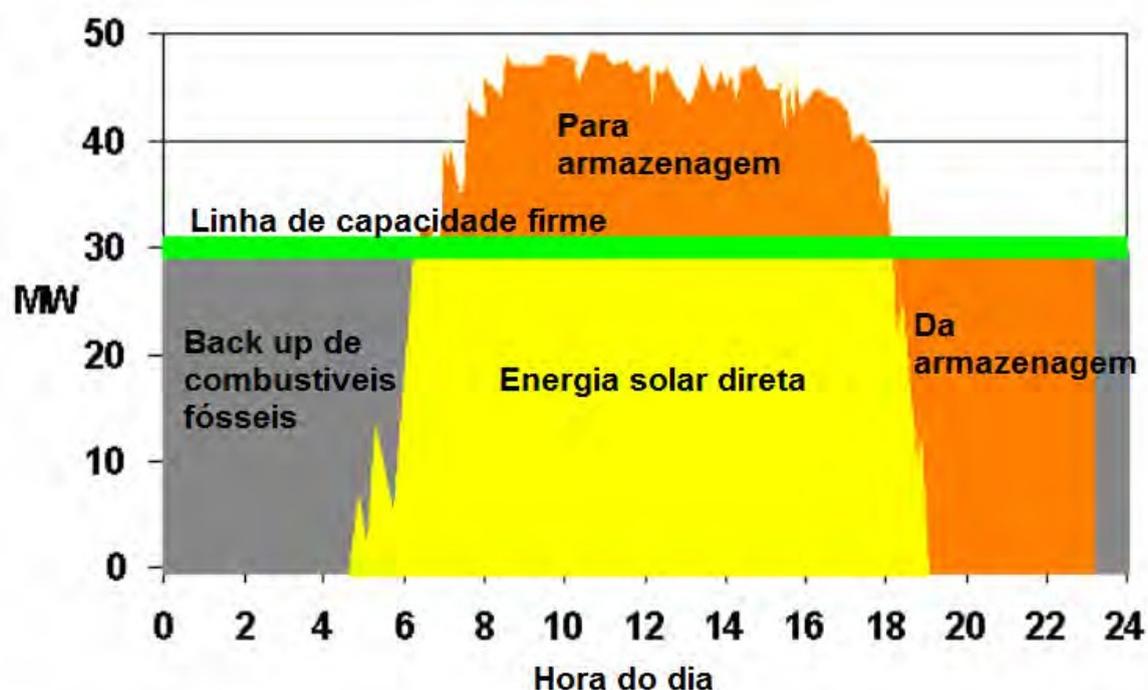


Figura 14: Complementariedade entre duas formas de energia (STINE; GEYER, 2001).

5.9. TRANSFORMAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM ENERGIA LUMINOSA

A transformação de energia elétrica em luminosa ocorrerá com a transformação intermediária em energia de excitação de elétrons em LEDs. O mecanismo específico de transformação deste tipo de diodo não é o mesmo de uma substância fluorescente ou fosforescente comum. Neste caso, existe um rearranjo de elétrons e lacunas, cujo efeito é a emissão de um fóton no espectro visível.

6. SEGUNDO CENÁRIO: TECNOLOGIAS NÃO DISPONÍVEIS

Neste segundo cenário, foi possível aproximar mais as soluções daquilo que seria esperado no novo paradigma e utilizar com maior intensidade os princípios de sustentabilidade. As tecnologias aqui propostas não foram testadas, portanto sua viabilidade não está garantida. Entretanto, o propósito do exercício é apenas demonstrar como seriam as características de tecnologias que seguissem o novo paradigma. Uma tecnologia em particular foi detalhada para demonstrar alguns princípios. Esta tecnologia refere-se à função de absorver a radiação difusa. As outras tecnologias são descritas de maneira mais genérica.

6.1. ABSORÇÃO DE CONDUÇÃO DE ENERGIA SOLAR

A absorção da energia solar segue o modelo utilizado no primeiro cenário, utilizando componentes diferentes para a absorção de luz direta e luz difusa. Em ambos os casos, serão utilizadas placas com um grande número de componentes. As placas que absorverão luz direta serão moveis e permanentemente orientadas para receber a luz em ângulo de 90o em relação ao plano da placa (figura 15). As placas que absorverão luz difusa serão fixas. As placas são compostas por um conjunto de lentes fresnell.

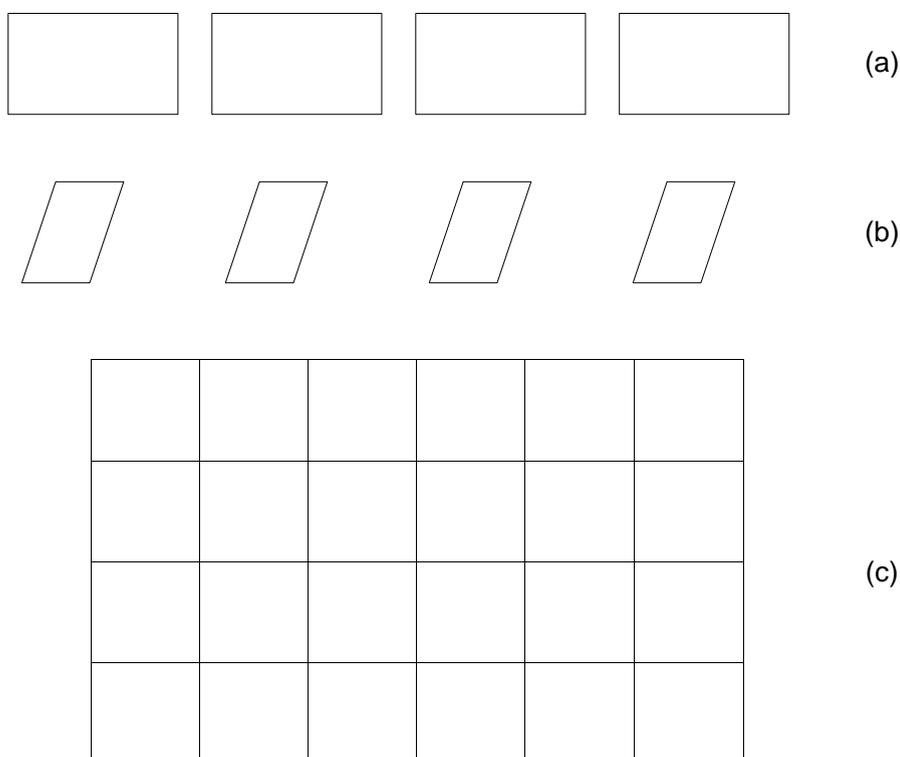


Figura 15: Placas para absorção de luz direta: (a) na posição vertical; (b) inclinadas nos dois eixos; (c) uma placa formada por um conjunto de lentes fresnel.

A luz direta pode ser absorvida através de um sistema de concentradores revestidos com duas lâminas (filmes) de material fotovoltaico, constituídas de polímeros orgânicos, biodegradáveis em condições específicas de temperatura, umidade e luz. As lâminas são montadas em camadas sucessivas em processo bottom up. A primeira lâmina absorve a luz infravermelha próxima (IVP), enquanto a segunda absorve a luz ultravioleta (UV). A energia absorvida por estas camadas é convertida em energia elétrica. (figura 16).

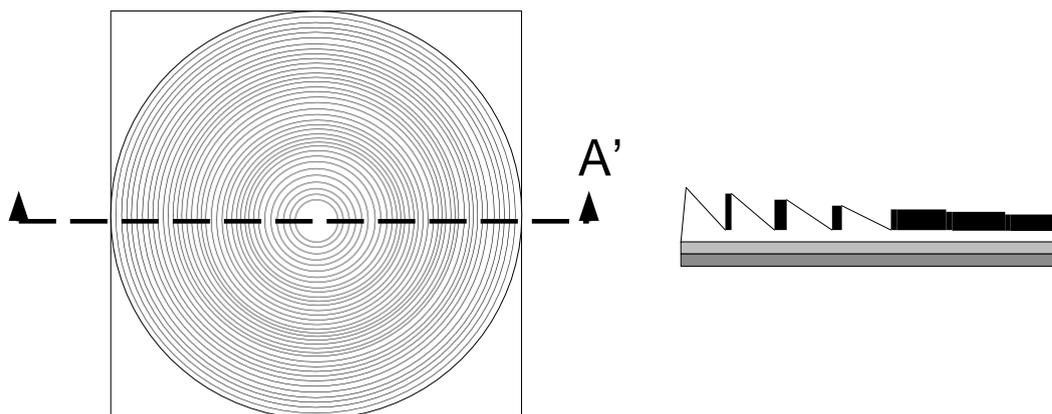


Figura 16: Uma lente fresnel e detalhe da seção A - A' com as duas lâminas para absorção de luz IVP e UV.

Estes concentradores são produzidos em sílica amorfa depositada em camadas sucessivas (layer-by-layer), intercaladas com camadas de um polímero biodegradável. O polímero tem a função de estimular a deposição da sílica, que se depositará a partir dos íons de silício e oxigênio dissolvidos em solução aquosa. A deposição se dá por processo de automontagem.

Este processo de deposição é semelhante ao utilizado por várias espécies de esponjas (MÜLLER, 2006), dentre elas as da espécie *Monorhaphis Chuni* para a produção de espículas gigantes. Algumas dessas espécies de esponjas utilizam suas espículas como fibras ópticas (WANG, 2011), conforme figura 17, para trazer luz para o seu interior, onde outros organismos vivem (BRÜMMER, 2008).

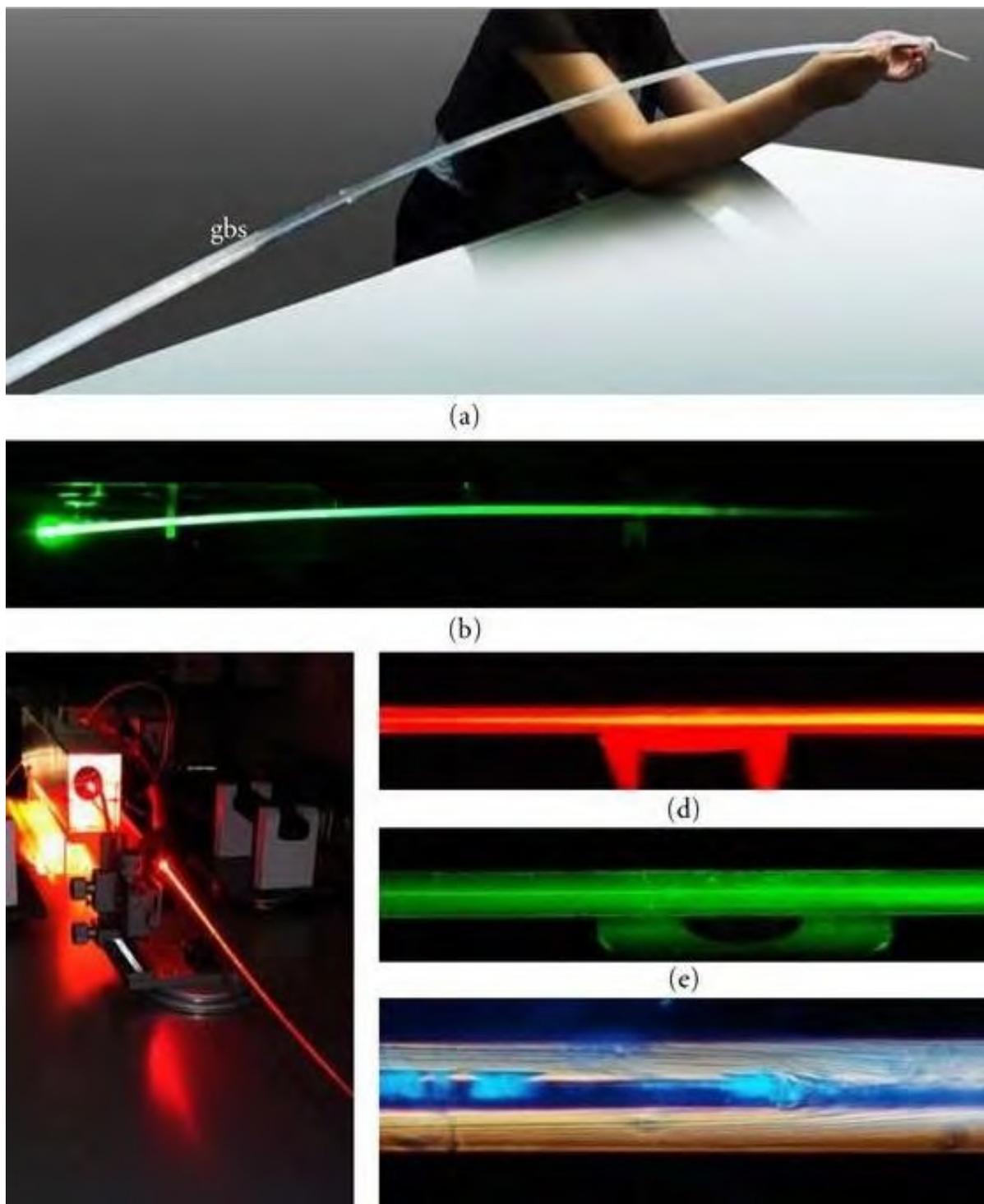


Figura 17: Espícula gigante de *Monorhaphis Chuni* sendo testada com feixes de diferentes frequências de ondas luminosas (MULLER,2006).

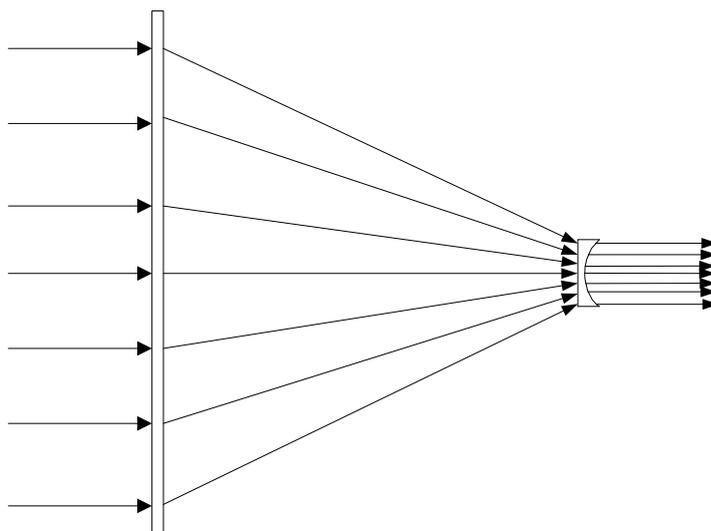


Figura 18: Após passar pelas lentes fresnel, a luz é convergida para um ponto onde é colimada.

O feixe de luz colimada muda de direção conforme as placas se posicionam perpendicularmente aos raios solares incidentes. Para que o feixe de luz possa então ser direcionado para um ponto fixo, a luz colimada é refletida em um espelho côncavo, em um ponto focal. A função do espelho côncavo é compensar a mudança de direção da luz colimada, visto que as placas são móveis sobre dois eixos. A curva do espelho é tal que a luz refletida por ele tem como ponto focal outro espelho, agora plano. A luz refletida neste segundo espelho segue para o tubo de luz. A configuração geral do elemento de absorção de luz direta é apresentada esquematicamente na figura 19.

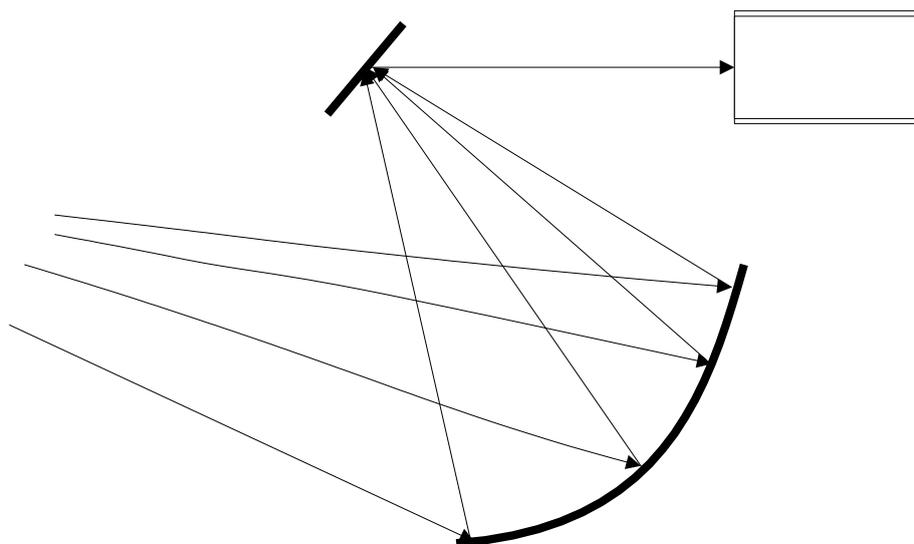


Figura 19: Convergência de diversos feixes de luz colimada, através de espelho côncavo.

Os espelhos são constituídos por lamina de guanina, um aminoácido (portanto biodegradável) que forma cristais em camadas sucessivas. Esta estrutura reflexiva é encontrada em algumas espécies de peixes e é responsável por seu reflexo prateado (JORDAN et al., 2012a). Devido à sua propriedade reflexiva não-polarizante, estas estruturas inspiraram pesquisa para o desenvolvimento de um espelho biomimético (JORDAN et al., 2012b).

A luz difusa é absorvida por um elemento produzido por processo *bottom up*. Este elemento será descrito em maior detalhe para demonstrar a aplicação dos conceitos de heterogeneidade, anisotropia, variação formal, estrutura multinível, precisão e especificidade da solução. Estes conceitos são característicos do novo paradigma e sua aplicação na solução demonstra como é possível viabilizar produtos sem a utilização do conceito de material. A descrição do elemento inicia-se nos níveis mais básicos e segue em níveis de complexidade crescente.

O primeiro nível de complexidade é o nível molecular dos monômeros. O segundo nível molecular é dos polímeros. Portanto, as substâncias constituintes dos componentes que absorvem a luz solar são polímeros orgânicos biodegradáveis. Além desses, a guanina é utilizada para a reflexão da luz, conforme já descrito para a reflexão da luz direta. São utilizados dois polímeros orgânicos transparentes à luz visível. Um desses polímeros apresenta um alto índice de refração (LI et al., 2010), enquanto o segundo apresenta um índice bastante baixo, próximo de 1,2 ou menor (ANDO, 2006). A composição do componente em cada ponto pode ser alterada variando a proporção entre os dois polímeros. Isto é feito para permitir uma variação no seu índice de refração. Os polímeros e a guanina são depositados *layer-by-layer* a partir de uma solução. Sua deposição é feita através de um sistema de impressão 3D e a organização dos polímeros ocorre por automontagem. O componente básico é um tronco de cone cilíndrico, com densidade e índice de refração variáveis, revestido lateralmente por diversas camadas de guanina, o que permite a reflexão da luz (figura 20).

A escolha desta forma é função da reflexão da luz incidente, que é forçada a percorrer uma trajetória específica. Isto é obtido combinando a forma do tronco de cone com a sua refração. O índice de refração do tronco de cone é maior perto da borda. Além disso, o índice de refração progressivamente menor no núcleo (mínimo no centro) forma um cone, com a ponta próxima da face superior do tronco de cone. Isto permite que a luz absorvida pelo tronco de cone tenha uma trajetória direcionada para a base do tronco de cone. Em uma situação ideal, o índice de refração no centro do cone seria igual a 1, de modo que a luz não sofresse qualquer desvio quando saísse do tronco de cone pela base. Entretanto,

polímeros com índice tão baixo talvez não sejam encontrados. As dimensões do tronco de cone são: diâmetro = 15 mm no topo e 10 mm na base, comprimento = 1000 mm (a figura está fora de escala). Isto significa que a luz, vinda de qualquer ângulo que não seja perpendicular à face superior do tronco de cone, fará a trajetória descrita em (b). Caso a luz incida perpendicularmente à face, ela será refletida pela incapacidade de penetrar no material menos denso e fará a trajetória mostrada em (c).

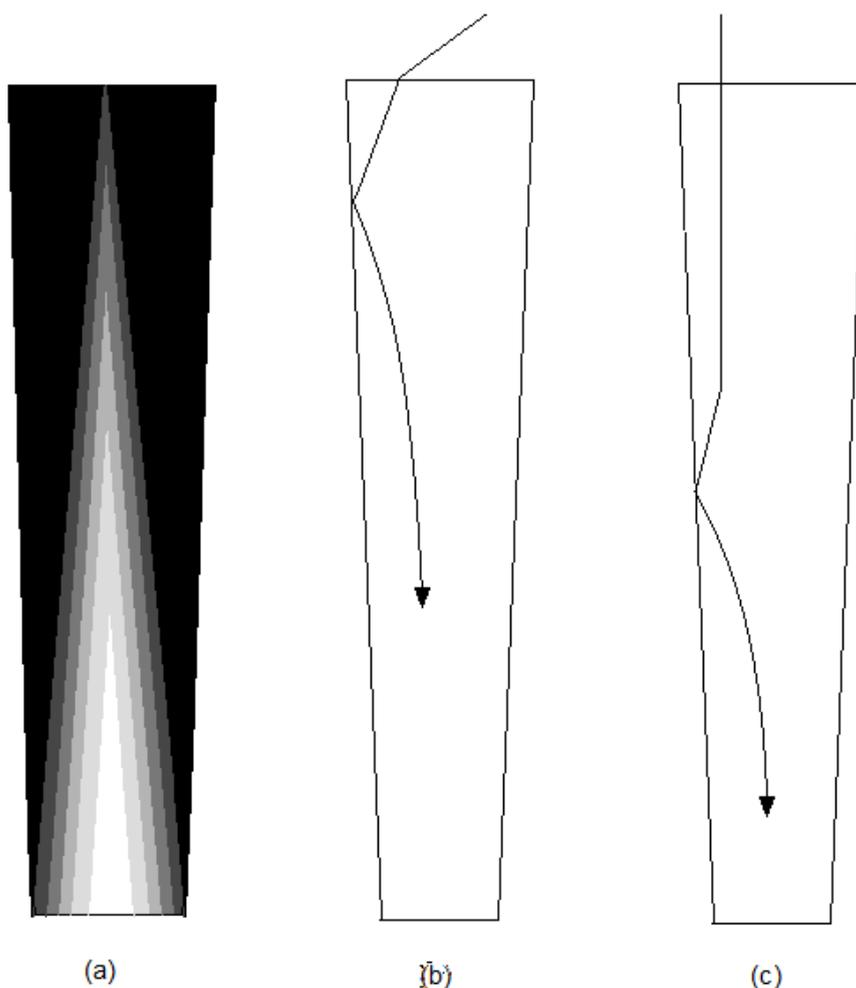


Figura 20: Tronco de cone de absorção de luz difusa: (a) seção longitudinal do tronco de cone, com as cores representando o índice de refração (quanto mais escura, maior o índice); (b) trajetória do feixe de luz quando reflete diretamente na parede lateral; (c) trajetória do feixe de luz quando é primeiramente refletido no cone central e depois é refletido na parede lateral.

O componente apresentado é o primeiro nível (mais básico) acima do nível molecular. Ele é heterogêneo, anisotrópico, apresenta variação formal e precisão micrométrica. Evidentemente, estas características não são obrigatórias. Entretanto, se manifestam naturalmente, uma vez que não haja imposição das características dos materiais vistas no capítulo 3. Além dessas características, o tronco de cone tem dimensões microscópicas.

Esta escala contempla o princípio de desmaterialização. Ou seja, se um componente pode ser produzido em uma escala microscópica, não existe razão para o uso de mais material em uma escala maior. Além disso, o elemento final (as placas de absorção de luz) terão peso reduzido, reduzindo também o peso de suas estruturas de apoio e da própria edificação.

Os troncos de cone são organizados em estruturas hexagonais, com as faces superiores formando um plano curvo, conforme mostrado na figura 68. Cada plaqueta tem, na face superior, uma dimensão lateral de aproximadamente $15 \text{ (cones)} \times 15 \text{ mm} \times \sqrt{3} / 2 = 194 \text{ mm}$, que pode ser arredondado para 0,2 mm.

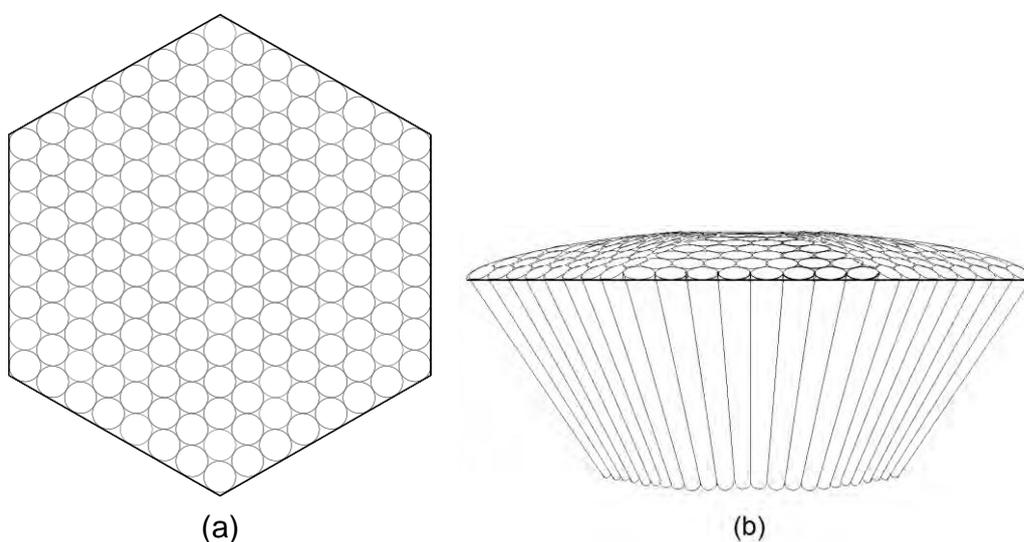


Figura 21: Estruturas hexagonais formadas por conjuntos de cones de captura de luz difusa.

Cada uma dessas estruturas hexagonais é chamada de plaqueta concentradora e sua função é concentrar a luz difusa incidente sobre ela para um ponto focal abaixo da sua borda inferior (figura 22). Um espelho côncavo intercepta a trajetória da luz e a reflete, mais concentrada, em direção a um outro espelho, convexo. Este conjunto de espelhos permite colimar o feixe de luz. Este feixe passa por um orifício no centro do espelho côncavo. Os espelhos são feitos de guanina, em camadas sucessivas (ao redor de 30 camadas (JORDAN et al., 2012a).

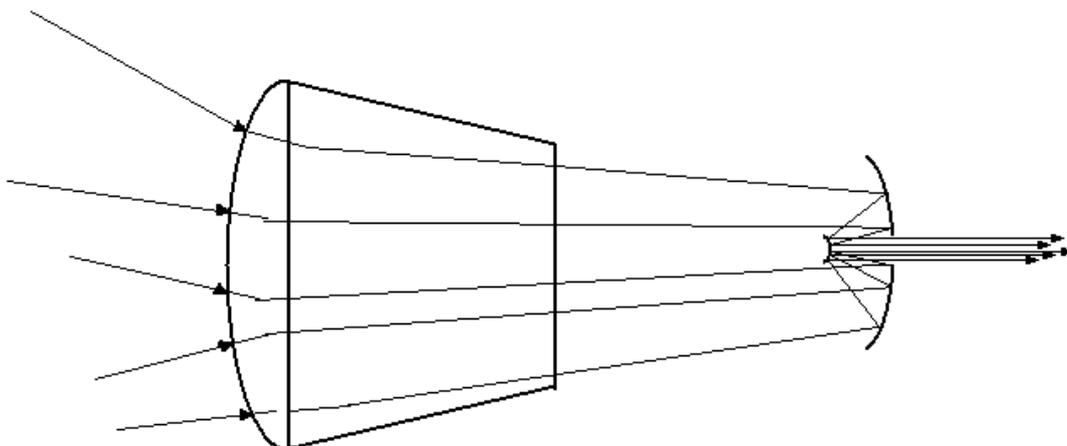


Figura 22: Esquema do trajeto da luz incidente sobre cada estrutura hexagonal até sua colimação.

As plaquetas hexagonais são aglutinadas em plaquetas retangulares, cada uma contendo 2592 plaquetas hexagonais. As dimensões das plaquetas retangulares são de aproximadamente 7,2 mm x 12,5 mm (figura 23).

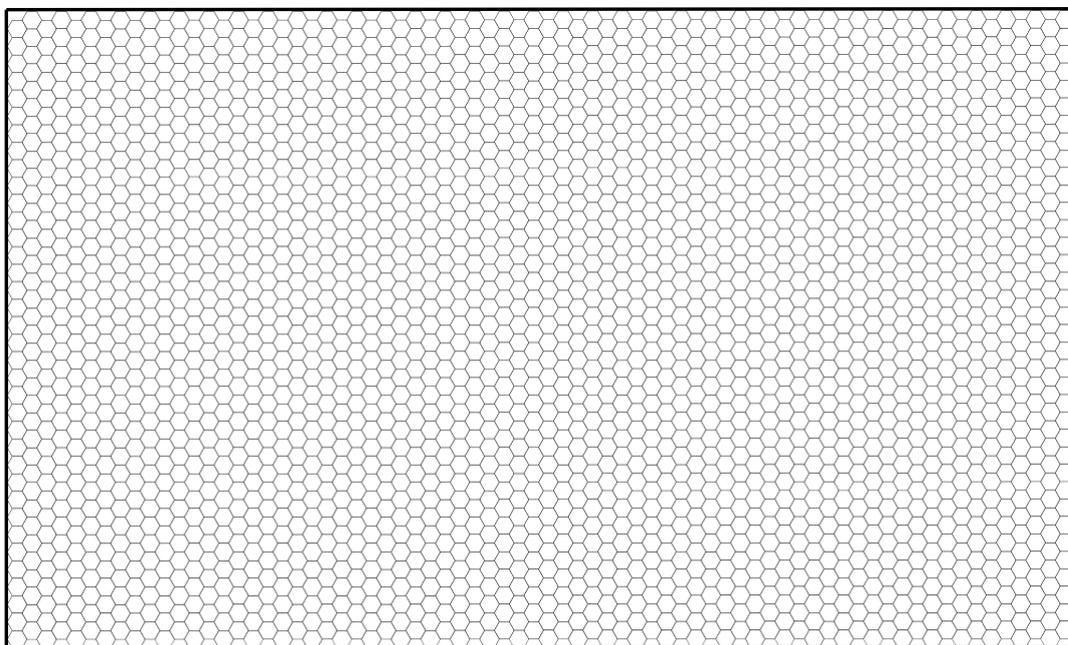


Figura 23: Vista superior de uma plaqueta retangular.

As plaquetas retangulares também são dotadas de um aparato concentrador de luz. Este aparato consiste em dois espelhos, um côncavo e um convexo, com funções idênticas àquelas descritas para cada plaqueta hexagonal individual. A figura 24 apresenta um esquema com o aparato concentrador de luz.

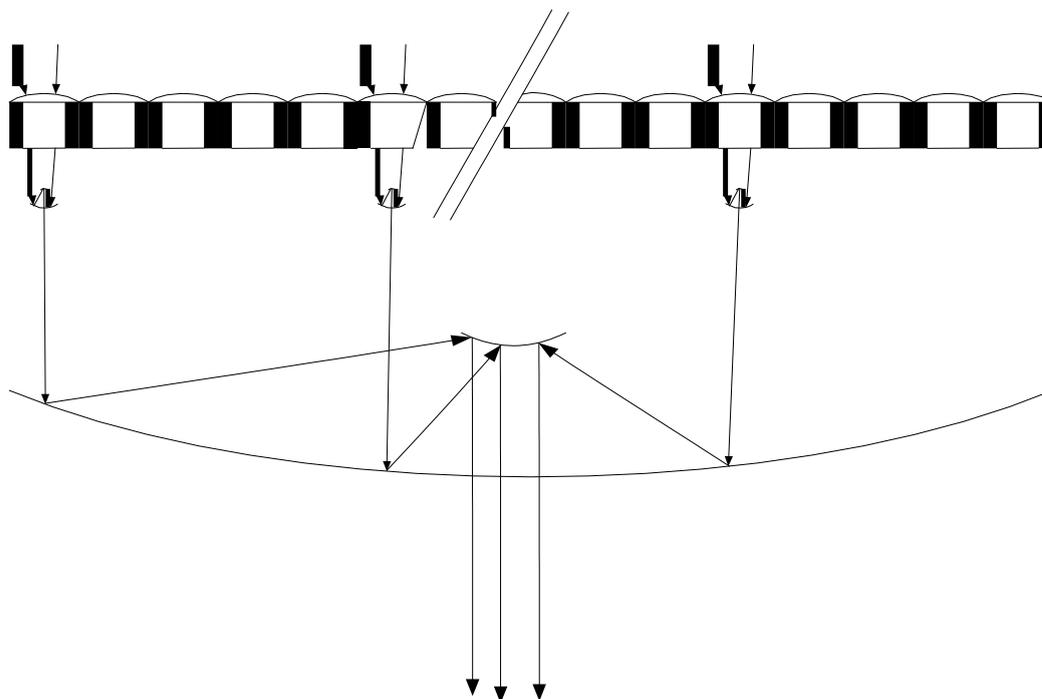


Figura 24: Condução da luz difusa através das plaquetas quadradas.

Finalmente, as plaquetas retangulares são organizadas em placas retangulares de 1000 mm de lado x 504 mm de altura. Cada placa retangular é composta de 5600 plaquetas retangulares. O esquema de concentração de luz da placa retangular é similar aos utilizados para as plaquetas hexagonais e retangulares.

O elemento de captação de luz difusa apresenta sete níveis de complexidade: (1) monômeros, (2) polímeros, (3) troncos de cone, (4) plaquetas hexagonais, (5) plaquetas retangulares, (6) placas retangulares e (7) conjunto de placas retangulares. Portanto, ele atende o princípio de estruturas multinível.

Aqui não poderão ser atendidos os princípios de customização e personalização, mas é fácil antever que tais princípios podem ser atendidos sem dificuldade, devido aos processos de fabricação e à flexibilidade dimensional da estrutura multinível.

As placas de captação de luz difusa são fixas. Por isso, é interessante intercalá-las com as placas de luz direta, móveis. Isto permite um maior espaçamento entre as placas de luz direta, aumentando o ângulo de luz que pode incidir sobre estas placas, sem que uma faça sombra sobre a outra.

A luz difusa é conduzida por tubos de luz, de maneira semelhante ao já descrito para a luz direta.

6.2. EMISSÃO DE ENERGIA SOLAR

A emissão de energia solar ocorre nos pontos da edificação onde são identificadas deficiências de iluminação direta. A energia solar conduzida pelos tubos de luz é projetada sobre painéis que dispersam a luz e, ao mesmo tempo, podem acomodar componentes de iluminação através de energia elétrica ou química. Uma nova tecnologia, cuja pesquisa avança em vários centros de pesquisa, é o conceito OLED. Seu princípio é semelhante ao do LED, mas utiliza polímeros orgânicos para a emissão de fótons. No caso da luz difusa, caso ela seja emitida por componentes distintos dos utilizados para luz direta, seria interessante pigmentar o componente de dispersão da luz com substâncias fluorescentes, para converter a luz ultravioleta, que não foi separada, em luz visível.

6.3. OUTRAS OPERAÇÕES ENERGÉTICAS

Seria possível descrever outras operações energéticas utilizando os mesmos princípios e configurando estruturas multinível com as características apresentadas nas soluções já descritas, especialmente para a luz difusa. Em particular, é interessante visitar conceitos de acumulação de energia elétrica (na verdade acumulada como energia de ionização), de transmissão de energia elétrica e de acumulação de energia química que pode ser convertida em energia luminosa. Em todos estes casos, a aplicação do princípio de design biologicamente inspirado é fundamental. As pesquisas neste campo já estão ocorrendo e o avanço de soluções que são, ao mesmo tempo, mais eficientes e menos agressivas ao meio ambiente ocorre de maneira acelerada.