

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

**PROPOSTA DE MÉTODO PARA INTEGRAÇÃO DA  
SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS E VISUALIZAÇÃO  
BIM 4D NO PROJETO DO SISTEMA DE PRODUÇÃO**

**Raquel Hoffmann Reck**

Porto Alegre  
2013

RAQUEL HOFFMANN RECK

**PROPOSTA DE MÉTODO PARA INTEGRAÇÃO DA  
SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS E VISUALIZAÇÃO  
BIM 4D NO PROJETO DO SISTEMA DE PRODUÇÃO**

Dissertação 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 Mestre em  
Engenharia.

Porto Alegre  
2013

RAQUEL HOFFMANN RECK

**PROPOSTA DE MÉTODO PARA INTEGRAÇÃO DA  
SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS E VISUALIZAÇÃO  
BIM 4D NO PROJETO DO SISTEMA DE PRODUÇÃO**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE 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, 12 de novembro de 2013

Prof. Carlos Torres Formoso  
Ph.D. pela Universidade de Salford / UK  
orientador

Prof. Eduardo Luís Isatto  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande  
do Sul / BR  
co-orientador

Prof. Armando Miguel Awruch, Dr.  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Fábio Kellermann Schramm (UFPel)**  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Prof. Sergio Scheer (UFPR)**  
Dr. pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

**Prof. Thais Alves (UFRGS)**  
PhD. pela University of California, Berkeley /USA

Dedico este trabalho a meus pais, Adão e Arlete, que sempre me inspiraram a querer mais e nunca desistir.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Prof. Carlos Torres Formoso, orientador deste trabalho, pela atenção e dedicação, mas principalmente por acreditar nesse trabalho e apoiar a sua realização.

Agradeço ao Prof. Eduardo Luis Isatto, co-orientador deste trabalho, pela dedicação a este trabalho, mas principalmente por acreditar nele, mesmo quando eu já havia desistido.

Agradeço a todos os colegas do NORIE, por fornecer todo o suporte para a realização desta pesquisa.

Agradeço à minha turma de mestrado, por ter tornado essa passagem muito mais divertida e amigável.

Agradeço aos integrantes do GEC, pelas infindáveis discussões de conceitos e várias rodadas de chimarrão.

Agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pelo ensino de qualidade oferecido.

Agradeço a todas as construtoras, que permitiram que este trabalho se realizasse.

Só sabemos com exatidão quando sabemos pouco; à medida que vamos adquirindo conhecimentos, instala-se a dúvida.

Johann Wolfgang von Goethe

## RESUMO

RECK, R. H. Método para integração da simulação de eventos discretos e modelagem 4D no projeto do sistema de produção de empreendimentos habitacionais de interesse social. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Considerando o grande volume de obras, a necessidade de gerenciar inúmeras equipes, prazos reduzidos, alta repetitividade e a pequena margem de lucro de empreendimentos habitacionais de interesse social, tem crescido a importância projetar e simular os sistemas de produção de forma antecipada. A simulação de eventos discretos tem sido empregada como ferramenta de gestão para a análise de cenários alternativos em empreendimentos de construção, principalmente em trabalhos de cunho acadêmico. Entretanto, seu emprego tende a ser pouco explorado no projeto do sistema de produção de empreendimentos reais, principalmente devido à dificuldade de interpretação dos dados e da pouca experiência dos tomadores de decisão com essa ferramenta. Por esse motivo, a literatura tem recomendado o uso de ferramentas que auxiliem, de forma visual e espacial, a compreensão dos resultados. O objetivo desta pesquisa é propor um método para a elaboração do projeto do sistema de produção utilizando a modelagem BIM-4D e simulação de eventos discretos de forma integrada, na tomada de decisão de empreendimento habitacionais de interesse social. Foi escolhida a abordagem metodológica da *design science research* para a realização da pesquisa, a qual consiste na criação de um artefato, a ser utilizado para resolver classes de problemas, seguida da avaliação da sua utilidade. Este método foi desenvolvido através de três estudos empíricos nos quais o mesmo foi concebido e aplicado. Entre as principais contribuições deste trabalho, destaca-se uma proposta de integração entre a simulação de eventos discretos e modelagem BIM-4D no projeto do sistema de produção de empreendimentos habitacionais de interesse social, e uma discussão do papel de ferramentas gráficas como auxílio na tomada de decisão.

Palavras-chave: simulação de eventos discretos, modelagem 4D, BIM, projeto do sistema de produção.

## **ABSTRACT**

RECK, R. H. Método para integração da simulação de eventos discretos e modelagem 4D no projeto do sistema de produção de empreendimentos habitacionais de interesse social. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Considering the large scale of work, the need to manage a large number of teams, tight deadlines, highly repetitive operations, and limited profit margin of low-income housing projects, the need to design and simulate production systems in advance has increased. Discrete event simulation has been used as a management tool for the analysis of alternative scenarios in construction projects, mostly in academic studies. However, the use of simulation has not been fully explored in the design of the production system in real projects, mainly due to the difficulty of interpreting data, as well as the lack of experience of decision makers in using this tool. Therefore, the use of visual and spatial tools that support the interpretation of simulation data has been suggested in the literature. The aim of this research work is to propose a method for production system design using BIM-4D modeling and discrete event simulation in an integrated way for supporting decision making in low-income housing projects. The methodological approach adopted in this investigation was design science research, which consists of the creation of an artifact for solving classes of problems, and the evaluation of its utility. This method was developed along three empirical studies in which it was conceived and applied. The main contributions of this research work are concerned with a proposal for the integration of discrete event simulation and BIM-4D modeling in the production system design of low-income housing projects, and a discussion on the use of graphical tools to support decision-making.

**Keywords:** discrete event simulation, 4D modeling, BIM, production system design.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: sistema de produção adaptado de Meredith e Shafer (2002) .....	29
Figura 2: sistema de produção adaptado de Jacobsen <i>et al.</i> (2002).....	30
Figura 3: modelo geral de gestão da produção, adaptado de Slack, Chambers e Johnston (2007).....	34
Figura 4: exemplo de linha de balanço, elaborado pela autora deste trabalho .....	46
Figura 5: PSP para habitação de interesse social (SCHRAMM, 2004).....	48
Figura 6: modelo de PSP para empreendimentos complexos (RODRIGUES, 2006).....	54
Figura 7: tipos de sistemas adaptado de Law e Kelton (2000).....	56
Figura 8: processos de modelagem 4D, adaptado de EASTMAN <i>et al.</i> (2011).....	62
Figura 9: etapas da simulação adaptado de Law e Kelton (1991).....	68
Figura 10: modelo de PSP com a simulação como apoio a tomada de decisão (SCHRAMM, 2009).....	77
Figura 11: método do uso da modelagem BIM 4D na gestão da produção (BIOTTO, 2012) .	82
Figura 12: desdobramento do método nos níveis hierárquicos da gestão da produção (BIOTTO, 2012) .....	82
Figura 13: elementos centrais da <i>design science research</i> , adaptado de Lukka (2003).....	85
Figura 14: delineamento da pesquisa .....	87
Figura 15: ambiente de trabalho do ARENA .....	89
Figura 16: módulo de processamento (SCHRAMM, 2009).....	90
Figura 18: implantação e perspectiva da fachada do empreendimento L1.....	94
Figura 19: implantação e perspectiva da fachada do empreendimento S1 .....	96
Figura 20: implantação dos empreendimentos que compõem o EE3.....	99
Figura 21: planta baixa do empreendimento N0 .....	100
Figura 22: planta baixa e implantação do empreendimento N1 .....	100
Figura 23: planta baixa e implantação do empreendimento N2 .....	101
Figura 24: detalhes do sistema construtivo das casas do EE3.....	102
Figura 25: modelo de simulação apresentando as planilhas de entrada e saída de dados e as sequencias de execução de cada edifício .....	111
Figura 26: modelo 3D e BIM do EE1.....	112
Figura 27: caminhada estruturada do EE1.....	113
Figura 28: animação interna do modelo de SED no EE1 .....	113
Figura 29: partes do relatório de simulação doEE1.....	114
Figura 30: tratamento dos dados de saída do Arena com auxílio de funções da uma planilha eletrônica.....	115
Figura 31: utilização do VBA para tratamento dos dados de saída do Arena.....	116

Figura 32: ambiente de trabalho do ProjectWise Navigator V8i: (a) o arquivo de datas de início e fim na extensão .xml; (b) o arquivo em BIM da unidade base na extensão .dgn; e (c) o arquivo de nomes dos elementos na extensão .csv .....	117
Figura 33: etapas de modelagem do EE1 .....	118
Figura 34: modelos BIM do EE2.....	120
Figura 35: comparação entre cenários de contrapiso, a linha preta destaca os fluxos da atividade de contrapiso e da atividade seguinte.....	121
Figura 36: unidade de produção da fachada .....	122
Figura 37: comparação entre cenários de fachada com base na Linha de Balanço.....	122
Figura 38: reorganização dos recursos .....	123
Figura 39: ambiente de trabalho do Synchro, as abas mostram: (a) o arquivo de datas de início pela vinculação entre células; (b) o arquivo em BIM do empreendimento importado em IFC; e (c) a classificação dos elementos IFC, importados junto com o modelo BIM .....	124
Figura 40: modelo 4D do cenário B da fachada .....	125
Figura 41: etapas de modelagem do EE2 .....	127
Figura 42: método inicial de integração durante o PSP da SED e 4D .....	128
Figura 43: série de dados do percentual de pacotes de concluídos do empreendimento N0..	130
Figura 44: causas do não cumprimento dos planos acumulado do empreendimento N0.....	130
Figura 45: gráficos de aderência ao plano do empreendimento N0 .....	131
Figura 46: sequência de execução das unidades habitacionais nos empreendimentos do EE3 .....	132
Figura 47: variabilidade das durações das atividades no empreendimento N0.....	132
Figura 48: fotos dos estoques no canteiro .....	133
Figura 49: índice de boas práticas de planejamento do empreendimento N0, baseado em (RECK, 2010) .....	133
Figura 50: planilha inicial de dimensionamento dos recursos com a indicação das durações, dimensionamento das equipes e lotes de produção .....	136
Figura 51: modelo da unidade base em BIM do EE3.....	137
Figura 52: criação da propriedade <i>Identity Data</i> .....	138
Figura 53: entrada e saída de dados do modelo de simulação para a validação da modelagem da unidade base.....	139
Figura 54: validação da unidade base através do 4D e gráfico de histograma.....	140
Figura 55: durações executadas das atividades de dados históricos.....	141
Figura 56: simulação realizada com as durações do banco de dados.....	141
Figura 57: planilha final de dimensionamento dos recursos com a indicação das durações iniciais e finais utilizadas no modelo de SED .....	142

Figura 58: modelo de simulação apresentando o sequenciamento das atividades e os módulos utilizados: (a) modelo do N1 de acordo com as quadras; (b) modelo do N2 de acordo com frentes de trabalho.....	143
Figura 59: planilha eletrônica de visualização dos resultados da simulação no EE3.....	144
Figura 60: modelo 4D do empreendimento N1, as abas mostram: (a) o arquivo de datas de início; (b) o arquivo em BIM do empreendimento; e (c) a classificação dos elementos IFC, com a propriedade <i>Identity Data</i> .....	145
Figura 61: cenário 1 e 2 do empreendimento N1 .....	146
Figura 62: comparação de estoque de produto inacabado entre equipes de <i>radier</i> e parede .	147
Figura 63: comparativo de tempo de espera entre cenários 1 e 2.....	148
Figura 64: linhas de balanço dos cenários 1 e 2 .....	149
Figura 65: disposição das frentes de <i>radier</i> e paredes do cenário 3 .....	150
Figura 66: gráfico que apresentam a quebra de continuidade da equipe 2 de parede do cenário 3 .....	151
Figura 67: disposição das frentes de <i>radier</i> e paredes do cenário 4.....	151
Figura 68: histograma e sequenciamento das atividades de <i>radier</i> e parede do cenário 4.....	152
Figura 69: modelagem 4D do cenário 4 .....	152
Figura 70: localização dos estoques no cenário 4 .....	153
Figura 71: cenário 1 e 2 do empreendimento N2 .....	153
Figura 73: cenários 3 do empreendimento N2.....	155
Figura 74: tempo de espera - cenário 3B do empreendimento N2 .....	156
Figura 75: disposição final do cenário 3 do empreendimento N2.....	156
Figura 76: etapas de modelagem do EE3 .....	159
Figura 77: proposta final de método de modelagem e projeto do sistema de produção.....	161
Figura 78: etapas de modelagem de sistemas de produção .....	163
Figura 79: número de cenários simulados e solicitações por novos cenários .....	166
Figura 80: gráfico dos tempos de modelagem.....	167

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: resumo das decisões, ferramentas e participantes do PSP para HIS (SCHRAMM, 2004).....	50
Quadro 2: estágios de implementação do PSP com simulação (SCHRAMM, 2009).....	79
Quadro 3: avaliação dos <i>software</i> de SED (SCHRAMM; 2009).....	89
Quadro 4: avaliação dos <i>software</i> de modelagem BIM.....	91
Quadro 5: <i>softwares</i> de modelagem 4D .....	92
Quadro 6: descrição dos materiais/técnicas construtivas do empreendimento L1 .....	93
Quadro 7: resumo das atividades desenvolvidas no EE1 .....	95
Quadro 8: descrição dos materiais/técnicas construtivas do empreendimento S1 .....	97
Quadro 9: resumo das atividades desenvolvidas no EE2 .....	98
Quadro 10: descrição dos materiais e técnicas construtivas dos empreendimentos N0,N1 e N2 .....	101
Quadro 11: resumo das atividades desenvolvidas no empreendimento N0 .....	103
Quadro 12: resumo do processo de modelagem dos empreendimentos N1 e N2 .....	104
Quadro 13: resumo das atividades desenvolvidas nos empreendimento N1.....	105
Quadro 14: resumo das atividades desenvolvidas nos empreendimento N2.....	106
Quadro 15: constructo utilidade e facilidade de uso.....	107
Quadro 16: resumo dos tipos de entrevistas realizadas em cada estudo .....	107
Quadro 17: durações das atividades de modelagem por etapa no EE2 .....	126
Quadro 18: esforço despendido na elaboração do PSP nos empreendimentos N1 e N2.....	134
Quadro 19: durações da modelagem SED, BIM e 4D por etapa no EE3 .....	159
Quadro 20: resumo das decisões, ferramentas e participantes da Modelagem e Projeto do Sistema de Produção.....	165

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: comparação dos resultados dos cenários 1 e 2 .....	146
Tabela 2: comparação dos resultados dos cenários 1 e 2 e variações.....	149
Tabela 3: comparação dos resultados dos cenários 3 e 4 .....	152
Tabela 4: comparação dos resultados dos cenários 1 e 2 do empreendimento N2.....	154
Tabela 5: resultado do cenários 3 por formas.....	155
Tabela 6: resultado do cenário 3 do empreendimento N2.....	157

## LISTA DE ABREVIATURAS

BIM: *Building Information Modeling*

CPM: *Critical Path Method* (Método do Caminho Crítico)

FINEP: Financiadora de Estudos e Projetos

GEC: Grupo de Gerenciamento e Economia da Construção

IFC: *Industry Foundation Class*

IGLC: *International Group for Lean Construction*

LOB: *Line of Balance* (Linha de Balanço)

LPDS: *Lean Project Delivey System* (sistema de entrega de projetos enxutos)

MFV: Mapa de Fluxo de Valor

NORIE: Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação

PBQP-H: Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade no Habitat

PCP: Planejamento e Controle da Produção

PPC: Percentual de Pacotes Concluídos

PPGEC: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

PERT: *Program Evaluation and Review Technique* (Técnica de Avaliação e Revisão de Programa)

PSP: Projeto do Sistema de Produção

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

SED: Simulação de Eventos Discretos

SIAQ: Sistema de Avaliação da Conformidade de Empresas de Serviços e Obras

TIC-HIS: Tecnologia da Informação e Comunicação em Habitação de Interesse Social

TFV: Transformação Fluxo Valor

WBS: *Work Breakdown Structure* (Estrutura de Desdobra do Trabalho)

WSC: *Winter Simulation Conference*

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>19</b>
1.1 CONTEXTO DA PESQUISA	19
1.2 FILOSOFIA DA PRODUÇÃO ENXUTA	22
1.3 PROBLEMA DE PESQUISA	23
1.4 QUESTÕES DA PESQUISA	25
1.5 PROPOSIÇÕES	25
1.6 OBJETIVOS	26
1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO	26
<b>2. PROJETO DO SISTEMA DE PRODUÇÃO</b>	<b>28</b>
2.1 CONCEITO DE SISTEMA DE PRODUÇÃO	28
<b>2.1.1 Crítica à Visão Tradicional de Produção</b>	<b>31</b>
2.2 SISTEMA DE PRODUÇÃO POR PROJETO	32
2.3 PROJETO DE SISTEMA DE PRODUÇÃO NA MANUFATURA	34
<b>2.3.1 Nível de Integração Vertical</b>	<b>35</b>
<b>2.3.2 Capacidade Produtiva</b>	<b>37</b>
<b>2.3.3 Layout</b>	<b>37</b>
<b>2.3.4 Fluxos e Sincronia da Produção</b>	<b>38</b>
2.4 O PROJETO DO SISTEMA DE PRODUÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL	41
2.5 TRABALHOS QUE TRATAM DE DECISÕES DO ESCOPO DO PSP NA CONSTRUÇÃO CIVIL	42
<b>2.5.1 Projeto para a Produção</b>	<b>42</b>
<b>2.5.2 Phase Scheduling</b>	<b>42</b>
<b>2.5.3 Work structuring</b>	<b>45</b>
<b>2.5.4 Location-Based Scheduling (LBS)</b>	<b>46</b>
<b>2.5.5 Planejamento de Fluxo de Trabalho</b>	<b>47</b>
2.6 MODELOS PARA A ELABORAÇÃO DO PSP NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO	48
<b>2.6.1 PSP em empreendimentos Habitacionais de Interesse Social</b>	<b>48</b>
<b>2.6.2 PSP em Empreendimentos Complexos</b>	<b>51</b>
<b>3. MODELAGEM DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO</b>	<b>55</b>
3.1 TIPOS DE SISTEMAS	55
3.2 MODELO	56
3.3 MODELAGEM	57
3.4 BIM	58

3.5	MODELAGEM 4D	59
<b>3.5.1</b>	<b>Processo de modelagem 4D</b>	<b>61</b>
<b>3.5.2</b>	<b>Parâmetros de Modelagem 4D</b>	<b>62</b>
3.6	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	65
<b>3.6.1</b>	<b>Etapas da modelagem de simulação</b>	<b>68</b>
3.6.1.1	Formular o problema e planejar o estudo	68
3.6.1.2	Coletar dados e definir um modelo conceitual	69
3.6.1.3	Validar o modelo conceitual	70
3.6.1.4	Construção e verificação do programa computacional	70
3.6.1.5	Validação do modelo computacional	71
3.6.1.6	Projeto de experimentos	71
3.6.1.7	Realização da simulação e analisar das saídas do modelo	72
3.6.1.8	Documentação e apresentação dos resultados do estudo	72
<b>3.6.2</b>	<b>Sistemas de Modelagem Interativa Visual</b>	<b>72</b>
<b>3.6.3</b>	<b>Simulação na Construção Civil</b>	<b>74</b>
3.7	TRABALHOS QUE UTILIZARAM A MODELAGEM DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO SOB O ESCOPO DO PSP	76
<b>3.7.1</b>	<b>Projeto de Sistemas de Produção na Construção Civil Utilizando Simulação Computacional como Ferramenta de Apoio à Tomada de Decisão</b>	<b>76</b>
<b>3.7.2</b>	<b>Método de Gestão da Produção na Construção Civil com Uso da Modelagem BIM 4D</b>	<b>80</b>
<b>4.</b>	<b>MÉTODO DE PESQUISA</b>	<b>84</b>
4.1	ESTRATÉGIA DE PESQUISA	84
4.2	DELINEAMENTO DA PESQUISA	87
4.3	FASE EXPLORATÓRIA	88
<b>4.3.1</b>	<b>Seleção dos <i>softwares</i></b>	<b>88</b>
4.3.1.1	Simulação de Eventos Discretos	88
4.3.1.2	Modelagem BIM	90
4.3.1.3	Modelagem 4D	92
<b>4.3.2</b>	<b>Estudo Empírico 1</b>	<b>92</b>
4.3.2.1	Descrição da Empresa L	92
4.3.2.2	Descrição do Empreendimento L1	93
4.3.2.3	Descrição das Atividades Realizadas	94
<b>4.3.3</b>	<b>Estudo Empírico 2</b>	<b>95</b>
4.3.3.1	Descrição da Empresa S	95
4.3.3.2	Descrição do Empreendimento S1	96

4.3.3.3	Descrição das Atividades Realizadas	97
4.4	FASE DE DESENVOLVIMENTO	98
<b>4.4.1</b>	<b>Estudo Empírico 3</b>	<b>98</b>
4.4.1.1	Descrição da Empresa N	98
4.4.1.2	Descrição dos Empreendimentos	99
4.4.1.3	Descrição da Tecnologia Construtiva Utilizada na Execução das Paredes	101
4.4.1.4	Descrição das Atividades Realizadas	103
4.5	FASE DE CONSOLIDAÇÃO	106
4.6	FONTES DE EVIDÊNCIAS	107
<b>4.6.1</b>	<b>Entrevistas</b>	<b>107</b>
<b>4.6.2</b>	<b>Observação Participante</b>	<b>108</b>
<b>4.6.3</b>	<b>Observação Direta e Registro Fotográfico</b>	<b>108</b>
<b>4.6.4</b>	<b>Análise de documentos</b>	<b>109</b>
<b>5.</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA</b>	<b>110</b>
5.1	ESTUDO EMPÍRICO 1	110
<b>5.1.1</b>	<b>Considerações Finais sobre o Estudo Empírico 1</b>	<b>117</b>
5.2	ESTUDO EMPÍRICO 2	119
<b>5.2.1</b>	<b>Considerações Finais sobre o Estudo Empírico 2</b>	<b>125</b>
5.3	PROPOSTA INICIAL DE MÉTODO	128
5.4	ESTUDO EMPÍRICO 3	129
<b>5.4.1</b>	<b>Avaliação do Sistema de Produção</b>	<b>129</b>
<b>5.4.2</b>	<b>Processo de Elaboração do Projeto do Sistema de Produção</b>	<b>134</b>
5.4.2.1	Definição do sistema	135
5.4.2.2	Modelagem da Unidade Base	136
5.4.2.3	Estudo dos Fluxos de Trabalho	138
5.4.2.4	Modelagem dos Empreendimentos N1 e N2	142
5.4.2.5	Análise do Empreendimento N1	145
5.4.2.6	Análise do Empreendimento N2	153
<b>5.4.3</b>	<b>Considerações sobre o Estudo Empírico 3</b>	<b>157</b>
5.5	MÉTODO PARA MODELAGEM E PROJETO DO SISTEMA DE PRODUÇÃO	160
<b>5.5.1</b>	<b>Avaliação do Método Proposto</b>	<b>164</b>
5.5.1.1	Utilidade	164
5.5.1.2	Facilidade de Uso	166
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>168</b>

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	170
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>171</b>
<b>APÊNDICE A:ROTEIRO DE ENTREVISTA SEMI-ESTRUTURADA</b>	<b>178</b>

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTO DA PESQUISA

Vários programas de financiamento de habitações de interesse social vêm sendo implementados nos últimos anos, a partir de iniciativas e parcerias entre os governos federal, estaduais e municipais. Entre eles, o governo federal lançou o programa Minha Casa Minha Vida, o qual tem o objetivo de agir no segmento econômico da construção, atendendo às camadas de renda de até R\$5.000,00 (FERREIRA, 2012). Este programa encontra-se na segunda fase cuja meta é entregar 2 milhões de habitações até o final de 2014 (BRASIL, 2013).

Além do grande volume de obras, os empreendimentos habitacionais de interesse social (EHIS) têm características peculiares quando comparados a outros setores da construção civil. Estes empreendimentos são geralmente descritos como uma porção da indústria da construção que mais se assemelha ao setor da manufatura (BASHFORD *et al.*, 2003). Ou seja, o planejamento de EHIS é geralmente realizado considerando os recursos de mão de obra e equipamentos fluindo através de todo o empreendimento (YANG; IOANNOU, 2001). Neste contexto, o produto a ser construído é estacionário e as equipes movem-se de uma estação de trabalho para a outra realizando o trabalho que é pré-requisito para a próxima equipe (TOMMELEIN; RILEY; HOWELL, 1999). Além disso, EHIS são caracterizados pela repetição das atividades em cada zona ou unidade de trabalho e normalmente utilizam equipes especializadas para executar cada atividade.

Existem outras características peculiares a estes empreendimentos, tais como (SCHRAMM; COSTA; FORMOSO, 2006): (a) fixação de padrões construtivos e de qualidade mínimos pelo contratante; (b) prazos de execução relativamente curtos (10 a 12 meses); (c) número de unidades por empreendimento relativamente grande; e (d) valor pago pelas unidades fixadas em contrato pelo contratante, o que proporciona margens de lucro bastante reduzidas. Em geral, as empresas construtoras buscam reduzir custos de produção e de prazos de execução como forma de reduzir custos indiretos (SCHRAMM; COSTA; FORMOSO, 2006).

Considerando as peculiaridades de EHIS, estabelecer estratégias de produção possíveis de serem executadas de forma antecipada se torna importante para a viabilidade do negócio.

Segundo Askin e Goldberg (2002) para alcançar sucesso no projeto e operação de sistemas de produção, é necessário integrar toda a cadeia de suprimentos desde a aquisição de materiais até a entrega dos produtos aos clientes. Dessa forma, Hopp e Spearman (2000) afirmam que para projetar e controlar um sistema de produção é necessário utilizar a abordagem sistêmica, a qual apresenta as seguintes características:

- a) visão de sistemas, na qual o problema é visto no contexto de um sistema de subsistemas interagindo, focando em uma visão ampla, holística do problema, ao invés de uma perspectiva reducionista e restrita;
- b) análise de meios e fins, na qual o objetivo é sempre especificado primeiro e então alternativas são propostas e avaliadas em termos deste objetivo;
- c) geração criativa de alternativas, na qual o objetivo é estabelecido e busca-se gerar uma gama de alternativas para alcançá-lo da melhor forma possível;
- d) modelagem e otimização, para quantificar a comparação entre alternativas, dessa forma técnicas de modelagem possibilitam essa análise e a escolha daquela mais adequada;
- e) iteração, na qual em todas as análises de sistemas os objetivos, as alternativas e o modelo são revisados repetidamente, permitindo identificar e eliminar possíveis falhas.

Segundo a abordagem sistêmica, para qualquer sistema de produção existe a necessidade de pensar a sua estruturação, testando alternativas para a sua execução sempre considerando o sistema de forma holística. Dessa forma, o Projeto do Sistema de Produção (PSP) é a primeira fase a ser realizada para estruturar os processos e recursos para a execução de empreendimentos de construção (BALLARD *et al.*, 2001a, 2001b; KOSKELA; BALLARD, 2004). No processo de elaboração do PSP busca-se discutir e analisar diferentes alternativas de estruturação e organização dos processos e recursos produtivos que constituem o sistema de produção do empreendimento (SCHRAMM, 2009).

Segundo Koskela (2000), o projeto do sistema de produção representa a forma mais básica de mitigar a variabilidade inerente aos sistemas de produção. Já Robinson (2003) afirma que existe a necessidade de discutir a natureza dos sistemas de produção, considerando que os componentes do sistema afetam uns aos outros e é difícil prever os efeitos dessas interconexões, especialmente quando a variabilidade está presente. Portanto, o processo de construção deve ser percebido como um fenômeno complexo, dinâmico e não linear (WOOD; GIDADO, 2010),

existindo a necessidade de analisar tanto o efeito da variabilidade como da interconexão entre as variáveis do sistema de produção na tomada de decisão.

Existe um uso crescente de modelos de simulação para projetar novos sistemas de produção ou para melhorar o desempenho dos existentes (LAW; MCCOMAS, 1991). A simulação é uma técnica que usa computadores para imitar ou simular diversos tipos de operações ou processos do mundo real (LAW; KELTON, 2000). A mesma permite representar de forma explícita a variabilidade, interconectividade e complexidade que um sistema de produção está subordinado (ROBINSON, 2003). Para Law e Kelton (2000) o benefício mais importante do uso da simulação em um ambiente de manufatura é que esta permite a um gerente obter uma visão sistêmica do efeito que mudanças locais ocasionam no sistema de produção. Dessa forma, a simulação é uma importante ferramenta de análise para aqueles responsáveis por projetar e operar sistemas, além representar a variabilidade e interconectividade entre as variáveis de um sistema de produção.

Entretanto, segundo LI *et al.* (2009), o planejamento se torna uma tarefa difícil devido à necessidade de antecipar e visualizar prováveis eventos futuros. A aplicação de ferramentas tradicionais de gestão de empreendimentos (como as redes CPM-PERT, por exemplo) são considerados inapropriados para projetos complexos (MORRIS; HOUGH, 1987<sup>1</sup> *apud* BACCARINI, 1996), sendo que existe uma carência de ferramentas e técnicas adequadas para apoiar a tomada de decisão em empreendimentos da construção (GIDADO, 1996).

Neste contexto, Rodrigues (2006) e Schramm (2004, 2009) sugerem que os gerentes de empreendimentos da construção civil devem utilizar ferramentas de visualização para apoiar a tomada de decisão, incluindo planilhas de capacidade de recursos, linhas de balanço, e diagramas de precedência, entre outras. Contudo, tais ferramentas não permitem a visualização espacial do empreendimento, que pode apontar restrições físicas no canteiro de obra, entre outras informações úteis para apoiar a tomada de decisão. As dimensões espaciais podem ser visualizadas em modelos geométricos 3D do empreendimento que, junto com o planejamento da construção (dimensão temporal), tornam-se modelos 4D (EASTMAN *et al.*, 2011; RILEY, 2003). Kamat e Martinez (2002) afirmam que a modelagem 4D foca na visualização dos produtos da construção, ou seja, enquanto o tempo avança os componentes individuais da edificação são adicionados ao modelo visual na sua posição e forma final como definido pelo plano de execução do empreendimento. Portanto, também surge a necessidade de antecipar as

---

<sup>1</sup> Morris, P. W. G.; Hough, G. H. **The Anatomy of Major Projects**. Chichester: Wiley, 1987.

Método para integração da simulação de eventos discretos e modelagem 4D no projeto do sistema de produção de empreendimentos habitacionais de interesse social.

decisões do projeto do sistema de produção através da dimensão espacial presente na modelagem 4D.

A emergência da tecnologia *Building Information Modeling* (BIM) ou Modelagem da Informação da Construção nos últimos anos tem facilitado o uso da modelagem 4D no projeto e gestão de sistemas de produção. De fato, o BIM tem sido crescentemente utilizado para a prototipagem virtual, produção eficiente e rápida de modelos para análise e simulação de diferentes propriedades e comportamentos de alternativas possíveis (KIVINIEMI, 2011). Em que pese os benefícios evidentes do BIM, existem obstáculos para a sua adoção na medida que são necessárias mudanças substanciais na forma de gerenciar empreendimentos (KIVINIEMI, 2011).

## 1.2 FILOSOFIA DA PRODUÇÃO ENXUTA

A produtividade da construção civil apresenta um grande atraso quando comparado à indústria da manufatura e um número considerável de soluções tem sido oferecidas por outras indústrias para atenuar esses problemas crônicos, mas ainda sem mudanças significativas (KOSKELA, 2000). Dessa forma, para Koskela (1992), a ineficácia na transposição dos princípios desenvolvidos em outros ambientes produtivos ocorre porque estes não foram suficientemente abstraídos e aplicados sob a consideração das peculiaridades intrínsecas do ambiente da construção civil.

Um desses princípios da manufatura que apresenta implementações ao longo dos anos na indústria da construção é a produção enxuta. Esta é definida por Womack, Jones e Roos (1990) em seu livro “A Máquina que Mudou o Mundo” como:

“A produção enxuta é enxuta por utilizar menores quantidades de tudo em comparação com a produção em massa: metade do esforço dos operários na fábrica, metade do espaço para fabricação, metade do investimento em ferramentas, metade das horas de planejamentos para desenvolver novos produtos em metade do tempo. Requer também menos da metade dos estoques atuais no local de fabricação, além de resultar em menos defeitos e produzir uma maior e sempre crescente variedade de produtos.”.

Neste contexto, para Koskela (1992) o modelo tradicional de gestão da produção baseia-se fortemente no conceito de transformação, que considera a produção apenas como a

transformação de insumos em produtos. Se o foco da produção é apenas na transformação dos subprocessos o modelo de transformação não apenas negligencia, mas também diminui a eficiência do fluxo global do processo de produção (KOSKELA, 2000). Por isso, Koskela(2000) propôs uma nova teoria de produção, que considera os fluxos (transporte, inspeção e espera), a transformação dos recursos e a geração de valor. Dessa forma as perdas na produção podem ser explicitamente identificadas e eliminadas através das atividades de fluxo desnecessário.

### 1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

No ambiente da construção civil, alguns trabalhos tratam do escopo de decisões do PSP, tais como: (a) **workstructuring ou estruturação do trabalho**, desde a sua organização global até projeto de processos (BALLARD, 2000a; TSAO; TOMMELEIN, 2004; TSAO *et al.*, 2000); (b) **projeto para a produção**, na qual estrutura o projeto de processos para cada novo sistema construtivo (MELHADO; FABRICIO, 1998; SOUZA; MELHADO, 1996, 1998); (c) **location-based scheduling ou programação do projeto baseada na localização**, focando o projeto da produção na sincronia e ritmo das atividades (KANKAINEN; SEPPANEN, 2003; KEMMER; HEINECK; ALVES, 2008; KENLEY, 2004); (d) **phase scheduling ou programação por fases**, abordando o planejamento da produção de forma participativa e discutindo as entregar de trabalho entre clientes internos (BALLARD, 2000b; KNAPP; CHARRON; HOWELL, 2007); e (e) **planejamento do fluxo do trabalho**, abordando a definição de sequências e trajetórias, escolhas de tecnologias construtivas, seleção de equipamentos e máquinas, fornecimento de materiais e contratação de mão de obra (SAFFARO; PAULA, 2002). Todos estes trabalhos apresentam contribuições para algumas decisões tomadas no PSP, mas não discutem explicitamente a tomada de decisão sistemática e interconectada neste processo.

Schramm (2004) e Rodrigues (2006) abordam o projeto do sistema de produção de forma explícita, estruturando a tomada de decisão para empreendimentos habitacionais de interesse social e complexos, respectivamente. Estes englobam todas as atividades de empreendimento e analisam o sistema de produção de forma sistemática, mas ainda não fazem o uso dos benefícios da modelagem de sistemas, através da simulação e 4D, para compor estas decisões.

No contexto da simulação, a maioria dos trabalhos sob o escopo da habitação de interesse social trata de: (a) simulação do processo de execução de empreendimento habitacional com

tecnologias pré-fabricados (MOHSEN *et al.*, 2008; SHI; ZENG; TAM, 1998); (b) modelagem das equipes especializadas presentes na construção de empreendimentos repetitivos, focando no fluxo ininterrupto das mesmas (BASHFORD *et al.*, 2003; SAWHNEY *et al.*, 2003; SRISUWANRAT; IOANNOU; TSIMHONI, 2008; YANG; IOANNOU, 2001). Já sob a ótica de empreendimentos repetitivos, existe a preocupação sobre a localização e dimensionamento de estoques de proteção (*buffer*) (ALVES; TOMMELEIN; BALLARD, 2006; ALVES, 2005; GONZÁLEZ; ALARCÓN; MOLENAAR, 2009). Estes focam, predominantemente, na modelagem dos sistemas estudados e nas estratégias existentes para mitigar a interrupção no fluxo de trabalho, mas não analisam o PSP de forma explícita.

Entre estes, Alves, Tommelein e Ballard (2006) discutem a utilização da simulação como uma ferramenta do projeto do sistema de produção em empreendimentos da construção civil. Mas apenas ilustram como diferentes configurações de tamanhos e localização de estoques de segurança e o tamanho de lotes de produção e transferência poderiam impactar no desempenho desses sistemas de produção. Não apresentando de forma estruturada como se formaliza o processo de tomada de decisão do PSP com o auxílio da simulação.

Já Kamat e Martinez (2000) apresentam a problemática de compreensão dos resultados da simulação, ou seja, o efeito de *black box* que os resultados estatístico podem causar nos usuários leigos. Diferentes trabalhos apresentam ferramentas para a mitigação desse problema, como a ferramenta PROOF de animação 2D (KAMAT; MARTINEZ, 2000) e a ferramenta de animação 3D, VITASCOPE (IOANNOU; KAMAT, 2005; KAMAT; MARTINEZ, 2004; KAMAT; MARTÍNEZ, 2001), as quais focam na modelagem das operações. Mas nenhuma delas enfatiza o fluxo do produto, o qual pode apresentar tanto as estratégias globais do empreendimento como representar os resultados da simulação através de uma representação mais amigável aos gestores de empreendimentos da construção civil.

O fluxo do produto pode ser visualizado através da modelagem 4D. Dessa forma, Koo e Fischer (1998) afirmam que a partir do momento em que os modelos 4D comunicam o plano por meio dos objetos, a conexão entre os aspectos temporais e físicos podem ser compreendidos, aumentando a possibilidade de detectar antecipadamente problemas. Esses mesmo autores afirmam que o modelo 4D é um reflexo da sequência de construção presente no plano de construção do empreendimento. Isso permite que os participantes envolvidos tenham clareza de sua lógica e, por meio do 4D, alcancem uma interpretação comum das estratégias definidas para o empreendimento (KOO; FISCHER, 1998).

Por fim, dois trabalhos recentes discutem a modelagem de sistemas como ferramentas para a tomada de decisão ao longo do processo de PSP. Schramm (2009) elabora um método de utilização da simulação computacional durante o PSP e Biotto (2012) propõem um método de gestão da produção, na qual o PSP é a primeira etapa, com o auxílio da modelagem 4D. Os dois trabalhos focam na avaliação de qual forma cada uma das ferramentas utilizadas pode contribuir para o processo de decisão sistemático do PSP. Como o PSP pode se beneficiar da utilização conjunta dessas duas ferramentas, existe uma necessidade de avaliação das mesmas de forma integrada. Por esse motivo, o grande foco desse trabalho é utilizar a simulação computacional para simular o comportamento do sistema de produção, visualizar a construção dos elementos e resultados da simulação através de modelos 4D para, ao final, possibilitar que os gerentes do empreendimento possam tomar decisões quanto ao sistema de produção.

#### 1.4 QUESTÕES DA PESQUISA

A questão de pesquisa deste trabalho é: “como a modelagem 4D e simulação de eventos discretos podem ser integradas ao processo de elaboração do projeto do sistema de produção de empreendimentos habitação de interesse social?”

Esta questão foi desdobrada na seguinte questão secundária: em quais decisões do PSP a modelagem 4D pode auxiliar na visualização dos resultados da simulação computacional?

#### 1.5 PROPOSIÇÕES

As proposições deste trabalho são:

- a) o emprego da modelagem 4D e linha de balanço, pode contribuir para um melhor entendimento do modelo de simulação, a partir da modelagem do sistema de produção de forma determinística, contribuindo, assim, para um maior envolvimento do gerente de produção do empreendimento no processo de desenvolvimento do modelo e na geração de cenários alternativos;
- b) a modelagem 4D e a simulação necessitam de informações do PSP para se concretizar. Elas devem estar integradas ao desenvolvimento das atividades do PSP e aptas aos estudos de alternativas de decisões, de alterações dos modelos, gerando rápido feedback ao tomador de decisão.

## 1.6 OBJETIVOS

Esta dissertação tem como objetivo principal propor um método para a elaboração do projeto do sistema de produção utilizando a modelagem 4D e simulação de eventos discretos como ferramentas integradas na tomada de decisão de empreendimento habitacionais de interesse social.

Os objetivos específicos são:

- a) identificar em quais decisões do PSP os modelos 4D podem auxiliar na visualização dos resultados da simulação computacional e na tomada de decisão;
- b) definir procedimentos de desenvolvimento e utilização os modelos 4D e de simulação durante a elaboração do PSP em empreendimentos da construção civil, tendo em vista suas peculiaridades.

Este estudo faz parte de um projeto de pesquisa intitulado **Tecnologia da Informação e Comunicação em Habitações de Interesse Social**, financiado pela Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), cujo objetivo desenvolver soluções inovadoras em tecnologia da informação e comunicação para aumentar a qualidade e produtividade do segmento da habitação de interesse social, principalmente Minha Casa Minha Vida, com destaque para BIM. Este projeto vem sendo realizado por uma rede de pesquisa em várias universidades de Brasil (Universidade de São Paulo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Universidade Federal do Ceará, Universidade Federal do Paraná, Universidade Federal da Bahia, Universidade Estadual de Campinas, Universidade Presbiteriana Mackenzie). Esta pesquisa está inserida em uma das metas desta rede, denominada “Métodos para a implementação de tecnologias de simulação associadas à visualização 4D para o projeto do sistema de produção”.

## 1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é composto por seis capítulos. O primeiro apresenta a introdução através do problema real, o contexto de inserção da pesquisa, o problema da pesquisa e o escopo do trabalho (objetivos, proposições e questões).

O segundo e terceiro capítulos apresentam a revisão bibliográfica. O primeiro deles mostra o sistema de produção de uma forma tradicional, uma crítica a este sistema tradicional de produção, o projeto do sistema de produção na construção civil e diferentes trabalhos que

desenvolveram métodos e abordagens para definir o processo de tomada de decisão do PSP. Já o segundo apresenta a simulação computacional e modelagem 4D, definindo conceitos básicos, etapas de modelagem e trabalhos desenvolvidos com essas ferramentas sob o escopo das decisões do PSP.

O quarto capítulo apresenta o método de pesquisa, incluindo a estratégia e o delineamento utilizado na pesquisa, descreve as características dos estudos de caso e apresenta os métodos e técnicas utilizados para coleta e análise de dados. No quinto capítulo são apresentados os resultados dos estudos empíricos realizados e a descrição do método proposto. No último, são apresentadas as conclusões deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

## 2. PROJETO DO SISTEMA DE PRODUÇÃO

Neste capítulo, são apresentadas definições relacionadas ao projeto do sistema de produção, assim como os objetivos deste processo. Após, é apresentada uma crítica à gestão tradicional da produção na construção civil, a qual traz os conceitos de transformação, fluxo e valor fundamentados por Koskela (2000). Em seguida, discute-se os sistemas de produção por projeto, trabalhos anteriores sobre o projeto do sistema de produção na manufatura, e o escopo de atividades normalmente envolvidas no PSP. Por fim, são apresentados diferentes estudos que tratam de algumas decisões do escopo do PSP, definido neste capítulo, e dois modelos desenvolvidos para a construção civil para sistematizar a tomada de decisão durante o processo de PSP.

### 2.1 CONCEITO DE SISTEMA DE PRODUÇÃO

Segundo Meredith e Shafer (2002) um sistema de produção é a reunião intencional de pessoas, objetos e procedimentos para operar num ambiente. A Figura 1 apresenta os principais elementos de um sistema de produção: ambiente, insumos, sistemas de transformação, produtos e mecanismos utilizados para monitorar e controlar. Dessa forma, o setor de produção se encarrega em transformar insumos em produtos úteis, acrescentando valor a uma determinada entidade, sendo estas transformações organizadas em quatro tipos principais (MEREDITH; SHAFER, 2002): (a) alteração ou mudança física do insumo (por exemplo, corte e dobra do aço); (b) transporte de produtos a determinados locais (por exemplo, entrega de flores, recolhimento do lixo); (c) armazenamento em ambiente seguro e por um determinado tempo (por exemplo, certificados de ações); e (d) inspeção, valorizando o produto através do conhecimento de suas propriedades (por exemplo, exame médico, inspeção de elevador).

Gaither e Frazier (2005) adotam uma definição de sistema de produção semelhante: (a) o sistema de produção recebe insumos na forma de materiais, pessoal, capital, serviços públicos e informação; (b) os insumos são modificados num subsistema de transformação para os produtos e serviços desejados, denominados produtos; (c) uma parcela do produto é monitorada no subsistema de monitoramento e controle para determinar se ele é aceitável em termos de qualidade, custo e quantidade; e (d) caso o produto não for aceito, será necessária uma ação corretiva por parte da administração.

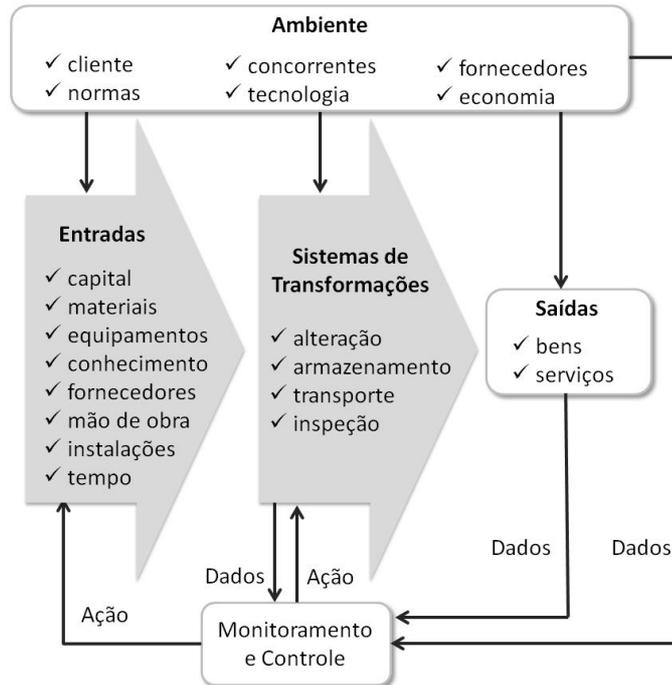


Figura 1: sistema de produção adaptado de Meredith e Shafer (2002)

Entretanto, Hopp e Spearman (2000) enfatizam o conceito de fluxo, ao definirem o sistema de produção<sup>2</sup> como uma rede de processos orientada aos objetivos por onde as entidades fluem. Com esta definição, os referidos autores ressaltam os seguintes aspectos importantes de qualquer sistema de produção:

- o objetivo do sistema de produção está geralmente relacionado à lucratividade;
- os processos podem representar tanto processos físicos como aqueles processos que suportam a função produção;
- as entidades não são apenas as partes sendo transformadas, mas também a informação utilizada para controlar o sistema;
- o fluxo de entidades através do sistema descreve como materiais e informações são processadas e o gestão destes fluxos é a principal atividade da função produção; e
- o gerenciamento das interações entre os processos é mais importante do que o gerenciamento de processos e entidades individualmente.

O elemento humano, no sistema de produção, é ressaltado por Jacobsen *et al.* (2002). Estes autores afirmam que o elemento humano possui qualificações, criatividade e curiosidade que devem ser utilizadas de forma mais eficiente no projeto de processos e procedimentos do

<sup>2</sup>Hopp e Spearman (2000) utilizam o termo *manufacturing system* para se referirem ao sistema de produção.

Método para integração da simulação de eventos discretos e modelagem 4D no projeto do sistema de produção de empreendimentos habitacionais de interesse social.

sistema de produção. A Figura 2 apresenta o modelo de sistema de produção com o fator humano definido por Jacobsen *et al.*(2002). Neste, o sistema de produção é representado pelos seguintes blocos(JACOBSSEN *et al.*, 2002):

- a) **tecnologia:** refere-se às informações, equipamentos, técnicas e processos necessários para transformar *input* (entradas) em *output* (saídas) dentro da organização;
- b) **recursos humanos:** define as qualificações e competências que estão presentes quando o sistema inclui a mão de obra;
- c) **informações:** todas as atividades no sistema de produção necessitam de informações, as quais integram os diversos elementos do sistema;
- d) **organização:** organizar as tarefas de produção significa definir o caminho que a empresa planeja sua produção, definindo a quantidade de equipes, o controle sobre elas e a produção necessária.



Figura 2: sistema de produção adaptado de Jacobsen *et al.*(2002)

Estes blocos estão intimamente inter-relacionados: uma modificação em um bloco tende a modificar o restante deles, sendo os mesmos influenciados pelos intervenientes, os quais impõem limites no desenvolvimento do sistema através de seus interesses (JACOBSSEN *et al.*, 2002).

No presente trabalho é adotada a definição apresentada por Hopp e Spearman (2000) devido ao conceito de fluxo empregado e ao fato que a informação também é transformada ao longo dos processos. Entretanto, a definição de Meredith e Shafer (2002) apresenta uma contribuição importante por definir de forma clara as fronteiras do sistema (insumos, sistema de transformação, monitoramento e produtos), assim como Jacobsen *et al.*(2002), o qual introduz a necessidade do fator humano durante o processo de produção.

### 2.1.1 Crítica à Visão Tradicional de Produção

A visão tradicional de sistema de produção tem sido criticada por diversos autores (HOPP; SPEARMAN, 2000; KOSKELA, 1992). Segundo Koskela (1992), o modelo tradicional de gestão da produção baseia-se fortemente no conceito de transformação, que considera a produção apenas como a transformação de insumos em produtos. Segundo este conceito as atividades que são planejadas são decompostas em tarefas e é analisado o método otimizado e a ordem de execução destas, assegurando que todas as entradas estão disponíveis e atribuídas a um operário ou a uma estação de trabalho para cada tarefa (KOSKELA, 2000). Este modelo tradicional pressupõem alguns princípios, os quais são (KOSKELA, 2000): (a) a decomposição do processo de transformação em subprocessos menores e mais gerenciáveis; (b) a redução do custo total do processo pode ser obtida através da minimização do custo de cada subprocesso individualmente; e (c) o valor do produto de um processo está associado ao valor (custo) dos insumos empregados naquele processo.

Se o foco da produção é apenas na transformação dos subprocessos o modelo de transformação não apenas negligencia, mas também diminui a eficiência do fluxo global do processo de produção (KOSKELA, 2000). Deste modo, é definido por Koskela (2000) o conceito de fluxo e geração de valor. Assim é introduzido o tempo como uma entrada na produção e o que é quantificado é o tempo consumido e o valor agregado ao produto pela transformação. Mas o tempo é consumido por dois tipos de atividades: as de transformação e as de fluxo como transporte, espera e inspeção; já o valor é agregado ao produto apenas pelas atividades de transformação (KOSKELA, 2000). Assim para melhorar o processo de produção, devem-se eliminar as atividades que não agregam valor ao produto final, ou seja, as atividades de fluxo, que no caso seriam transportes desnecessários, atrasos na produção e inspeção final da qualidade do produto (KOSKELA, 2000).

Koskela e Howell (2000) também criticam a gestão tradicional de produção, mas sob o escopo do planejamento, execução e controle. Estes autores argumentam que a doutrina presente sofre de sérias deficiências de base teórica: (a) o papel do planejamento não é definido de forma real e o plano de curto prazo é fracamente desenvolvido ou simplesmente negligenciado; (b) não existe uma forma sistemática de gerenciar a execução; e (c) o papel do controle é visto apenas como medição de desempenho e realização de ações corretivas, ao invés de ser um processo de aprendizagem contínua.

Koskela e Howell (2002) relacionam estes problemas a falhas na base teórica da gestão da produção: (a) a utilização da função controle da produção apenas como um termostato, e (b) a premissa de que a função execução é apenas um repasse de ordens de serviço. O modelo do termostato, proposto por Hofstede (1978), é a criação de um padrão de desempenho, usado como referência para uma avaliação periódica do andamento da produção, visando a avaliar a aderência ao padrão estabelecido. A principal crítica a este modelo de controle é o fato do mesmo não considerar explicitamente o efeito da aprendizagem ou das melhorias. Dessa forma Koskela e Howell (2002) sugerem como mais adequado o modelo da experimentação científica proposta por Shewhart e Deming (1939)<sup>3</sup>, segundo o qual se compara as três etapas do processo de controle - especificação, produção e avaliação da qualidade - com as etapas de um experimento: criar uma hipótese, conduzir um experimento e testar a hipótese. Desta forma, o modelo da experimentação contribui para se encontrar as razões para os desvios indesejados e se buscar a melhoria contínua (KOSKELA; HOWELL, 2002).

Já a segunda refere-se a um sistema de ordens de serviço para a execução. Este sistema é a alocação ou a atribuição de tarefas as máquinas ou frentes de trabalho realizado por um controle central (KOSKELA; HOWELL, 2002). Existem dois tipos de críticas ao sistema de ordens de serviço. A primeira é a suposição que todas as condições necessárias para iniciar a atividade estão prontas quando é expedida a ordem de serviço (KOSKELA; HOWELL, 2002). Como não existe um controle dessas condições, uma ou várias condições podem não estar prontas quando a atividade é autorizada pela ordem de serviço controlada de forma centralizada. Já a segunda é a suposição que a atividade está completamente entendida, iniciada e terminada de acordo com o plano, não existindo necessidade de um comprometimento da produção com as atividades autorizadas (KOSKELA; HOWELL, 2002).

## 2.2 SISTEMA DE PRODUÇÃO POR PROJETO<sup>4</sup>

Os sistemas de produção podem ser classificados em diferentes tipos, sendo a classificação mais comum a Matriz Produto-Processo ou Matriz Volume-Variedade, proposta por Hayes e

---

<sup>3</sup>SHEWHART, A. & DEMING, W. E. **Statistical Method from the Viewpoint of Quality Control**. Washington, USA: The Graduate School, The Department of Agriculture, 1939.

<sup>4</sup>A palavra projeto, utilizada neste trabalho, tem o mesmo sentido de palavra *project* em inglês. Dessa forma, esta é compreendida como uma parte de uma atividade ou trabalho planejada a qual é realizada durante um período de tempo e que tem a intenção de atingir um objetivo específico (PRESS, 2013).

Wheelwright (1979) (HOPP; SPEARMAN, 2000; MEREDITH; SHAFER, 2002; SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2007).

Segundo a esta classificação, a construção civil enquadra-se como sistema de produção por projeto, que normalmente tem as seguintes características principais (BALLARD; HOWELL, 1998; MEREDITH; SHAFER, 2002): a) caráter único; (b) duração finita, com o início e fim bem definidos; (c) organização temporária; (d) fluxo de trabalho desordenado; e (e) realização de tarefas múltiplas, muitas vezes simultâneas e interdependentes. Slack, Chambers e Johnston (2007) ainda acrescentam que as seguintes características aos empreendimentos: (a) envolvem normalmente produtos altamente customizados; (b) tem um caráter de definição progressiva, ou seja, as atividades para fazer o produto podem ser mal definidas e incertas, sendo modificadas durante o processo de produção; e (c) os recursos para fazer o produto são organizados especialmente para cada produto.

Assim, Gaither e Frazier (2005) observam que existe a necessidade de elaborar um plano de execução do projeto no seu início das atividades, mas este se modifica à medida que as condições vão mudando durante o projeto. Em função disto, o planejamento e controle ocorrem à medida que o projeto vai evoluindo, tendo este processo um papel fundamental na gestão de sistemas de produção por projetos (MEREDITH; SHAFER, 2002). Na visão tradicional desse tipo de sistema, uma das primeiras tarefas do planejamento consiste na definição detalhada de todas as tarefas, para que estas possam ser agendadas, orçadas e para que se possa atribuir responsabilidades (MEREDITH; SHAFER, 2002). Em geral existe um padrão de divisão do projeto em atividades, *Work Breakdown Structure* (WBS)<sup>5</sup>, que serve de ponto de partida para a elaboração do plano de longo prazo do projeto (GAITHER; FRAZIER, 2005; MEREDITH; SHAFER, 2002; SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2007).

A programação das atividades do projeto normalmente é complexa devido a (MEREDITH; SHAFER, 2002): (a) grande quantidade de atividades; (b) grande número e variedade de relações de precedência entre atividades; e (c) o tempo limitado do projeto. No planejamento da produção tradicional, define-se as atividades que devem ser executadas para que sejam atingidos os objetivos do projeto, no tempo que cada uma delas requer e na ordem em que elas precisam ser concluídas (MEREDITH; SHAFER, 2002). Por esse motivo, é muito difundida na área de gestão de projetos duas técnicas de redes de precedência, os quais são: *Program*

---

<sup>5</sup> É normalmente traduzida por estrutura analítica do projeto (EAP).

Método para integração da simulação de eventos discretos e modelagem 4D no projeto do sistema de produção de empreendimentos habitacionais de interesse social.

*Evaluation and Review Technique* (PERT) e *Critical Path Method* (CPM) (GAITHER; FRAZIER, 2005; MEREDITH; SHAFER, 2002; SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2007).

Esta sistemática de gestão de projetos apresentada nesta seção está intimamente ligada a visão tradicional de gestão da produção discutida anteriormente. Mas é importante ressaltar as características desse tipo de sistema, ao qual a indústria da construção faz parte, pois as mesmas influenciam a forma de abordagem do projeto do sistema de produção descrito a seguir.

### 2.3 PROJETO DE SISTEMA DE PRODUÇÃO NA MANUFATURA

Geralmente, o termo projeto<sup>6</sup> está associado ao projeto (design) dos produtos que serão produzidos. Entretanto, esta atividade refere-se também ao projeto do sistema de produção que efetivamente produz estes produtos (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2007).

Slack, Chambers e Johnston (2007) apresentam um modelo geral de gestão da produção, representado na Figura 3. Este modelo emprega o mesmo conceito de sistema de produção apresentada na Figura 1 por Meredith e Shafer (2002), mas acrescenta as funções de projeto, planejamento e controle e melhoria dentro do escopo da transformação e a estratégia de produção como o objetivo a ser alcançado por estas três primeiras atividades. A partir desta estruturação, a estratégia de produção influencia diretamente a atividade de projeto, planejamento e controle e melhoria de um sistema de produção.

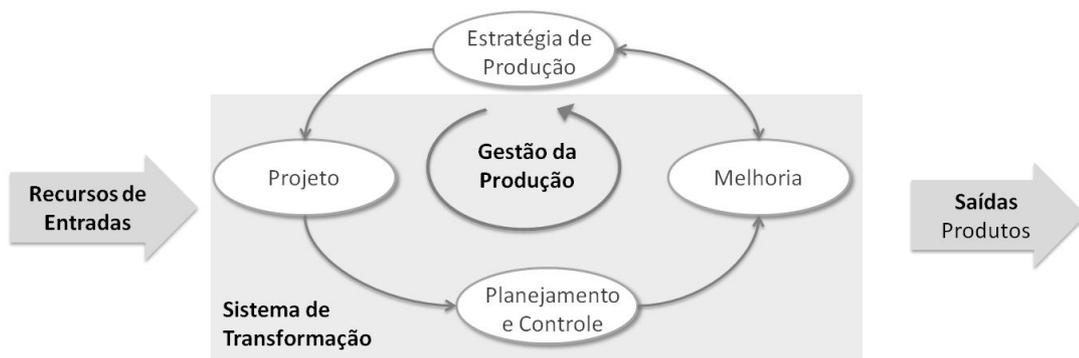


Figura 3: modelo geral de gestão da produção, adaptado de Slack, Chambers e Johnston (2007)

A atividade de projeto, dentro da gestão da produção, está relacionada tanto ao projeto do produto como ao projeto do sistema de produção, sendo tratados de formas separadas, mas relacionados entre si (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2007). Slack, Chambers e Johnston

<sup>6</sup> Projeto, neste caso, é no sentido de design. Portanto, a tradução de projeto do sistema de produção é *production system design*.

(2007) afirmam que pequenas mudanças no projeto do produto podem implicar grandes modificações na forma com que as operações iram produzi-lo, ou o projeto do processo pode restringir as definições do produto.

Askin e Goldberg (2002) compreendem o PSP como a definição da gestão de recursos físicos e o uso da informação para a produção de produtos. Já Gaither e Frazier (2005) definem o projeto do sistema de produção como o planejamento e projeto dos processos, que requer conhecimento sobre a estratégia de produção, projetos de produtos ou serviços, tecnologia do sistema de produção e mercado, sendo estes conhecimentos utilizados para desenvolver um plano detalhado para produzir produtos e serviços. O resultado deste estudo é a determinação das etapas do processo tecnológico a ser utilizado e as conexões entre as etapas, assim como a escolha dos equipamentos, projeto de construção e instalação de *layout*, número de funcionários e suas habilidades necessárias (GAITHER; FRAZIER, 2005).

A partir da definição do projeto do sistema de produção para a manufatura, aborda-se, a seguir, as atividades que compõem o seu escopo de decisões. Estas atividades são: (a) definição do nível de integração vertical; (b) planejamento da capacidade produtiva; (c) definição dos fluxos físicos; (d) planejamento de *layout*; (e) sincronia da produção.

### 2.3.1 Nível de Integração Vertical

A integração vertical é a escolha dos processos que a empresa deve manter sob o seu domínio, normalmente associado à decisão de fazer ou comprar (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2007). A integração vertical também está relacionada à estratégia de gestão da cadeia de suprimentos das empresas, ou seja, a maneira como as empresas estabelecem parcerias com seus fornecedores e clientes e a gestão dos fluxos dos produtos e informações desde as atividades básicas até a entrega do produto (ASKIN; GOLDBERG, 2002).

Askin e Goldberg (2002) afirmam que muitas empresas recorrem à integração vertical para garantir o fornecimento de materiais. Além disso, segundo Slack; Chambers; Johnston (2007), os efeitos da integração vertical na produção podem ter reflexos nos seguintes fatores:

- a) **qualidade:** as origens de problemas de qualidade são mais facilmente encontradas quando a mão de obra é própria, mas pode haver riscos de complacência das equipes. Já na cadeia de suprimentos, os fornecedores podem ter conhecimentos específicos e

mais experiência no processo de execução, mas podendo a contratante sofrer por pressão de mercado e dificuldade de comunicação;

- b) **rapidez:** as operações mais integradas podem significar uma sincronização maior de produção quando, acelerando a troca de materiais e informações, mas se a operação tem clientes externos, os internos podem ser negligenciados. Já a comunicação em uma cadeia de suprimentos pode ser construída, mas também pode ocorrer transportes excessivos;
- c) **confiabilidade:** facilidade de comunicação pode ajudar na integração vertical, mas se a operação tem clientes externos, os internos podem ser negligenciados. Penalidades por entregas tardias podem encorajar um bom desempenho de entregas de produtos na cadeia de suprimentos, mas barreiras organizacionais podem dificultar a comunicação;
- d) **flexibilidade:** a proximidade maior da contratante com seus processos pode alertar mais facilmente a necessidade de mudanças, mas a habilidade de resposta pode ser limitada pela escala e escopo das operações. Já na cadeia de suprimentos pode ser mais fácil a habilidade e capacidade de resposta, mas os fornecedores podem ser influenciados pelas necessidades conflitantes de diferentes clientes; e
- e) **custos:** produzindo a contratante pode permanecer com todos os lucros de seus processos, mas o baixo volume de produção pode reduzir lucros e a não terceirização pode reduzir a inovação nos processos. Já na cadeia de suprimentos pode proporcionar um compartilhamento de custos de produção, mas os custos de comunicação e coordenação devem ser considerados.

Dessa forma, Meredith e Shafer (2002) salientam as características que um fornecedor deve ter: (a) a entrega dos produtos no prazo determinado, com a quantidade e qualidade especificada, para manter o fluxo constante das atividades da organização; (b) preços justos e realizando esforços para manter ou reduzir o preço; (c) capacidade de reação a mudanças imprevistas, como aumento ou redução de demanda, qualidade, especificações ou programações de entrega; e (d) melhorar constantemente seus produtos e serviços.

Askin e Goldberg (2002) afirmam que a decisão sobre os elementos a fabricar e a comprar de fornecedores externos tem grande importância para a empresa, devendo ser consideradas as competências básicas da empresa e os requisitos dos clientes. A maioria das empresas não tem

interesse em atribuir o controle de peças-chave aos seus fornecedores, mas produtos com caráter de *commodity*<sup>7</sup> raramente são produzidos internamente devido ao baixo risco envolvido na compra desses produtos (ASKIN; GOLDBERG, 2002). Em compensação, os elementos que se relacionam diretamente às competências básicas da empresa são usualmente produzidos internamente (ASKIN; GOLDBERG, 2002).

### **2.3.2 Capacidade Produtiva**

Gaither e Frazier (2005) definem capacidade produtiva como a cadência máxima de produção de uma organização. Segundo Meredith e Shafer (2002), planejamento da capacidade é determinar o tempo e a quantidade necessária de instalações, equipamentos e mão de obra. Já para Hopp e Spearman (2000), as decisões de capacidade têm um impacto estratégico para o projeto de novos sistemas de produção e tem muitos efeitos no desempenho do sistema de produção, por influenciar outros elementos do planejamento e controle.

Entretanto, segundo Slack, Chambers e Johnston (2007), um sistema de produção é composto por um conjunto de processos, os quais podem ter diferentes capacidades de produção. Para que o sistema de produção opere com eficácia, todos os seus processos deveriam ter a mesma capacidade produtiva. Caso contrário, a capacidade de todo o sistema será limitada pela capacidade de seu processo mais lento (com a menor capacidade produtiva) (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2007). O processo mais lento de um sistema de produção é o gargalo, cuja capacidade, segundo Slack, Chambers e Johnston (2007), restringe as saídas de todo o processo.

Segundo Hopp e Spearman (2000), os processos gargalos podem ser projetados, podendo-se reduzir o número de potenciais gargalos através do aumento da capacidade em alguns processos para fazer com que os mesmos não restrinjam a produção (HOPP; SPEARMAN, 2000). Entretanto, esta abordagem é vantajosa quando o custo de adicionar capacidade extra não é elevado.

### **2.3.3 Layout**

O *layout* de um sistema de produção é a forma como os recursos são posicionados em entre si e como as várias atividades são alocadas em relação a estes recursos (SLACK; CHAMBERS;

---

<sup>7</sup>*Commodity* são produtos disponíveis a partir de vários fornecedores a preços competitivos, que não apresentam diferenciação em termos de qualidade e que, normalmente, são entregues rapidamente (ASKIN; GOLDBERG, 2002).

JOHNSTON, 2007). O *layout* determina o padrão de fluxo dos recursos ao longo do sistema de produção (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2007). Segundo Askin e Goldberg (2002) existem quatro tipos básicos de *layout*:

- a) **por produto:** este tipo de *layout* é utilizado em sistemas de produção repetitiva, nos quais a demanda é grande suficiente para justificar economicamente a utilização de equipamentos dedicados para um produto único. Os processos de produção são arranjados sequencialmente de forma que o produto percorre cada área, uma após a outra. Os equipamentos são projetados para possuírem taxas de produção similares a cada estágio;
- b) **por processo:** é utilizado quando produtos muito diferentes são produzidos e há necessidade de conhecimento especializado nos processos de produção. Esta abordagem tem geralmente maior flexibilidade para produzir uma variedade de itens, mas sofre pela baixa utilização dos equipamentos e longos tempos de atravessamento;
- c) **celular:** tenta dividir grandes instalações em células menores projetadas para produzirem uma família de produtos ou partes relacionadas. O relacionamento pode ser em função da similaridade de máquinas e ferramentas utilizadas ou utilização em um mesmo produto final. Cada célula é uma pequena fábrica mais simples, com movimentações de materiais mais curtas e de coordenação mais fácil;
- d) **posicional:** neste tipo de *layout* o produto permanece fixo, tendo em vista seu tamanho ou peso (ou sua natureza, no caso da construção civil), enquanto os recursos de produção (materiais, equipamento e equipes) convergem para o seu entorno, onde são executadas as atividades.

Empreendimentos da construção civil são, normalmente, caracterizados como sistemas de produção organizados em *layout* posicional. Consequentemente, existe a necessidade de elaborar um projeto detalhado de *layout* a cada nova obra, com o objetivo de melhorar a eficiência dos recursos transformadores (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2007).

### 2.3.4 Fluxos e Sincronia da Produção

Como discutido no início deste capítulo, eliminando as atividades de fluxo que não agregam valor ao produto final, pode-se eliminar falhas e reduzir retrabalhos, além de aumentar ganhos com qualidade e produtividade (KOSKELA, 2000). Uma das formas de eliminar as atividades

de fluxo é trabalhar com o fluxo contínuo na produção. O fluxo contínuo pode ser definido como a produção e movimentação de um item por vez (ou um lote de pequenos itens), continuamente, ao longo de uma série de etapas de processamento, realizando-se em cada etapa apenas o que é exigido pela etapa seguinte (LEAN ENTERPRISE INSTITUTE, 2008). Para obter o fluxo contínuo na produção, três variáveis de tempo devem ser compreendidas:

- a) **tempo takt:** para cada produto, a taxa de demanda determina a frequência na qual este deve ser produzido. Todas as partes constituintes do produto final também devem entrar em produção na mesma frequência. Este ritmo, ou tempo *takt*, determina o intervalo entre entregas sucessivas de um produto para o sistema a fim de responder precisamente a demanda (ASKIN; GOLDBERG, 2002);
- b) **lead time:** tempo em que um produto se movimenta por todas as etapas de um processo, desde a matéria prima até o produto acabado (ROTHER; SHOOK, 1991); e
- c) **tempo de ciclo:** frequência com que uma peça ou produto é completado por um processo, ou, o tempo que leva entre um componente e o próximo saírem do mesmo processo (ROTHER; SHOOK, 1991), dessa forma o tempo de ciclo inclui todas as atividades que um operador necessita para produzir uma unidade, ou seja, inclui processamento, transporte, espera, etc.

Um sistema de produção perfeitamente sincronizado caracteriza-se pela chegada de componentes nas estações de trabalho a tempo para sua produção, sem a formação de estoques entre processo, eliminando assim atrasos, minimizando os custos e melhorando o desempenho na pontualidade de entrega (RODRIGUES; MACKNESS, 1998), ou seja, utilizando o conceito de fluxo contínuo.

De acordo com Rodrigues e Mackness (1998), existem três abordagens para sincronização da produção: (a) *Just in Case* (JIC); (b) *Just in Time* (JIT) e (c) tambor-pulmão-corda (TPC) do gerenciamento das restrições. A primeira é uma abordagem mais tradicional, que parte da consideração de que, a partir da maximização das eficiências de processos individuais através da definição de lotes econômicos, medidas de custos locais e a definição de que cada recurso deve ser gerenciado e trabalhar com 100% de utilização, obtém-se a otimização do desempenho do sistema como um todo (RODRIGUES; MACKNESS, 1998). As principais críticas, discutidas por Rodrigues e Mackness (1998), são o grande número de entregas realizada no

final do mês devido a atrasos durante o mesmo, muito trabalho em progresso<sup>8</sup>, muitos despachos de produtos e ordens de entrega atrasadas.

A segunda abordagem tentando criar uma corrente de processos de produção balanceada, em que os produtos são produzidos quando necessários e puxados pela demanda do mercado (RODRIGUES; MACKNESS, 1998). Esta abordagem tem a vantagem de reduzir estoques, *lead time* e custos, além de aumentar a satisfação dos clientes. Entretanto, esta abordagem encontra algumas limitações na sincronização da produção, pois, em alguns casos, é difícil criar um fluxo balanceado e mesmo quando obtido, este fluxo poderia gerar perdas sempre que um processo parasse (RODRIGUES; MACKNESS, 1998).

A terceira abordagem para sincronização da produção é a proposta do Gerenciamento das Restrições, a qual é uma junção de sistemas puxados e empurrados e é chamada de tambor-pulmão-corda (RODRIGUES; MACKNESS, 1998). A mesma reconhece que existem gargalos em qualquer processo e a primeira ação é identificá-los, logo é definida a utilização máxima desse recurso (tambor) e, posteriormente, subordinar todos os outros recursos a essa decisão (corda) (RODRIGUES; MACKNESS, 1998) da mesma forma que a abordagem JIT. Mas, para garantir a taxa de produção, são utilizados *buffers*<sup>9</sup> no sistema (pulmão), localizados antes do processo gargalo, para preservar sua total utilização, e ao final do sistema, para garantir o cumprimento das datas de entrega (RODRIGUES; MACKNESS, 1998).

Dessa forma o gerenciamento de restrições fundamenta-se em nove regras, que orientam operacionalmente a gestão da produção (ASKIN; GOLDBERG, 2002; MEREDITH; SHAFER, 2002):

- a) balancear (sincronizar) o fluxo e não a capacidade;
- b) os gargalos determinam a utilização dos processos não gargalo. Maximizar a utilização dos processos não gargalo somente adiciona custos, tempo ocioso e estoque;
- c) a utilização (produzir quando o material ainda não é necessário) não é igual à ativação de um processo. Produzir além da taxa de produção do gargalo gera estoque;

---

<sup>8</sup> Trabalho em progresso são os produtos entre as etapas do processo (LEAN ENTERPRISE INSTITUTE, 2008) ou seja, os estoques entre o início e fim da linha de produção (HOPP; SPEARMAN, 2000)

<sup>9</sup> *Buffer* é um estoque de proteção entre duas estações de trabalho para possíveis mudanças abruptas na demanda (LEAN ENTERPRISE INSTITUTE, 2008).

- d) uma hora perdida em um processo gargalo é uma hora perdida para o sistema inteiro;
- e) uma hora economizada em um processo não gargalo não é relevante; os gargalos governam a taxa de produção e o nível de estoque. A taxa de produção do gargalo determina as necessidades dos processos que fornecem materiais ao gargalo e a máxima quantidade de material disponível para os processos posteriores a ele;
- f) o tamanho do lote de transferência (lote de transferências de produtos entre diferentes tarefas) não necessita e não deve ser igual ao lote de processo (lote de produção em cada atividade). Pode ser vantajoso para o tempo de atravessamento mover o material em lotes menores;
- g) o tamanho dos lotes de processo deveriam ser variáveis, não fixos; e
- h) a programação da produção deve ser estabelecida considerando todas as restrições simultaneamente e não somente uma restrição.

## 2.4 O PROJETO DO SISTEMA DE PRODUÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

No contexto da construção civil, o Projeto do Sistema de Produção é a primeira atividade a ser realizada para estruturar os processos e recursos para a execução de empreendimentos (BALLARD *et al.*, 2001a, 2001b; KOSKELA; BALLARD, 2004). O escopo do PSP engloba desde a definição da organização necessária para a realização do empreendimento até o projeto de operações (BALLARD *et al.*, 2001b), devendo criar condições para o controle e melhoria do sistema (BALLARD *et al.*, 2001a).

A seguir, são apresentados alguns trabalhos desenvolvidos no contexto da construção civil que descrevem processos gerenciais que são similares ao PSP. Ao final, é descrito um modelo de PSP que foi desenvolvido no NORIE-UFRGS, o qual serviu de ponto de partida para a realização desta pesquisa.

## 2.5 TRABALHOS QUE TRATAM DE DECISÕES DO ESCOPO DO PSP NA CONSTRUÇÃO CIVIL

### 2.5.1 Projeto para a Produção

Projeto para Produção é, segundo Melhado (1994), um “conjunto de elementos de projeto elaborados de forma simultânea ao detalhamento do projeto executivo, para utilização no âmbito das atividades de produção em obra, contendo as definições de: disposição e sequencia de atividades de obra e frentes de serviço; uso de equipamentos; arranjo e evolução do canteiro; dentre outros itens vinculados às características e recursos próprios da empresa construtora”. Para que esse tipo de projeto possa definir adequadamente a realização da obra, deve conter diretrizes que levem em conta as características do sistema de produção da empresa (MELHADO; FABRICIO, 1998). Melhado e Fabricio (1998) enfatizam o desenvolvimento de projeto de processos críticos de cada empreendimento, simultaneamente com a geração das soluções de produto, sempre focando na construtibilidade dos projetos e na melhoria da eficiência da obra.

Segundo Souza e Melhado (1998), o projeto para produção tem por objetivo garantir que as soluções adotadas tenham sido suficientemente abrangentes, integradas e detalhadas e que, após terminado o projeto, a execução ocorra de forma contínua, sem alterações e improvisações. Estes mesmo autores sugerem que este projeto deve estar desenvolvido desde as primeiras fases do processo de projeto e, desse modo, pode se tornar uma forma efetiva de transmitir para a obra como aplicar a tecnologia envolvida, evitando que as decisões sejam tomadas no canteiro.

O conceito de projeto para produção, proposto por Melhado (1994), define claramente o papel que o projeto de processo deve ter quando realizado simultaneamente com o projeto do produto, tendo uma grande influência na construtibilidade. O mesmo ainda define detalhadamente como o sistema de produção deve ser determinado para ser executado em obra, tornando-se um projeto de processos e não uma definição estratégica de execução do empreendimento. Por esse motivo, para cada novo processo existente na obra um novo projeto para produção deve ser formalizado.

### 2.5.2 *Phase Scheduling*

Ballard (2000b) propôs um método participativo de definir as grandes fases de planejamento de empreendimento, chamado de *Phase Scheduling* (Programação por Fases). Este método foi

desenvolvido para produzir um plano focado na geração de valor para o cliente e que todos os envolvidos compreendam e o apoiem. Neste plano, as atividades são definidas retroativamente a partir de metas intermediárias a serem atingidas (por exemplo, a conclusão de uma etapa da obra) (BALLARD, 2000b).

Quanto ao **caráter participativo**, a elaboração do planejamento envolve representantes de todas as organizações que realizam atividades durante a fase que está sendo planejada e a participação deve ser ativa, Portanto a equipe envolvida deve trazer programações relevantes, desenhos e seus contratos para as reuniões de planejamento (BALLARD, 2000b). O processo de elaboração do *Phase Scheduling* apresenta as seguintes etapas (BALLARD, 2000b):

- a) definir as atividades que serão incluídas na fase;
- b) determinar a data de término para a fase e qualquer entrega intermediária de uma fase anterior ou subsequente;
- c) usando lembretes adesivos (*post it*), a equipe de planejamento desenvolve a rede de atividades necessária para completar a fase, trabalhando de trás para a frente e incorporando metas intermediárias;
- d) aplicar durações para cada atividade sem utilizar tempos para contingências ou flutuações nas durações das estimativas;
- e) examinar a lógica para a duração mais curta;
- f) determinar a data mais cedo possível para a fase;
- g) se existe tempo sobrando após comparar o tempo entre início e fim das durações das atividades, decidir quais atividades serão utilizadas *buffer* com tempo adicional respondendo as seguintes perguntas/etapas: (a) qual duração de atividade é a mais frágil? (b) estabeleça uma ordem de prioridade para as atividades mais frágeis através do grau de incerteza; e (c) aloque tempo disponível as atividades mais frágeis na ordem de prioridade estabelecida;
- h) a equipe está confortável com o tempo disponível que está colocado em forma de *buffer* para garantir o término das metas? Se não, ou replaneje ou modifique as metas quando necessárias e possíveis de serem atingidas; e
- i) se existe tempo disponível, decida entre acelerar o cronograma ou usar o tempo disponível para aumentar a probabilidade de terminar no prazo.

Assim que a equipe de planejamento concordar com a fase programada, o cronograma e as atividades representadas passam a ter força de contrato, e poderão ser modificadas apenas sob três condições (BALLARD, 2000b): (a) mudança no contrato inicial; (b) as atividades no planejamento não podem ser realizadas sem a violação das regras do *Last Planner*<sup>10</sup>; (c) alguém propõem uma ideia melhor de execução e todos os membros da equipe concordam com a modificação. Knapp, Charron e Howell (2007) apontaram os benefícios do *phase scheduling*, com base na experiência de seis empreendimentos diferentes:

- a) a equipe do projeto ganha um maior entendimento do valor do projeto;
- b) a equipe tem a oportunidade de conhecer e ficar confortável com os outros integrantes da equipe;
- c) cada membro sabe o que cada um necessita para realizar as atividades, ou seja, o que é importante para o sucesso de cada um;
- d) o trabalho é planejado para que todos compreendam e concordem com o que deve ser feito e quando. As equipes sabem como se preparar para fazer as promessas necessárias para executar o trabalho de acordo com planejado.
- e) uma sequência lógica é planejada para o trabalho e durações razoáveis são designadas para cada atividade;
- f) o cronograma criado pela equipe de planejamento é possível de ser realizado; e
- g) a equipe sabe de onde surgiu o plano de médio prazo usado para analisar restrições.

Enfim, os participantes não apenas definem as suas atividades, mas também estabelecem e descrevem o que deve ser entregue para a atividade posterior e o que necessitam das atividades anteriores, ou seja, discutem os *hand off* necessários e entregues (KNAPP; CHARRON; HOWELL, 2007). Com a discussão de *hand off*, os participantes compreendem o impacto de cada atividade e negociam a melhor forma de atingir os objetivos do projeto (KNAPP; CHARRON; HOWELL, 2007). Enfim, este tipo de plano envolve muitas decisões de um PSP.

---

<sup>10</sup>*Last Planner*, desenvolvido por Ballard (1994), é um sistema de planejamento e controle da produção baseado na produção enxuta, o qual define três níveis de planejamento – longo, médio e curto prazo. No nível de curto prazo são decididas as atividades específicas que são atribuídas às diferentes equipes em um curto período de tempo, normalmente uma semana, e é dada grande ênfase à função controle, pois se espera que de uma semana para a outra não se repitam os mesmos problemas, de forma a aumentar a produtividade das equipes através do aprendizado contínuo.

### 2.5.3 Work structuring

A estruturação do trabalho, ou *Work Structuring*, é uma abordagem para projeto de operações e processos de produção em alinhamento com o projeto do produto, a estruturação da cadeia de suprimentos, a alocação dos recursos e esforços de projeto para a montagem (BALLARD, 2000a). A estruturação do trabalho faz parte do *Lean Project Delivery System* (LPDS) desenvolvido pela *Lean Construction Institute* (LCI) (BALLARD, 2000a). Por esta razão, são adotados alguns princípios da filosofia *Lean*, entre os quais destacam-se os seguintes (BALLARD, 2000a): (a) os intervenientes são envolvidos no planejamento e projeto antecipadamente através de equipes multifuncionais; (b) o controle do projeto tem o papel pró ativo ao contrário da simples detecção de erros de executado; (d) busca-se tornar o fluxo de trabalho confiável ao contrário de tentar otimizar a produtividade das equipes individuais; (e) o conceito de produção puxada é usado para gerenciar alguns fluxos de materiais e informações através de redes de especialistas; (f) capacidade e estoques são usados para absorver a variabilidade; e (g) ciclos de *feedback* são incorporados em todos os níveis, dedicados a ajustes rápidos no sistemas.

Como as decisões de estruturação do trabalho são realizadas ao longo de todas as fases do projeto (BALLARD, 2000a), o grande desafio é reconhecer as questões que emergem, especialmente durante o desenvolvimento do projeto (TSAO; TOMMELEIN, 2004). O objetivo da estruturação do trabalho é fazer o fluxo de trabalho mais confiável e rápido, ao mesmo tempo que o valor é gerado para o cliente (TSAO *et al.*, 2000).

A estruturação do trabalho vê o sistema de produção como sendo constituído de **unidades de produção**, que podem ser um indivíduo ou grupo desenvolvendo uma tarefa, e **partes do trabalho**, que são as etapas do trabalho que podem ser entregues de uma unidade de produção para a outra (TSAO *et al.*, 2000). Assim, o processo de estruturação do trabalho deve responder as seguintes perguntas:

- a) qual será a quantidade de trabalho designada para cada especialista? (BALLARD, 2000a)
- b) como cada parte do trabalho será sequenciada? (BALLARD, 2000a)
- c) como será liberado o trabalho de uma unidade de produção para a outra? (BALLARD, 2000a)

- d) as unidades de produção consecutivas poderão realizar o trabalho em fluxo contínuo ou o trabalho deverá ser dissociado? (TSAO *et al.*, 2000)
- e) onde serão necessários estoques de trabalho e como eles serão dimensionados? (BALLARD, 2000a)
- f) quando cada parte do trabalho será realizada? (BALLARD, 2000a).

#### 2.5.4 Location-Based Scheduling (LBS)

Kenley (2004) salienta que o *location-based scheduling* (programação baseada na localização) fornece uma grande vantagem para planejar e controlar o fluxo de equipes e de trabalho ao longo da construção de um empreendimento. O LBS utiliza a técnica da linha de balanço, a qual permite explicitar os fluxos das equipes com o objetivo de torná-los ininterruptos (KANKAINEN; SEPPANEN, 2003). A Figura 4 apresenta um exemplo dessa técnica de planejamento, sendo que o eixo x representa o tempo e o eixo y as unidades repetitivas, e cada elemento colorido representa uma atividade distinta.

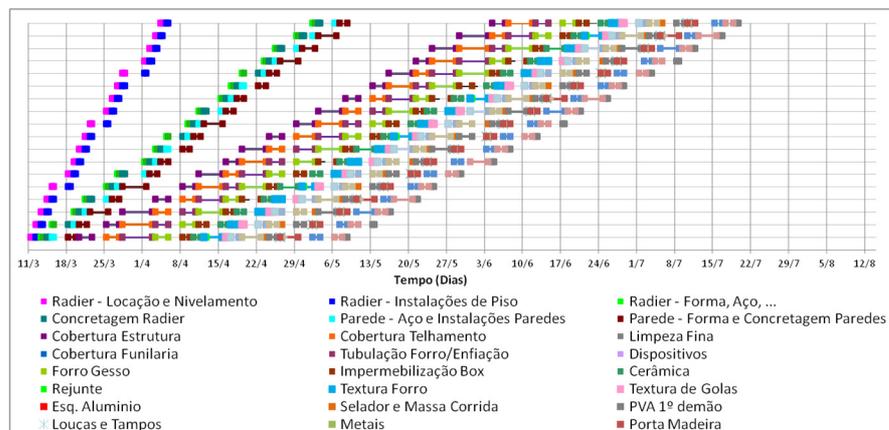


Figura 4: exemplo de linha de balanço, elaborado pela autora deste trabalho

A utilização do LBS traz como benefícios (KANKAINEN; SEPPANEN, 2003): (a) continuidade no trabalho das equipes de produção, fazendo com que estas sejam mantidas no canteiro, (b) aumento de produtividade, à medida que as equipes estão menos propensas a interferir umas nas outras; e (c) *buffers* podem ser facilmente planejados e analisados.

Kemmer, Heineck e Alves (2008) apresentam diferentes princípios da produção enxuta que aplicados através do LBS:

- a) eliminação de perdas: já que o trabalho é programado para a continuidade das equipes de trabalho;

- b) redução de variações: agrupando as atividades relacionadas, o trabalho pode ser realizado na forma de um *layout* celular. Como as equipes trabalham mais próximas, elas podem melhorar a qualidade das atividades e resolver os problemas a medida que forem sendo encontrados;
- c) gestão visual: a essência da técnica de linha de balanço é a capacidade de transparecer os objetivos, o que pode favorecer a aprendizagem no planejamento e controle e a compreensão das informações pelos envolvidos; e
- d) sequenciamento do planejamento: o LBS produz um planejamento focado no sequenciamento das operações objetivando uma maior produtividade.

Dessa forma, o *location-based scheduling* foca na transparência que a linha de balanço pode trazer ao sistema de produção, com características repetitivas, e nas análises de fluxo de trabalho que a mesma permite. Entretanto não descreve como será a movimentação de equipamentos e a localização espacial das equipes de trabalho no canteiro.

### **2.5.5 Planejamento de Fluxo de Trabalho**

Saffaro e Paula (2002) propuseram a elaboração de um planejamento de fluxo de trabalho, o qual está presente como uma atividade no modelo de planejamento e controle da produção desenvolvido por Bernardes (2001).

O plano de fluxo de trabalho é apresentado como roteiro que deve servir de guia de execução e gestão de estratégias de fluxo do projeto (SAFFARO; PAULA, 2002). Dessa forma o roteiro proposto consiste no registro do escopo de decisões suas variações, os critérios para tomada de decisão e decisões tomadas (SAFFARO; PAULA, 2002).

O roteiro apresenta algumas similaridades com as decisões que formam o escopo de decisão do PSP, como (SAFFARO; PAULA, 2002): (a) a preocupação em definir a estratégia de execução (sequências e trajetórias); (b) discussão das tecnologias construtivas utilizadas; (c) análise e seleção de equipamentos e máquinas; (d) fornecimento de materiais; e (e) contratação de mão de obra. Entretanto, conforme os autores, a partir da utilização da técnica da linha de balanço, para elaboração do plano de longo prazo, foram efetivadas as decisões relativas aos fluxos físicos (fluxo de trabalho e de materiais), havendo a necessidade de revisão de algumas decisões, em especial quanto à estratégia de execução do empreendimento (SAFFARO; PAULA, 2002).

Dessa forma, de acordo com Saffaro e Paula (2002), não há uma clara demarcação entre a formulação do plano do fluxo de trabalho e a elaboração do plano de longo prazo, havendo a sobreposição das atividades, já que o amadurecimento de algumas decisões só vem a ocorrer durante a formulação do plano de longo prazo.

## 2.6 MODELOS PARA A ELABORAÇÃO DO PSP NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO

### 2.6.1 PSP em empreendimentos Habitacionais de Interesse Social

Schramm (2004) propõem um modelo do projeto do sistema de produção para empreendimentos habitacionais de interesse social (HIS), os quais apresentam características peculiares, como: grande volume de obra, necessidade de gerenciar inúmeras equipes, prazos reduzidos, alta repetitividade e pequena margem de lucro. O modelo é dividido em duas unidades de análise - unidade base ou unidade repetitiva e empreendimento - e seis etapas iterativas, com um fluxo de decisão e revisão, Figura 5. No processo de elaboração do PSP busca-se discutir e analisar diferentes alternativas de estruturação e organização dos processos e recursos produtivos que constituem o sistema de produção do empreendimento (SCHRAMM, 2009). Um dos principais benefícios do PSP é que as decisões dele envolvem, além da equipe de planejamento da empresa, principais fornecedores e subcontratados, fazendo com que estes possam discutir e negociar principais interdependências e necessidades (SCHRAMM, 2009).

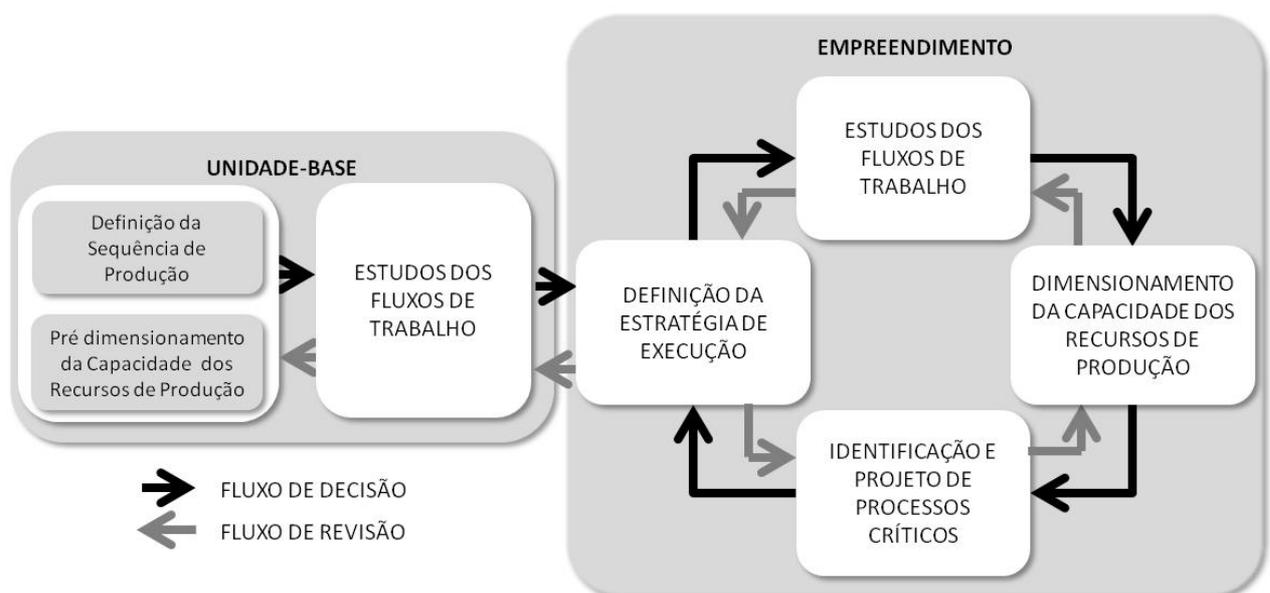


Figura 5: PSP para habitação de interesse social (SCHRAMM, 2004)

O Quadro 1 apresenta um resumo dessas etapas, bem como ferramentas, estudos e decisões realizadas. A seguir, são descritas as etapas do PSP propostas por Schramm (2004):

- a) **definição da sequência de execução e dimensionamento dos recursos de produção da unidade base:** esta está ligada a unidade base, que corresponde a unidade repetitiva do empreendimento que pode ser um pavimento, um apartamento, uma casa ou um sobrado. São coletadas informações sobre durações de atividades, equipamentos e mão de obra necessária. Como produto dessa etapa tem-se o diagrama de precedência para a unidade base e uma planilha de pré-dimensionamento de equipamentos e mão de obra.
- b) **estudo dos fluxos de trabalho da unidade base:** busca-se definir fluxos de trabalho para as equipes na unidade base, estabelecendo ritmos de produção e trabalho de máquinas e mão de obra, tentando identificar interferência entre as mesmas. Pode-se fazer uso da técnica da linha de balanço que é uma representação gráfica do espaço (eixo das ordenadas) versus tempo (eixo das abscissas).
- c) **definição da estratégia de execução do empreendimento:** a partir dessa etapa, a unidade de análise passa a ser o empreendimento como um todo. O layout do empreendimento é dividido em pequenas zonas, com um determinado número de unidades habitacionais, para as quais serão alocadas equipes de trabalho que devem desenvolver suas atividades em um fluxo contínuo de trabalho seguindo um ritmo preestabelecido. Como produto final, é realizada uma representação gráfica do canteiro com a sequência de execução das unidades do empreendimento, ou seja, o plano de ataque.
- d) **estudo dos fluxos de trabalho no empreendimento:** com o fluxo da unidade base e plano de ataque do empreendimento é realizado o estudo de fluxos do empreendimento que também pode ser documentado com a linha de balanço. Procura-se considerar um plano que permita um fluxo ininterrupto das equipes de produção, sincronizando os processos produtivos.
- e) **dimensionamento da capacidade dos equipamentos e mão de obra:** com a determinação dos fluxos de trabalho do empreendimento e o pré-dimensionamento da mão de obra e equipamento é possível determinar a capacidade final dos recursos de produção. Como produto dessa etapa, um histograma de recursos é formalizado, alocando os recursos ao longo da execução do empreendimento.

- f) **identificação e projeto dos processos críticos:** essa busca minimizar os efeitos negativos dos processos críticos sobre o sistema como um todo. Processos críticos representam os gargalos da produção e com a sua identificação é possível projetá-los para reduzir a capacidade de produção do sistema como um todo. Como produtos desta fase, a planilha de dimensionamento de capacidade e uma representação gráfica do layout do processo crítico são elaboradas.

Foco	Etapa	Ferramentas ou Técnicas	Informações Necessárias	Envolvidos
Unidade base	<b>Definição da Sequência de Execução e Dimensionamento de Equipamentos e Mão de obra</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ diagrama de precedência</li> <li>✓ planilha de pré-dimensionamento de recursos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ tecnologias construtivas</li> <li>✓ precedências entre processos</li> <li>✓ disponibilidade de recursos de produção</li> <li>✓ duração dos processos</li> <li>✓ decisões de fazer ou comprar</li> </ul>	Equipe de Produção do Empreendimento
	<b>Estudo de Fluxos de Trabalho</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ linha de balanço da unidade base</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ sequência de execução</li> <li>✓ ritmos de produção</li> </ul>	
Empreendimento	<b>Definição do Plano de Ataque</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ plano de ataque do empreendimento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ número de frentes de trabalho simultâneas</li> <li>✓ necessidade de sincronização entre processos</li> <li>✓ capacidade preliminar de produção dos processos</li> <li>✓ análise de viabilidade financeira</li> </ul>	Equipe de Produção do Empreendimento
Empreendimento	<b>Estudos dos Fluxos de Trabalho</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ linha de balanço do empreendimento</li> <li>✓ diagrama de sincronia</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ fluxos de trabalho da unidade base</li> <li>✓ plano de ataque do Empreendimento</li> <li>✓ ritmos de produção</li> </ul>	Equipe de Produção do Empreendimento
	<b>Dimensionamento da Capacidade dos Equipamentos e Mão de obra</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ diagrama de sequenciamento</li> <li>✓ histograma de recursos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ fluxo de trabalho do empreendimento</li> <li>✓ necessidade de mão de obra e equipamentos dos processos</li> </ul>	
	<b>Projeto de Processos Críticos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ estudo de layout e de capacidade do processo</li> <li>✓ planilha de definição da sequência de execução do processo</li> <li>✓ planilha de avaliação da capacidade versus demanda</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ demandas do empreendimento</li> <li>✓ capacidade de produção dos processos</li> <li>✓ tecnologias empregadas</li> <li>✓ capacidade dos fornecedores</li> <li>✓ equipamentos empregados</li> </ul>	

Quadro 1: resumo das decisões, ferramentas e participantes do PSP para HIS (SCHRAMM, 2004)

## 2.6.2 PSP em Empreendimentos Complexos

Rodrigues (2006) propôs um método de elaboração do projeto do sistema de produção para empreendimentos complexos. Este é uma evolução natural do modelo de PSP para HIS de Schramm (2004). Entretanto a mesmo aplica o PSP para projetos que apresentam alto grau de incertezas, grande número de partes envolvidas e elevada interdependência entre os processos. Essas características tornam essencial a elaboração evolutiva do PSP, de acordo com maior precisão das informações. Dessa forma o PSP deve ter início antes da execução do empreendimento, devendo ser reavaliado ao longo de sua execução, devido ao maior grau de incerteza dos empreendimentos complexos em relação aos empreendimentos HIS (RODRIGUES, 2006).

O mesmo acrescenta discussões quanto quando realizar o PSP, em que etapa do projeto; quando deve haver a reavaliação das decisões já tomadas; quais requisitos devem ser explicitados pelos clientes e como definir a unidade base quando o empreendimento não apresenta unidades de repetição. Assim, o PSP para empreendimentos complexos deve ser elaborado em três fases distintas (RODRIGUES, 2006): (a) orçamento e contratação: abrangendo todo o empreendimento, mas realizando decisões amplas e pouco detalhadas. (b) inicial da obra: realizando a reavaliar as decisões tomadas na fase de orçamento e contratação, com base em novas informações que surgirem; e (c) etapas do empreendimento, que podem ser definidas depois que os fornecedores forem contratados ou a partir de novas definições nos projetos.

Rodrigues (2006) também discute a necessidade da ampla participação de intervenientes nas reuniões, incluindo o engenheiro e o mestre de obras do empreendimento, os gerentes de produção dos fornecedores, os encarregados por cada processo e, em alguns casos, um representante do cliente. A seguir são descritas as etapas do PSP para empreendimentos complexos os quais são representados na Figura 6 (RODRIGUES, 2006):

- a) **captação das necessidades dos clientes:** ocorre nas fases de orçamento, contratação e na fase inicial do empreendimento, e eventualmente as necessidades dos clientes são reavaliadas nas etapas do empreendimento. Tem o objetivo de captar as necessidades dos clientes e projetar o sistema de produção voltado para o atendimento destes requisitos, diminuindo, assim a incidência de modificações tardias de projeto. Os requisitos que devem ser captados são: (a) requisitos de entrega, o prazo final e como o cliente deseja receber a obra (por partes ou totalmente terminada); (b) requisitos de

qualidade exigidos pelo cliente e garantir que eles sejam cumpridos; (c) requisitos de segurança: em alguns casos, a empresa contratante tem normas próprias de segurança, que devem ser analisados e adaptado à sua forma de trabalho; (d) requisitos de espaço físico: muitas vezes, os empreendimentos complexos são executados em locais em funcionamento, tornando-se restrições de espaço físico para estoque de materiais e vestiários.

- b) **definição da sequência de execução do empreendimento:** deve-se analisar os projetos e as tecnologias a serem utilizadas, buscando a sequência de execução mais adequada, de forma a facilitar a obtenção de um fluxo contínuo dos processos, reduzir o retrabalho e auxiliar na identificação das interdependências entre os processos. Nesta etapa, é preciso analisar o tempo de ciclo dos processos e o ritmo que eles terão, pois dependendo do prazo final da obra, o ritmo dos processos e do tamanho do lote de produção, é possível definir quais deles necessitam ser executados em paralelo. Deve ser realizada na fase de orçamento e de contratação e reavaliada na fase inicial da obra. Os fornecedores devem, quando possível, participar da elaboração do PSP desde a fase de orçamento, auxiliando na identificação de melhores soluções para execução do empreendimento.
- c) **definição da unidade-base:** o objetivo desta etapa é dividir o empreendimento em módulos ou unidades-base de produção, facilitando a visualização das áreas a serem trabalhadas e a definição da estratégia de ataque. Mas em empreendimentos complexos nem sempre é possível encontrar repetitividade nos lotes de produção, por isso tenta-se induzi-la levando em conta o grau de intensidade e complexidade dos processos nos diferentes ambientes. Esta divisão pode ocorrer devido aos fatores: (a) nível de complexidade dos principais processos nos ambientes; (b) repetitividade dos lotes de produção; (c) exigência do cliente relacionada à entrega do empreendimento; e (d) detalhes arquitetônicos, como, por exemplo, juntas de dilatações que dividam naturalmente o empreendimento. Esta definição é feita pelos engenheiros da obra, podendo ser auxiliado pelo mestre, e exige conhecimento dos projetos e das necessidades dos clientes em relação à entrega da obra. Deve ser realizada na fase de orçamento e de contratação e reavaliada na fase inicial da obra.
- d) **dimensionamento da capacidade de recursos de produção:** o objetivo desse estágio é elaborar um dimensionamento da capacidade dos recursos e analisar se eles são suficientes para satisfazer as necessidades de custos e prazo para a conclusão do

empreendimento. Iniciada nas fases de orçamento e de contratação, o mesmo deve ser reavaliado na fase inicial da obra, acrescentando-se as possíveis modificações e informações novas. Realizado inicialmente para a unidade-base e, conforme a estratégia de ataque adotada, estendido para todo o empreendimento. Ao final dessa etapa deve-se determinar os seguintes itens: (i) tempo de execução dos principais processos; (ii) recursos necessários para a execução dos processos (mão de obra e equipamentos); e (iii) lotes de produção. As informações obtidas nesta etapa auxiliam no estudo dos fluxos de trabalho e ajudam na elaboração do projeto do leiaute do empreendimento.

- e) **estudo dos fluxos de trabalho:** tem o objetivo de sincronizar os fluxos de trabalho dos principais processos, identificando as interdependências entre eles e buscando o fluxo contínuo da produção. Com base no prazo de entrega do projeto e nas informações obtidas no dimensionamento da capacidade de recursos, determina-se a estratégia de ataque do empreendimento, assim como o número de equipes necessárias para que ele seja executado. Devem participar os principais envolvidos no processo de execução do empreendimento e a ferramenta utilizada nesse estudo é a linha de balanço, devido a boa visualização dos fluxos e facilidade em identificar interferências entre as equipes de trabalho. O estudo dos fluxos deve ser elaborado para todo o empreendimento, mas não devem ser excessivamente detalhadas, devido à complexidade do ambiente. Após a execução da linha de balanço, são identificadas as grandes fases do empreendimento e, no início de cada fase, este estudo deve ser revisto, acrescentando-se as informações de novos fornecedores e revendo os prazos para a execução do empreendimento.
- f) **estudo dos processos críticos:** deve-se realizar um esforço maior de definição da sequência, métodos e equipamentos para a execução desses processos, de forma a buscar a melhoria de desempenho da produção. Várias ferramentas podem ser utilizadas para auxiliar nesse estudo, como o CAD 3D e a prototipagem física. Estas ferramentas podem ser utilizadas, quando necessário, como forma de antecipar a identificação dos problemas de processo.

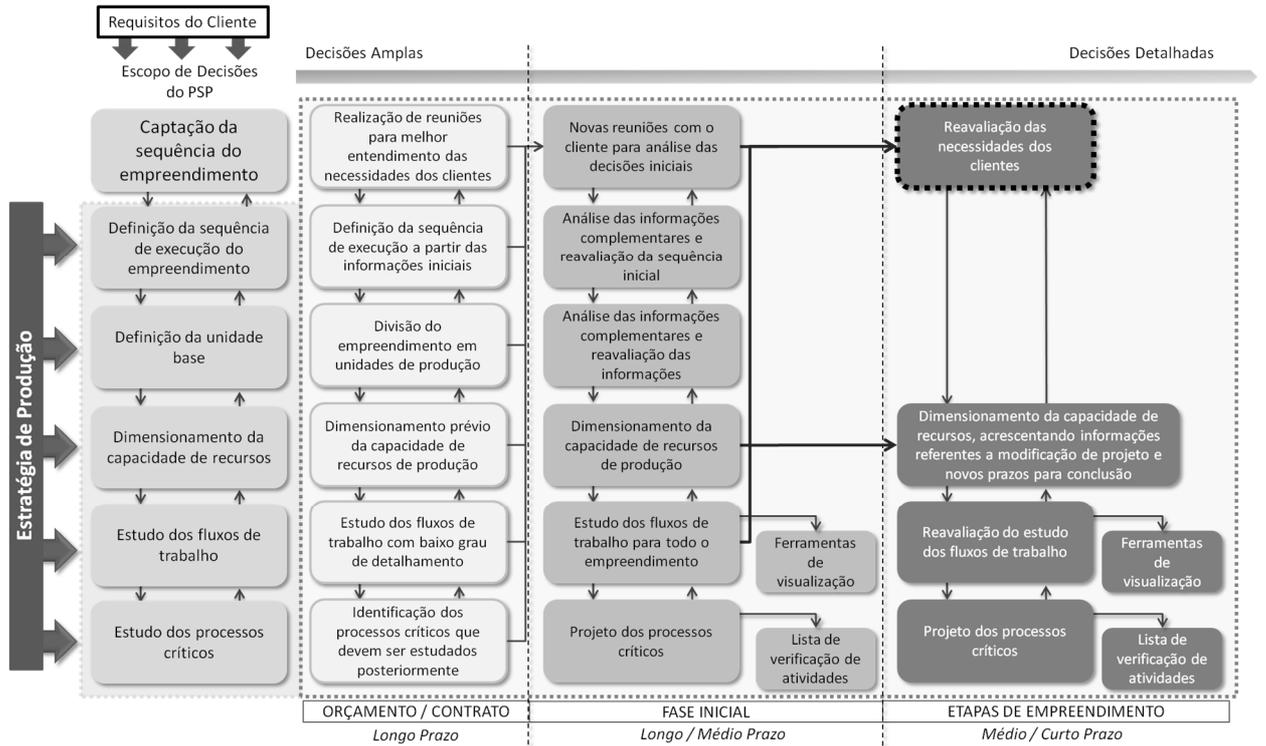


Figura 6: modelo de PSP para empreendimentos complexos (RODRIGUES, 2006)

### 3. MODELAGEM DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO

Inicialmente, são tratados alguns conceitos básicos, tais como sistemas, modelo e modelagem. Em seguida é abordado a forma de modelagem do produto utilizada nessa dissertação, o BIM. Depois, discute-se a modelagem 4D e a simulação computacional, apresentando conceitos básicos e etapas de elaboração. Ao final, serão apresentados dois trabalhos que utilizaram essas duas modelagens para a elaboração do PSP.

#### 3.1 TIPOS DE SISTEMAS

Um sistema é definido como uma coleção de entidades que agem ou interagem em conjunto para a realização de algum fim lógico (LAW; KELTON, 2000). Por esse motivo, é importante entender os tipos de sistemas presentes na literatura. A Figura 7 apresenta uma classificação de tipos de sistema. Na sequência, é realizada a descrição das diferentes sistemas, segundo Law e Kelton (2000):

- a) **estático:** representa um sistema em um momento particular.
- b) **dinâmico:** representa um sistema como este evolui durante o tempo dependendo das características do problema sob estudo. O avanço do tempo pode ser feito de duas formas: a incrementos constantes ou variáveis.
- c) **determinístico:** caracteriza-se por apresentar todas as variáveis determinísticas e o problema descrito pode – e deve – ser estudado analiticamente. Assim, o resultado é “determinado”, pois o conjunto de quantidades e relacionamentos dos dados é especificado.
- d) **estocástico (ou probabilístico):** baseia-se geralmente em uma descrição mais próxima e mais complexa da realidade, o modelo contém uma ou mais variáveis aleatórias, as quais representadas através de amostras. Esse tipo de sistema tem o objetivo de reproduzir o comportamento probabilístico, pois as variáveis produzem resultados aleatórios.
- e) **discreto:** a passagem do tempo é feita em incrementos mensuráveis entre eventos consecutivos supõe-se que o estado do sistema não se altera durante este intervalo. Este é um dos métodos mais frequentemente utilizados no apoio à tomada de decisão.

- f) **contínuo:** a passagem do tempo é vista como se fosse de fato contínuo, muito embora seja feita a pequenos intervalos de tempo, por restrição do método empregado e do próprio computador é muito útil no estudo de sistemas como operações de refinarias de petróleo, já que são, em geral, de natureza determinística.

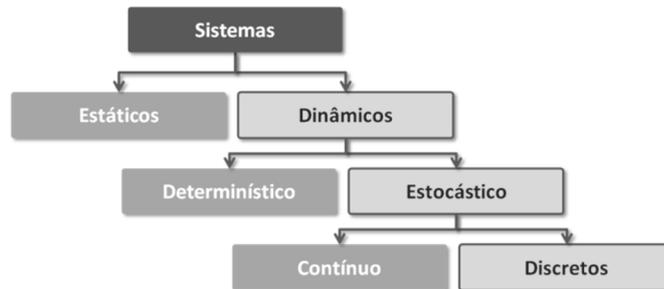


Figura 7: tipos de sistemas adaptado de Law e Kelton (2000)

### 3.2 MODELO

O Collins English Dictionary (2013) define modelo como uma representação ou descrição simplificada de um sistema ou de entidades complexas, especialmente as projetadas para facilitar cálculos ou previsões. Essa definição salienta que (WILLIAMS, 2002): (a) um modelo descreve ou representa algo real; (b) um modelo simplifica entidades reais; (c) a produção do modelo tem um propósito, geralmente para realizar algum cálculo ou previsão do comportamento da entidade. Segundo Price e John (2004), os modelos podem ser caracterizados de acordo com o uso a que se destinam. Assim, os modelos podem ser (PRICE; JOHN, 2004):

- a) **modelos descritivos:** modelos que explicam ou descrevem um problema, fenômeno ou sistema. Um organograma é exemplo desse tipo de modelo. Tal modelo é útil para entendimento e comunicação sobre o sistema;
- b) **modelos prescritivos:** são modelos que indicam cursos de ação de acordo com as necessidades. Os modelos de programação linear ou de otimização são exemplos desse tipo de modelo;
- c) **modelos preditivos:** são modelos que indicam como o mundo pode evoluir à luz de certas decisões ou ações. Jogos de guerra, por exemplo, são projetados para ilustrar as consequências de estratégias de combate específicas ou decisões sobre o mix de combatentes.

Existe a necessidade de manipular o modelo, para explorar alternativas reais ou para explicar por que ocorreram diferenças entre essas alternativas distintas, uma vez que o modelo não

apenas define as partes ou elementos conceituais de um todo, como também define a relação entre os conceitos (WILLIAMS, 2002). Segundo Williams (2002), para poder manipular o modelo, é necessário que suas definições sejam manipuláveis em uma linguagem formal, consistente, claras e precisa. A simplificação é inerente à modelagem, mas não significa uma desvantagem, já que apenas abstraímos os elementos chave da realidade para obtermos as informações que necessitamos (WILLIAMS, 2002).

### 3.3 MODELAGEM

Pidd<sup>11</sup> (1996 *apud* WILLIAMS, 2002) relata dois propósitos chave da modelagem na ciência da gestão: (a) a tomada de decisão, explicitando os propósitos para ajudar o tomador de decisão a fazer a melhor escolha; e (b) o controle, para ajudar gestor a controlar o sistema com eficácia. Entretanto, segundo Williams (2002), é necessário acrescentar mais um propósito, que é entender melhor o sistema. Para projetos complexos o entendimento das entidades do sistema e o seu comportamento é fundamental, pois considerando apenas as propriedades das partes não se pode compreender o todo diretamente (WILLIAMS, 2002).

Assim que o modelo é construído, o mesmo deve permitir análises de cenários e estudos do tipo “e se?” (WILLIAMS, 2002). Essa experimentação, que pode ser impossível no mundo real, pode trazer novas percepções das características do sistema que o modelo representa (FORRESTER, 1961). Dessa forma, através da modelagem de um sistema complexo, muito pode ser aprendido sobre as interações das variáveis do sistema, comparado à manipulação no sistema real (FORRESTER, 1961). Schultz e Sullivan<sup>12</sup> (1972 *apud* WILLIAMS, 2002) descrevem quatro vantagens do processo de modelagem:

- a) **confrontação:** ao invés de permitir que suposições genéricas sobre determinado sistema sejam utilizadas na tomada de decisão, essas suposições serão confrontadas e testadas assegurando que as mesmas são reais e verdadeiras;
- b) **explicação:** durante a modelagem, as premissas do sistema serão explicitadas para construir o modelo; assim o processo de modelagem requer que o os gestores do sistema definam-nas explicitamente;

---

<sup>11</sup>PIDD, M. **Tools for Thinking: Modelling in Management Science**. John Wiley: Chichester. 1996.

<sup>12</sup> Schultz, R. L.; Sullivan, E. M. Developments in simulation in social and administrative science. In: **Simulation in social and administrative science: overviews and case examples** (ed. HK Guetzkow). Prentice-Hall: Englewood Cliff, NJ. 1972.

- c) **envolvimento:** o processo de construção revela lacunas de conhecimento e motiva o modelador a tentar preencher estas lacunas; e
- d) **diálogo:** a atividade de modelagem requer do analista a necessidade de lidar com pessoas de uma gama de disciplinas envolvidas no empreendimento, a qual pode iniciar o diálogo e aumentar a comunicação.

Williams (2002) acrescenta o benefício da **aprendizado ao longo do processo de modelagem**, já que, através do processo de conceituação, quantificação, experimentação e aplicação, o modelador tem a oportunidade de aprender sobre o sistema, podendo aplicar o aprendizado no sistema real.

### 3.4 BIM

O processo *Building Information Modeling* (BIM) representa os componentes do empreendimento através de objetos digitais que carregam a geometria gráfica e as informações, assim como regras paramétricas (linguagem orientada ao objeto) que permitem que sejam manipulados de uma forma inteligente. Eastman *et al.*(2011) afirmam que com o uso do BIM as informações contidas nos objetos são consistentes, não redundantes e coordenadas. Os modelos BIM são caracterizados por (EASTMAN *et al.*, 2011):

- a) componentes que são representados por objetos digitais, os quais carregam informações gráficas e atributos que são identificados pelos *software*, assim como regras paramétricas que permitem a manipulação de uma forma inteligente;
- b) componentes com informações que descrevem como os mesmos se comportam, à medida que são necessárias para análise e processos de construção; e
- c) informações consistentes e não redundantes que modificam as informações do componente em todas as visualizações (cortes, fachadas, planta baixa).

A utilização do BIM pode trazer muitas vantagens à prática corrente da gestão de projetos na construção. Segundo Leinonen *et al.*(2003), os modelos do produto – gerados pela tecnologia BIM – podem ser utilizados por diferentes sistemas computacionais para criar, editar, armazenar, recuperar e validar informações sobre a edificação. Como resultado, o modelo do produto será uma fonte comum para todos os participantes do projeto ao longo do ciclo de vida do mesmo, melhorando a comunicação sobre o produto e processo de construção (LEINONEN *et al.*, 2003).

Casos como *The Product Model and Fourth Dimension Project* (PM4D) (KAM *et al.*, 2003) descrevem a utilização do BIM nas fases de projeto e construção de empreendimentos complexos. A equipe de projeto do PM4D construiu e manteve um modelo do produto em BIM com o nível de conhecimento existente em cada uma das etapas do projeto (KAM *et al.*, 2003). Dessa forma, como principais benefícios foi o apoio que essa abordagem de modelagem do produto promoveu a equipe na realização de uma variedade de estudos de ciclo de vida em profundidade, comparação entre alternativas de desempenho térmico, custos operacionais, consumo de energia e impactos ambientais (KAM *et al.*, 2003).

Entretanto, para utilizar esse processo de modelagem durante todo o ciclo de vida do empreendimento, deve-se considerar a necessidade de interoperabilidade entre diferentes *software*. Por esta razão foi criado o formato *Industry Foundation Classes* (IFC), desenvolvido pela *International Alliance for Interoperability* (IAI). O IFC é um modelo de dados de especificação, o qual permite padronizar formas de definir as informações contidas no BIM, sendo usado para descrever as relações e propriedades de objetos da construção de edificações (U. S. GENERAL SERVICES ADMINISTRATION, 2012).

O formato do IFC é não proprietário e disponível para qualquer *software* computacional. O mesmo não padroniza a estrutura dos *software*, mas apenas troca informações entre diferentes plataformas (U. S. GENERAL SERVICES ADMINISTRATION, 2012). Dessa forma, o IFC promove uma estrutura para organização das informações, permitindo que os desenvolvedores de *software* produzam aplicativos interoperáveis, para a troca de informações de objetos e processos, criando uma linguagem de compartilhamento entre diferentes disciplinas de edificações (U. S. GENERAL SERVICES ADMINISTRATION, 2012).

### 3.5 MODELAGEM 4D

A modelagem 4D é a conexão entre um plano de construção e os elementos 3D do projeto do produto, tornando possível a simulação do processo de construção e mostrando como a construção e canteiro se comportam ao longo do tempo (EASTMAN *et al.*, 2011). Esse tipo de visualização permite planejar o canteiro levando em consideração a conformação espacial do mesmo. Fischer Haymaker e Liston (2003) afirmam que as ferramentas tradicionais de planejamento da construção não representam espacialmente e temporalmente o processo de

construção de forma efetiva. Estes modelos 4D permitem a visualização do processo de construção como realmente serão construídos (KOO; FISCHER, 2000).

Fischer, Haymaker e Liston (2003) afirmam que, com a utilização da modelagem 4D, mais intervenientes de um empreendimento podem compreender um plano de construção mais rapidamente em relação às técnicas tradicionais de planejamento. À medida que um número maior de pessoas envolvidas com o empreendimento compreendem a sequência de construção, estas podem trazer novas informações, que talvez não estejam explicitadas, melhorando, assim, tanto o projeto como a construção (FISCHER; HAYMAKER; LISTON, 2003). Dessa forma, o resultado da utilização da modelagem 4D, na definição do plano de construção, é um plano mais viável de ser executado (KOO; FISCHER, 2000).

Fukai (2003) acrescenta que a modelagem 4D traz uma mudança de perspectiva na comunicação dos intervenientes do projeto. Com a visualização do fluxo de construção através da modelagem 4D, os intervenientes podem antecipar interações que acontecerão durante a construção (FUKAI, 2003).

Koo e Fischer (1998) afirmam que a partir do momento em que os modelos 4D comunicam o plano por meio dos objetos, a conexão entre os aspectos temporais e físicos podem ser melhor compreendidos, aumentando a possibilidade de detectar antecipadamente problemas. Dessa forma, os modelos 4D podem ser compreendidos em três funcionalidades (KOO; FISCHER, 1998): visualização, integração e análise. Como **ferramenta de visualização**, a sequência construtiva pode ser visualizada e interpretada pelos diferentes intervenientes do projeto. Essa visualização permite a antecipação dos conflitos de tempo e espaço e a transmissão do impacto de alterações no plano. A visualização do plano através dos objetos permite que o 4D funcione como **ferramenta de integração** entre os intervenientes do projeto, formalizando as informações, auxiliando das decisões e promovendo *feedback* ao projeto. Já como **ferramenta de análise**, o 4D permite análise de custo e produtividade, antecipação de situações de risco para a segurança, alocação de recursos no canteiro e simulações.

Leinonen *et al.* (2003) descreve três abordagens para a integração dos modelos 3D e o tempo:

- a) **geração automática de modelos 4D:** alguns *softwares* são capazes de interpretar as informações geométricas em 3D e produzir um plano de processo, mostrando a sequência de execução;

- b) **conexão do modelo geométrico 3D com o plano:** consiste na conexão manual das informações de plano aos componentes do modelo 3D; e
- c) **abordagem lego:** desenvolvimento da modelagem 4D através de objetos de bibliotecas, utilizando realidade virtual.

Este trabalho irá utilizar a segunda abordagem descrita Leinonen *et al.*(2003), já que esta abordagem é a utilizada pelos *software* comerciais disponíveis no mercado.

### 3.5.1 Processo de modelagem 4D

Os primeiros modelos 4D foram inicialmente desenvolvidos na década de 80 (EASTMAN *et al.*, 2011). Estas primeiras utilizações adotaram ferramentas 3D e construíram manualmente os modelos 4D combinando fotografias virtuais de cada fase ou período de tempo. Ferramentas comerciais para a modelagem 4D foram criadas no fim da década de 90, facilitando o processo e criando automaticamente conexões entre a geometria 3D e as atividades (EASTMAN *et al.*, 2011).

A modelagem 4D, através de *softwares* comerciais, pode ser realizada de diferentes formas. A Figura 8 representa o processo de modelagem que pode ser realizado de duas formas (EASTMAN *et al.*, 2011):

- a) **processo de modelagem baseado em tecnologia CAD:** os dados de entrada são projetos em 2D e o plano, os quais são transformados em um modelo 3D de acordo com as etapas e sequências de execução e, de forma dinâmica, são ligados e desligados os *layer* do modelo para criar as etapas de construção ao longo do tempo;
- b) **processo de modelagem baseado em ferramentas 3D/BIM:** a entrada do processo é o modelo BIM ou um modelo 3D do empreendimento e o plano. Durante a modelagem no *software* 4D, tanto o modelo do produto como o plano devem ser manipulados para reagrupar os elementos 3D em atividades de execução e as atividades do plano devem ser classificadas em atividades de construção, demolição ou temporárias. Logo após, os elementos 3D devem ser conectados as atividades de plano.

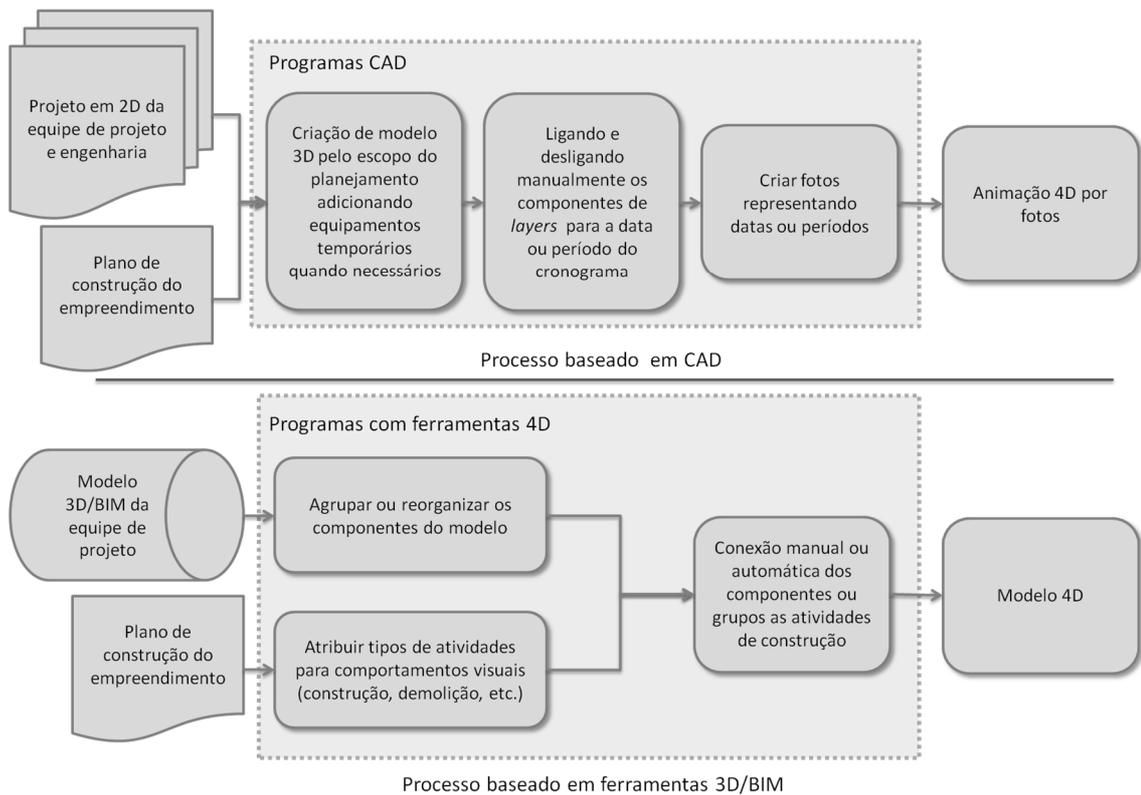


Figura 8: processos de modelagem 4D, adaptado de EASTMAN *et al.* (2011)

### 3.5.2 Parâmetros de Modelagem 4D

Um desafio importante dos gerentes da construção é definir como as equipes de trabalho, equipamentos e materiais vão utilizar os espaços limitados durante a obra. Riley<sup>13</sup> (1994 *apud* RILEY, 2003) sugere cinco requisitos para integrar a modelagem 4D ao processo de planejamento da produção:

- fornecer informações espaciais:** as decisões sobre como usar os espaços no canteiro são feitas diariamente e um modelo 4D deve fornecer essas informações para responder diferentes tipos de questões, tais como: como deve ser sequenciada uma atividade para que a mesma não interfira no trabalho de outra ao bloqueie caminhos? Onde o espaço está disponível para um determinado trabalho, material ou caminho? Quando os materiais podem ser trazidos ao posto de trabalho sem interferir com o trabalho das atividades, sem realocação ou sem serem transportados por longas distâncias?

<sup>13</sup> Riley, D. R. **Modeling the Space Behavior of Construction Activities**. PhD Tesis - Penn State University, PA. 1994.

- b) **balancear as necessidades do projeto:** a modelagem 4D deve diferenciar diferentes fatores simultaneamente, tais como produtividade, qualidade e segurança, buscando gerenciar *trade offs*, de forma a buscar um desempenho global adequado;
- c) **aumentar o nível de detalhamento quando necessário:** a modelagem 4D necessita de um aumento no nível de detalhe ao longo do progresso do projeto. Assim, o processo de planejamento deve identificar áreas onde mais discussão são necessárias;
- d) **comunicar os planos:** para que o plano seja utilizável, ele deve comunicar as decisões aos participantes; e
- e) **envolver os participantes do projeto no planejamento:** a experiência e conhecimento de especialistas e equipes de produção são valiosos no desenvolvimento criativo de soluções para o planejamento de espaços no canteiro. Assim, o benefício alcançado depende muito da inclusão de especialistas no desenvolvimento de modelos 4D e no plano de produção resultante.

Riley (2003) ainda propõe atributos para espaços de trabalho. Este autor descreve que o primeiro etapa para definir atributos é o estabelecimento do formato de modelagem e linguagem para se referir as diferentes tipos de espaços de trabalho e suas respectivas propriedades. Riley (2003) define quatro espaços necessários: espaço físico de trabalho, áreas de armazenamento de materiais, caminhos para a movimentação de materiais e pontos de acesso para descarregar materiais nos andares ou unidades produtivas.

A modelagem 4D, segundo Riley (2003), deve ser considerada como um requisito de entrada para ao planejamento. Dessa forma, o autor subdivide as informações de entrada em automáticas e do usuário. A **entrada automática** é o modelo 3D de cada área de trabalho a ser considerada no planejamento (RILEY, 2003). Segundo Riley (2003) a modelagem 3D deveria incluir os espaços de trabalho para cada objeto do modelo e um ambiente orientado ao objeto de modelagem 3D poderia permitir uma predefinição de espaços de trabalho para cada objeto. Segundo este mesmo autor, existem diferentes tipos de espaços de trabalho: unidade de trabalho, à qual se refere a trabalho em locais isolados; partes aéreas como instalações de tubulações e cabos; montagens lineares de paredes, como revestimentos de parede, instalações hidrossanitárias e elétricas; partes verticais como colunas de tubulações e *shafts* de elevadores.

Já as **entradas dos usuários** é a sequência na qual os objetos do modelo, que estão associadas a atividades de construção, se tornam ativas (RILEY, 2003). Após obter as entradas do plano,

é necessário definir os pontos de acesso e armazenamento para um ou múltiplas áreas de trabalho (RILEY, 2003). Essas posições são específicas para cada projeto e não podem ser inferidas a partir dos objetos (RILEY, 2003). A partir dessas localizações, a distância e a relação de caminhos de material entre acesso, armazenamento e espaços de trabalho podem ser calculados automaticamente (RILEY, 2003). É vantajoso definir um ponto de acesso para descarga de material e remoção de entulhos, para que a ferramenta de planejamento deduza as alternativas de caminhos (RILEY, 2003).

Como saídas da modelagem 4D, Riley (2003) comenta que o deve-se buscar um fluxo ininterrupto de trabalho, ou seja, evitar a ruptura desse fluxo devido a conflitos espaciais. A detecção automática de potenciais conflitos entre espaços de trabalho, áreas de armazenamento e caminhos de diferentes frentes de trabalho representa o objetivo central do processo de modelagem 4D, já que o mesmo permite avaliar ao longo do tempo a sequência de trabalho (RILEY, 2003).

Quanto ao nível de detalhamento do modelo 4D, Riley (2003) descreve quatro parâmetros a ser considerados para ajustar o nível de detalhamento ao longo do processo de planejamento:

- a) **intervalos de planejamento:** se refere a quantidade de tempo que será avaliada e planejada individualmente. Uma semana é um período adequado para a equipe da obra se programar e analisar o plano espacial;
- b) **uso dos espaços:** espaços que devem ser modelados preferencialmente: posto de trabalho, armazenamento e pré-fabricação. Espaços que são ocupados por apenas um dia ou menos, podem ser omitidos;
- c) **tipo de atividade:** cada atividade pode apresentar um determinado tipo de restrição que podem, também, variar ao longo das fases de construção. Dessa forma, o nível de detalhamento pode modificar ao longo do tempo de acordo com a necessidade; e
- d) **zonas de trabalho:** existem zonas que são mais favoráveis ao congestionamento de mão de obra e equipamentos. Dessa forma, estas zonas de trabalho podem ser utilizadas para priorizar o desenvolvimento do modelo 4D.

### 3.6 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A simulação é uma técnica que usa computadores para imitar ou simular diversos tipos de operações ou processos do mundo real (LAW; KELTON, 1991), a qual tem sido usada pela manufatura, indústria de serviços, defesa, saúde e serviços públicos (JAHANGIRIAN *et al.*, 2010). Também pode ser definida como uma experimentação de um sistema operacional, representada através do tempo, com o propósito de melhor entender ou melhorar esse sistema (ROBINSON, 2003). Kamat e Martinez (2000) afirmam que a simulação é uma poderosa ferramenta de avaliação que é adequada para o projeto de processos de construção com recursos complexos.

Robinson (2003) afirma que existe a necessidade de utilização da simulação computacional para discutir a natureza dos sistemas de operações, os quais estão sujeitos:

- a) variabilidade: previsível ou imprevisível;
- b) interdependência: os componentes afetam uns aos outros e é difícil prever os efeitos das interconexões em um sistema, especialmente quando a variabilidade está presente;
- c) complexidade, a qual pode ser de duas formas:
  - a. complexidade combinatória: relacionada com o número de componentes no sistema ou o número de combinações entre componentes;
  - b. complexidade dinâmica: relacionada com a interação entre componentes através do tempo, ou seja, as interconexões entre componentes normalmente não são unidirecionais, mas existem *loops* ou *feedback* de informações na direção oposta ao fluxo de transformação das operações.

Assim como existem diferentes tipos de sistemas, também existem diferentes formas de simular estes sistemas. Segundo Law e Kelton(2000), uma simulação **estática** é a representação de um sistema em um determinado tempo, enquanto a **dinâmica** representa o sistema ao longo da sua evolução no tempo. Quando a simulação não apresenta um componente probabilístico, é denominada de **determinística**, e seu resultado é determinado assim que as quantidades de entrada e a relação entre elas são definidas (LAW; KELTON, 2000). Já os modelos de simulação **estocásticos** produzem resultados aleatórios e devem, portanto, ser tratados somente como uma estimativa das reais características do modelo (LAW; KELTON, 2000). Já as simulações discreta e contínua são definidas da mesma forma que os sistemas discretos e

contínuos, respectivamente, sendo que a diferença reside na passagem do tempo (LAW; KELTON, 2000).

Dessa forma, a simulação de eventos discretos (SED) apenas registra o tempo quando há alguma mudança no sistema representado, ou seja, o sistema é modelado como uma série de eventos (ou instantes) no tempo e seu estado apenas se altera quando um novo evento acontece (ROBINSON, 2003). Essa técnica promove ao usuário informações detalhadas, tais como: gráficos de estatísticas de produção, uso de recursos e discriminação do tempo do sistema modelado (KAMAT; MARTINEZ, 2000). A mesma é adequada para a análise de processos detalhados, utilização de recursos, filas e análises relativamente de curto prazo (JAHANGIRIAN *et al.*, 2010).

No entanto, Robinson (2003) salienta que essa técnica apresenta algumas desvantagens: (a) os *softwares* de simulação não são, necessariamente, baratos e os custos de desenvolvimento e uso de modelos podem ser altos, principalmente se um consultor é utilizado no processo; (b) é uma atividade que consome tempo e os benefícios não são imediatos; (c) a maioria dos modelos de simulação requer uma grande quantidade de informações, que podem não estar disponíveis ou necessitam ser tratadas para utilização; e (d) a simulação requer algumas habilidades específicas, tais como modelagem conceitual, validação, conhecimentos de estatística, e capacidade de lidar com pessoas (por exemplo, gerentes de projetos).

Para compreender melhor o processo de modelagem da SED, é importante conhecer a terminologia básica empregada. As quais são (LAW; KELTON, 2000):

- a) **variáveis de estado:** são variáveis cujos valores determinam o estado de um sistema, como, por exemplo, número de pavimentos aguardando para serem executados ou estado de uma equipe (ocupada ou ociosa).
- b) **eventos:** são acontecimentos, ocorrências, programadas ou não, que provocam uma mudança de estado no sistema, como, por exemplo, o início da execução de um pavimento ou a disponibilização de uma equipe no canteiro.
- c) **entidades:** representa um objeto que necessita de uma definição clara e explícita, podendo ser dinâmica (uma equipe) ou estática (um pavimento).
- d) **atributos:** são as características próprias das entidades, aquilo que as definem totalmente, como, por exemplo, número do pavimento ou produtividade da equipe.

- e) **recursos:** é uma entidade estática que fornece serviços às entidades dinâmicas. Tem dois estados básicos: ocupado ou livre, como, por exemplo, equipe de pedreiros ou elevador. Pode servir mais de uma entidade simultaneamente, ou, caso contrário, há a formação de filas aguardando pela disponibilidade do recurso.
- f) **filas:** acúmulo de entidades aguardando pela disponibilidade de um recurso, sendo que toda fila tem uma política: primeiro que entra - primeiro que sai (PEPS), último que entra - primeiro que sai (UEPS).
- g) **atividade:** é um período de tempo predeterminado que uma vez iniciada, seu final pode ser programado, como, por exemplo, execução de reboco ou transporte de material entre dois pavimentos.
- h) **espera:** período de tempo sob o qual, em geral, não se tem controle. Uma vez iniciada, não se pode programar seu fim, tais como: pavimento aguardando a disponibilidade da equipe ou dependendo do tempo de execução dos pavimentos anteriores.
- i) **tempo simulado:** tempo real do sistema sendo simulado.
- j) **tempo de simulação:** tempo necessário para a execução de um experimento.

Law e McComas (1991) afirmam que apenas 30 a 40% do esforço para gerar modelos de simulação está na etapa de modelagem do sistema. Por esse motivo, estes mesmo autores especificaram sete elementos para uma modelagem bem definida, os quais são (LAW; MCCOMAS, 1991):

- a) conhecimento do método de simulação, modelos estocásticos da pesquisa operacional (teoria das filas, por exemplo), teoria de probabilidades e estatística;
- b) formulação do problema de forma correta;
- c) obter informações corretas e apuradas dos processos de operação do sistema e lógica de controle;
- d) escolher apropriadamente o *software* de simulação e utilizá-lo de forma correta;
- e) estabelecer a validade e credibilidade do modelo;
- f) usar procedimentos estatísticos adequado para a interpretação das saídas da simulação;
- g) empregar técnicas corretas de gerenciamento de projetos.

### 3.6.1 Etapas da modelagem de simulação

Com o intuito de gerar modelos de simulação válidos e que representem o sistema real da forma mais coerente, diferentes autores descrevem as etapas que um estudo de simulação deve seguir. Segundo Law e Kelton (1991), os estudos de simulação devem seguir dez etapas (Figura 9) que serão descritas a seguir. À medida que se realiza o desenvolvimento do estudo e um melhor entendimento do sistema real é obtido, é desejável voltar a uma etapa anterior para acrescentar as suposições que antes não estavam explícitas (LAW; KELTON, 1991).

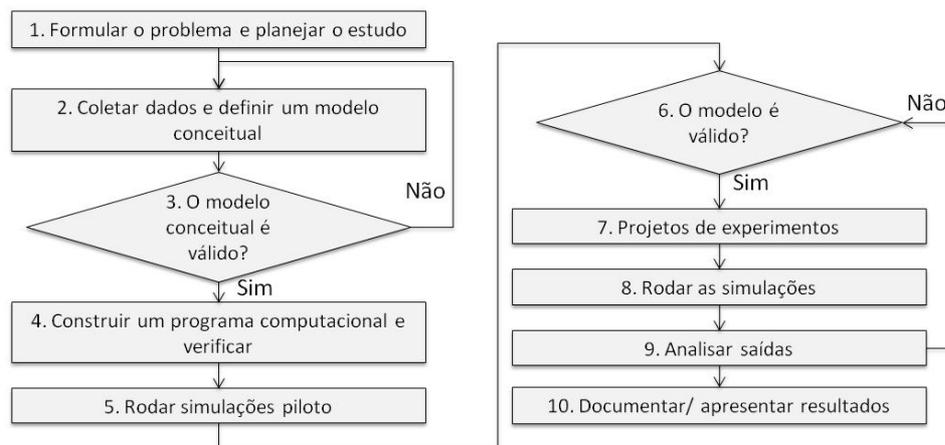


Figura 9: etapas da simulação adaptado de Law e Kelton (1991)

#### 3.6.1.1 Formular o problema e planejar o estudo

Um dos mais importantes aspectos é a definição cuidadosa dos objetivos gerais e questões específicas a serem discutidas (LAW; KELTON, 1991). Esta etapa é muitas vezes negligenciada pela falta de conhecimento da natureza da simulação, as informações que ela pode fornecer e o tempo e esforço requerido para realizar um bom estudo (LAW; MCCOMAS, 1991). Assim, tem-se a necessidade de entender como a simulação se comporta, tanto por parte dos responsáveis pela modelagem do sistema como por parte dos usuários finais dos resultados (especialista do sistema real).

Segundo Law e McComas (1991), a condução de uma reunião inicial pode superar a falta de entendimento da equipe de estudo sobre a simulação, definindo e discutindo as seguintes atividades:

- a) identificar os principais problemas de desempenho para o sistema existente (se este sistema existir);

- b) determinar os objetivos gerais do estudo e de cinco a dez aspectos específicos a serem considerados pelo modelo;
- c) decidir como o modelo será utilizado no processo de tomada de decisão;
- d) identificar quem será o usuário final do modelo (um analista experiente ou um engenheiro de produção), uma vez que isto afeta quão amigável o modelo deve ser;
- e) especificar as medidas de desempenho que serão utilizadas para comparar diferentes cenários do sistema; e
- f) delinear as configurações do sistema sob estudo, evitando reprogramações mais tarde.

Segundo Law e McComas (1991), devido ao tempo de execução do estudo, pode ser necessário usar um modelo de simulação para estudar o trabalho detalhado de um sistema particular, enquanto outro modelo mais agregado pode ser utilizado para explorar a eficácia do sistema global.

#### 3.6.1.2 Coletar dados e definir um modelo conceitual

Segundo Law e McComas (1991) a coleta de dados não é uma tarefa fácil, já que uma única pessoa ou documento não tem todas as informações necessárias. Segundo estes mesmos autores os dados devem ser coletados para especificar os parâmetros do modelo e distribuições de probabilidade de entrada. As informações e dados coletados devem ser agrupados em um conjunto de documentos chamado de documentos de suposições, os quais serão utilizados para realizar a caminhada estrutura do modelo conceitual do sistema a ser representado (LAW; MCCOMAS, 1991). Dados sobre o desempenho do sistema existente também deve ser coletado para contribuir com a validação do modelo (LAW; MCCOMAS, 1991).

Segundo Law e McComas (1991) o nível de detalhe do modelo depende dos objetivos do estudo, dados disponíveis, questões de credibilidade, restrições de computadores e opiniões dos especialistas no sistema. Por exemplo, modelos usados para projetar novos sistemas são geralmente menos detalhados em relação àqueles usados para aperfeiçoar sistemas existentes, devido à diferença de metas do projeto e na disponibilidade de dados (LAW; MCCOMAS, 1991).

Law e Kelton (1991) sugerem que a modelagem sempre comece com um modelo moderadamente detalhado, que pode ser detalhado posteriormente, se necessário. Esses mesmos autores afirmam que um modelo deve conter apenas o detalhamento suficiente para

capturar a essência do sistema para o propósito para qual o modelo foi produzido. Um modelo excessivamente detalhado pode ser custoso para programar e executar (LAW; KELTON, 1991). É importante para o especialista em simulação interagir regularmente com o gerente e outros agentes chave do sistema que está sendo modelado. Os benefícios dessa abordagem são (LAW; MCCOMAS, 1991):

- a) geralmente quando um estudo é inicializado, não existe uma ideia clara do problema a ser resolvido, com o andamento do estudo a natureza do problema se torna mais clara;
- b) o interesse e envolvimento do gerente do sistema real são mantidos;
- c) o conhecimento do sistema pelo gerente contribui para a validação do modelo; e
- d) o modelo é mais verossímil, já que o gerente compreende e aceita as suposições do modelo.

#### 3.6.1.3 Validar o modelo conceitual

Na construção do modelo conceitual do sistema real é de extrema importância para o especialista em simulação envolver pessoas no estudo, as quais são intimamente familiarizadas com as operações do sistema real (LAW; KELTON, 1991). Essa interatividade contribui para aumentar a validade do modelo e a sua credibilidade, como descrito anteriormente. Mas para essa validação, a caminhada estruturada do modelo conceitual pode ser uma alternativa, verificando se as suposições presentes no modelo conceitual estão corretas, completas e consistentes (LAW; MCCOMAS, 1991). Ao longo da caminhada estruturada, vários erros de suposição do modelo podem ser identificados e corrigidos, algumas novas suposições são acrescentadas e algumas questões de nível de detalhe são resolvidas pelos especialistas do sistema (LAW; MCCOMAS, 1991). Essa caminhada estruturada deve ser realizada antes da fase de codificação começar (LAW; MCCOMAS, 1991).

#### 3.6.1.4 Construção e verificação do programa computacional

Segundo Law e McComas (1991) a escolha do *software* usado para desenvolver o estudo de simulação pode ter um grande impacto no sucesso do projeto. Estes mesmos autores afirmam que o *software* irá afetar: (a) o nível de detalhe possível; (b) validação do modelo; (c) tempo de execução do modelo; e (d) tempo de término do estudo.

Law e McComas (1991) também sugerem que, baseado em suas experiências profissionais, que a maioria dos modelos de simulação válidos de sistemas complexos deve ser programada de

alguma forma, mesmo que seja usada a linguagem de simulação ou simulador. Muitos vendedores de *software* de simulação oferecem versões com capacidade de animação. A animação é útil para comunicação da essência do modelo de simulação para os gerentes e outros interessados, o que aumenta a credibilidade do modelo (LAW; MCCOMAS, 1991). Mas esta apresenta duas limitações (LAW; MCCOMAS, 1991): não é um substituto para uma análise estatística cuidadosa da saída da simulação, e não é garantia de um modelo válido ou um modelo depurado.

Law e McComas (1991) afirmam que existem várias técnicas usadas para depurar, ou seja, verificar o programa de simulação: (a) desenvolver o programa de forma modular; (b) usando depuração e rastreamentos iterativos; (c) fazendo uma caminhada estruturada do código; (d) checar as saídas da simulação para verificar dados com razoabilidade; e (e) animação.

#### 3.6.1.5 Validação do modelo computacional

A realização de simulações piloto tem o propósito de validação do modelo de simulação (LAW; MCCOMAS, 1991). As simulações piloto podem ser usadas para testar a sensibilidade das saídas do modelo a pequenas mudanças nos parâmetros de entrada (LAW; KELTON, 1991). Os resultados numéricos e animações das simulações piloto devem ser examinados cuidadosamente por especialistas do sistema para detectar erros remanescentes nos pressupostos do modelo e, caso necessário, o modelo deve ser modificado para refletir as alterações necessárias (LAW; MCCOMAS, 1991). O teste mais definitivo de validade de um modelo de simulação é estabelecer que a sua medida de desempenho se aproxime a medida de desempenho que deveria ser esperada de uma configuração do sistema proposto (LAW; MCCOMAS, 1991). Se as saídas mudam bastante, uma melhor estimativa dos parâmetros de entrada deve ser obtida e se um sistema similar ao que está sendo estudado existir, as informações de saída da simulação piloto podem ser comparadas com aquelas do sistema real (LAW; KELTON, 1991).

#### 3.6.1.6 Projeto de experimentos

Para que uma estimativa da simulação seja precisa estatisticamente e livre de vieses, o analista deve especificar para cada sistema as escolhas apropriadas para os seguintes aspectos (LAW; MCCOMAS, 1991): (a) comprimento de cada tempo de simulação; (b) número de replicações

simuladas independentes; (c) condições iniciais para cada simulação; e (d) comprimento do período de *warmup*<sup>14</sup>, caso seja apropriado.

Law e McComas (1991) sugerem a realização de pelo menos três a cinco simulações independentes para cada cenário e usar a média da medida do desempenho estimada, a partir das simulações individuais, como a estimativa da medida global do desempenho.

#### 3.6.1.7 Realização da simulação e analisar das saídas do modelo

Realizar a simulação é prover dados de desempenho necessários para a etapa de análise (LAW; KELTON, 1991). Segundo Law e McComas (1991), os dados de saída da simulação são utilizados para construir estimativas numéricas da medida do desempenho desejada para cada configuração do sistema de interesse. Metas típicas são de construir um intervalo de confiança para uma medida de desempenho para um projeto do sistema particular ou para decidir qual o sistema simulado é o melhor relacionado com algumas medidas específicas de desempenho (LAW; KELTON, 1991). Law e McComas (1991) afirmam que muitas vezes é útil empregar interfaces gráficas para analisar estas medidas de desempenho do sistema simulado.

#### 3.6.1.8 Documentação e apresentação dos resultados do estudo

Devido ao fato de que os modelos de simulação são usados para mais de um tipo de aplicação, é importante documentar as suposições inseridas no modelo assim como no programa de computador (LAW; KELTON, 1991). Law e McComas (1991) afirmam que um dos fatores mais determinantes para saber se os resultados da simulação são utilizados no processo de decisão é a credibilidade do modelo e do especialista em simulação. Por isso motivo, estes autores enfatizam as atividades de interação regular com os gerentes do sistema, a caminha estruturada do modelo conceitual e o uso da animação.

### 3.6.2 Sistemas de Modelagem Interativa Visual

Os Sistemas de Modelagem Interativa Visual<sup>15</sup> permitem construir o modelo de simulação e simulá-lo de uma maneira interativa. O sistema, ou *software*, fornece um conjunto de objetos predefinidos de simulação, o qual permite ao modelador selecionar os objetos e definir a lógica do modelo através de uma série de menus (ROBINSON, 2003). Como resultado, o usuário que

---

<sup>14</sup>*Warmup* é o tempo necessário para “aquecer” o sistema modelado na simulação, ou seja, o tempo de mobilização dos recursos para a realização das atividades.

<sup>15</sup>*Visual Interactive Modelling Systems (VIMS)*

utiliza um *software* com funções VIMS necessita relativamente menos habilidades de programação, mesmo que os objetos predefinidos estejam conectados a uma linguagem de programação ou tenham uma linguagem interna, permitindo modificações (ROBINSON, 2003).

Muitos pacotes de simulação utilizados regularmente hoje podem ser classificados como VIMS (PIDD, 2004). No entanto, nem sempre um pacote do tipo VIMS é o mais adequado, dadas suas limitações. Pidd (2004) relata quando é mais vantajoso recorrer à programação computacional ao invés de um *software* VIMS nas seguintes situações: (a) quando a simulação envolve eventos lógicos complexos ou necessitam incluir cálculos bem específicos; (b) quando a simulação é em grande escala e necessita ser mantida por muito tempo; (c) quando existe a necessidade de rápidas simulações; e (d) quando a organização não quer investir em especialistas de *software* quando já existe um considerável conhecimento de programação.

Já o *Visual Interactive Modelling* (VIM), ou *Visual Interactive Simulation* (VIS)<sup>16</sup>, começou a ser utilizado em 1976 como uma evolução a simulação de eventos discretos e foi primeiramente idealizado por Hurion<sup>17</sup> (1976 *apud* HURRION, 1986). Segundo Elder(1992), o VIM é um módulo embutido no programa computacional o qual usa cores e gráficos para mostrar o estado atual de variáveis importantes para o modelo e também fornece facilidades interativas que permitem o usuário ajustar os parâmetros do modelo. Quando os parâmetros são ajustados, os gráficos mostrados são atualizados para permitir que o usuário veja como as variáveis se modificaram, ou seja, a ideia principal é permitir que o usuário compreenda o relacionamento entre os parâmetros de entrada do modelo e as variáveis de saída (ELDER, 1992).

Shi e Zhang (1999) afirmam que animar um sistema significa, literalmente, dar vida ao mesmo e na prática da simulação significa visualizar mudanças de parâmetros ao longo do tempo. Os benefícios da VIM são:

---

<sup>16</sup>Para Wagner, Freitas e Wagner (1996) o processo de desenvolvimento de um modelo de um sistema sob investigação, incorporando um método de animação do modelo e oferecendo uma interação com o modelo a fim de explorar decisões alternativas é chamado de Modelagem Interativa Visual (VIM – *Visual Interactive Modelling*), enquanto o processo de simulação utilizando este conceito é conhecido como Simulação Interativa Visual (VIS – *Visual Interactive Simulation*). Neste trabalho os termos Modelagem Interativa Visual e Simulação Interativa Visual serão tratados como sinônimos.

<sup>17</sup>Hurion, R. D. **The design use and required facilities of an interactive visual computer simulation language to explore production planning problems.** PhD Thesis – University of London, 1976.

---

Método para integração da simulação de eventos discretos e modelagem 4D no projeto do sistema de produção de empreendimentos habitacionais de interesse social.

- a) comunicar a essência do modelo de simulação para um gestor ou outras pessoas que não estão cientes dos detalhes técnicos do modelo (LAW; KELTON, 2000) e permite a rastreabilidade dos eventos de simulação (ROBINSON, 2003);
- b) fácil verificação e validação dos modelos, já que o mesmo permite a simulação do modelo em determinadas condições para testes, além de permitir aos usuários leigos visualizar o modelo e verificar a sua validade (LAW; KELTON, 2000; ROBINSON, 2003);
- c) fornece a possibilidade de utilizar os modelos em grupos de solução de problemas (LAW; KELTON, 2000; ROBINSON, 2003);
- d) aumenta a compreensão dos resultados, permitindo experimentação interativas com o modelo (ROBINSON, 2003).

Bell *et al.*(1999) realizou uma *survey* com tomadores de decisão que utilizaram a VIS e as principais desvantagens apontadas foram: (a) o tempo de desenvolvimento e a expertise necessários para o processo de modelagem; (b) a aceitação dos resultados sem seu completo entendimento (c) o aumento no tempo necessário de participação do tomador de decisão no processo.

### **3.6.3 Simulação na Construção Civil**

Até o presente momento, todas as considerações realizadas sobre a simulação são independentes ao ambiente em que esta é aplicada. Nesse item será caracterizada a utilização da simulação como uma ferramenta de tomada de decisão em empreendimentos de construção.

Buscou-se na literatura estudos com escopo semelhante ao presente trabalho, que é a simulação de empreendimento de habitação de interesse social e com características repetitivas. A maioria dos trabalhos de simulação desta área de conhecimento trata de: (a) simulação do processo de execução de empreendimento habitacional com tecnologias pré-fabricados (MOHSEN *et al.*, 2008; SHI; ZENG; TAM, 1998); a modelagem das equipes especializadas presentes na construção de empreendimentos repetitivos, focando no fluxo ininterrupto das mesmas (BASHFORD *et al.*, 2003; SAWHNEY *et al.*, 2003; SRISUWANRAT; IOANNOU; TSIMHONI, 2008; YANG; IOANNOU, 2001); localização e dimensionamento de estoques de proteção (*buffer*) (ALVES; TOMMELEIN; BALLARD, 2006; ALVES, 2005; GONZÁLEZ; ALARCÓN; MOLENAAR, 2009).

Alves, Tommelein e Ballard (2006) apresentam resumidamente os conceitos de variabilidade, estoques (*buffers*) e lotes de produção com o intuito de discutir qual é o impacto destes no sistema de produção. Com esse objetivo, os autores utilizaram o STROBOSCOPE, modelando cinco cenários diferentes de uma cadeia de suprimentos de dutos de ar-condicionado. Este modelo do sistema de produção não tinha o objetivo principal de definir uma combinação final entre estoques e lotes, mas sim permitir aos gerentes testar diferentes combinações para compreender melhor o sistema.

Kamat e Martinez (2000) apresentam a problemática de compreensão dos resultados da simulação, ou seja, o efeito de *black box* que os resultados estatísticos podem causar nos usuários leigos. Diferentes trabalhos apresentam ferramentas para a mitigação desse problema, como: (a) a ferramenta PROOF de animação 2D (KAMAT; MARTINEZ, 2000); (b) ferramenta de animação 3D, VITASCOPE (IOANNOU; KAMAT, 2005; KAMAT; MARTINEZ, 2004; KAMAT; MARTÍNEZ, 2001); e (c) a ferramentas COSYE (ZHANG *et al.*, 2010).

Kamat e Martinez (2002) também discutem as diferenças entre a modelagem 4D e a visualização dos elementos através da SED. Estes autores afirmam que a modelagem 4D foca na visualização dos produtos da construção, ou seja, enquanto o tempo avança os componentes individuais da edificação são adicionados ao modelo visual na sua posição e forma final como definido pelo cronograma (KAMAT; MARTINEZ, 2002). Já a visualização das operações da construção através da SED inclui a complexidade de interação entre o modelo do produto e os recursos necessários para a sua execução (KAMAT; MARTINEZ, 2002). Dessa forma através da representação do fluxo de construção do produto pode-se observar estratégias globais de execução do empreendimento, qual é o foco da utilização das ferramentas neste trabalho para a tomada de decisão no PSP.

Por fim, quanto à utilização do BIM em conjunto com a SED, pode-se destacar trabalhos que apresentam a possibilidade de armazenar as interdependências das atividades em elementos BIM do empreendimento, permitindo o reuso dessas conexões em alternativas diferentes de estruturação do processo de construção (KÖNIG *et al.*, 2012; SCHERER; ISMAIL, 2011). Dessa forma, os elementos BIM com essa característica permitem a geração automática do sequenciamento de atividades de construção do empreendimento (KÖNIG *et al.*, 2012; SCHERER; ISMAIL, 2011). Como contribuição, estes trabalhos estão desenvolvendo formas de estruturação das informações presentes no BIM (IFC e modelos de quantitativo, por exemplo) para gerar automaticamente *templates* de sequenciamento de atividades e

dimensionamento de recursos. Dessa forma, o tempo de modelagem da SED e problemas referentes a interoperabilidade entre os softwares (modelagem BIM e programação do processo de construção, por exemplo) podem ser reduzidos.

### 3.7 TRABALHOS QUE UTILIZARAM A MODELAGEM DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO SOB O ESCOPO DO PSP

A seguir são apresentados dois trabalhos desenvolvidos sobre modelagem de sistema de produção na construção civil. Os mesmos foram desenvolvidos pelo NORIE-UFRGS. Devido à semelhança de escopo destes trabalhos com esta dissertação, as considerações apresentadas nessa seção serão utilizadas na sua totalidade ao longo do desenvolvimento dos estudos empíricos e desenvolvimento do método deste trabalho.

#### **3.7.1 Projeto de Sistemas de Produção na Construção Civil Utilizando Simulação Computacional como Ferramenta de Apoio à Tomada de Decisão**

Schramm (2009) desenvolveu um modelo de PSP com a utilização da simulação computacional como ferramenta no apoio a tomada de decisão. Este trabalho foi uma evolução natural dos trabalhos desenvolvidos pelo NORIE sobre PSP, mas sem o auxílio da modelagem do sistema de produção, os quais são Schramm (2004) e Rodrigues (2006). O modelo resultante é apresentado na Figura 10 e o mesmo foi construído a partir de quatro estudos de caso, mas o mesmo não foi aplicado formalmente e de forma completa (SCHRAMM, 2009). O mesmo é dividido em duas fases distintas, mas não estanques. A primeira fase é determinística, a qual consiste na sequência de decisões do PSP e uma fase dinâmica, que corresponde ao desenvolvimento e emprego do modelo de simulação (SCHRAMM, 2009).

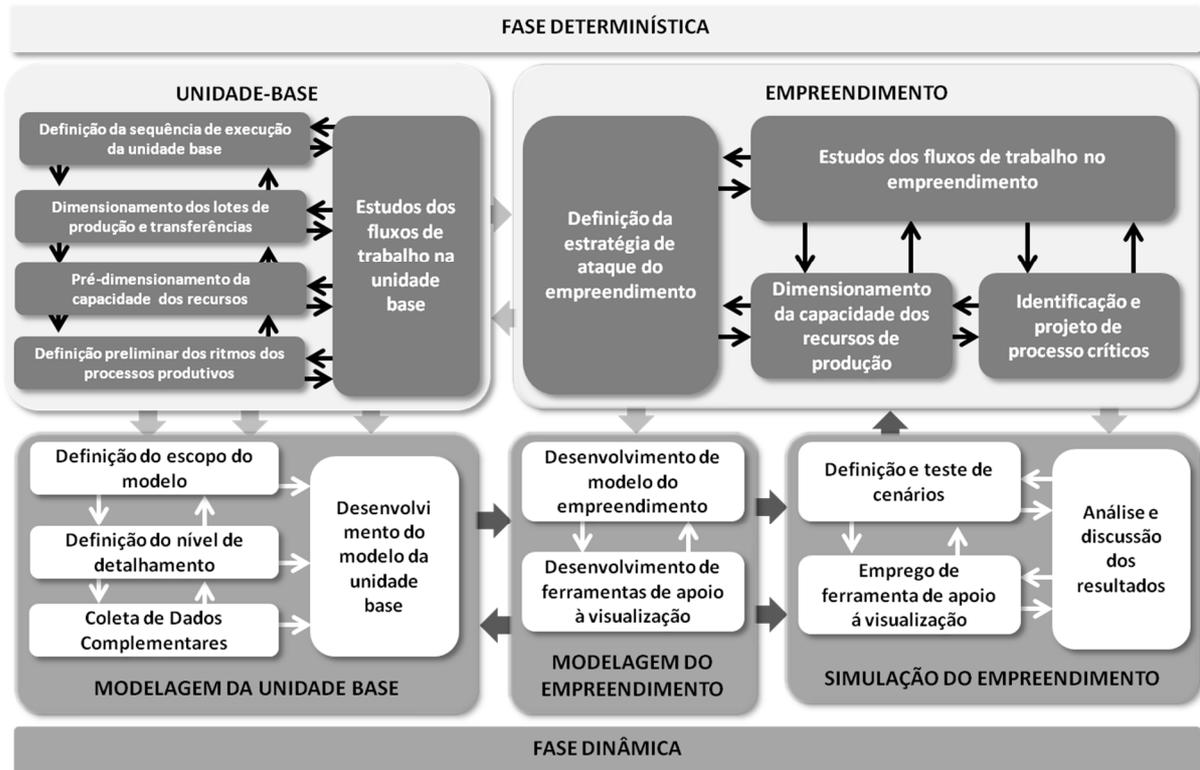


Figura 10: modelo de PSP com a simulação como apoio a tomada de decisão (SCHRAMM, 2009)

A segunda fase é denominada como dinâmica, porque os maiores benefícios oriundos do emprego da simulação nos estudos empíricos realizados dizem respeito ao (SCHRAMM, 2009): (a) processo de modelagem; e (b) à compreensão das interações dinâmicas entre processos e recursos produtivos, ou seja, devido a explicitação das probabilidades de forma subjetiva pelos participantes, análises mais profundas sobre a variabilidade dos modelos não foram exploradas.

Na Figura 10 preferiu-se explicitar o dimensionamento dos lotes de produção e transferência e a definição preliminar dos ritmos dos processos produtivos, já que as mesmas são informações importantes para o desenvolvimento do modelo de simulação (SCHRAMM, 2009). Os fluxos de decisão e revisão, representados por setas em sentido opostos, ressaltam o papel sistêmico do processo de tomada de decisão, uma vez que existe grande interdependência entre as decisões (SCHRAMM, 2009).

Parte das informações necessárias para o desenvolvimento dos modelos originaram-se dos dados disponíveis das primeiras oito decisões da fase determinística (SCHRAMM, 2009): (a) definição da sequência de execução; (b) dimensionamento dos lotes de produção e transferência; (c) pré-dimensionamento da capacidade dos recursos de produção; (d) definição preliminar dos ritmos dos processos produtivos; (e) estudo dos fluxos de trabalho da unidade-

base; e (f) definição da estratégia de execução do empreendimento. As ferramentas utilizadas pelo processo de elaboração do PSP, como diagrama de sequência de execução da unidade-base e as linhas de balanço da unidade-base e do empreendimento auxiliaram na modelagem do sistema de produção, não apenas no que se refere às atividades de transformação, como também dos fluxos de trabalho (SCHRAMM, 2009).

Quanto à forma de modelagem, Schramm (2009) ressalta a importância do amadurecimento das definições nas etapas iniciais do PSP, uma vez que suas modificações impactam muito fortemente na estrutura dos modelos, podendo, em alguns casos extremos, gerar a necessidade de reconstrução parcial ou total deste. Já a fase dinâmica, presente na Figura 10, foi dividida em três etapas básicas: (a) modelagem da unidade-base; (b) a modelagem do empreendimento; e (c) simulação do empreendimento. Na etapa de modelagem da unidade-base deve-se definir o escopo do modelo a ser desenvolvido, se abrangerá todo o empreendimento ou uma parte do sistema de produção e deve-se definir o nível de detalhamento do modelo (SCHRAMM, 2009).

Para o início da modelagem da unidade-base, pode ser necessária a coleta de dados complementares, taxas de produção para um determinado processo, entre outros (SCHRAMM, 2009). Já na etapa de modelagem do empreendimento são definidos o número de modelos ou submodelos necessários para representar o sistema de produção do empreendimento, com base na definição da estratégia de execução do empreendimento (SCHRAMM, 2009). Assim, o número de frentes de trabalho simultaneamente executadas determina o número de submodelos (quando considerados dentro de um único modelo) ou modelos (quando considerados separadamente) necessários (SCHRAMM, 2009). Juntamente à modelagem do empreendimento, podem-se desenvolver ferramentas de visualização que facilitem o entendimento e a avaliação dos cenários a serem simulados (SCHRAMM, 2009).

Já a simulação do empreendimento, terceira etapa da fase dinâmica, consiste na definição e teste dos cenários, do emprego das ferramentas de visualização para apoiar a análise e discussão dos resultados (SCHRAMM, 2009). Esses, por sua vez, são utilizados para avaliar decisões no nível do empreendimento, como a estratégia de ataque, o estudo dos fluxos de trabalho e o dimensionamento da capacidade dos recursos de produção (SCHRAMM, 2009). Deve-se destacar também o papel de apoio à programação da produção desempenhado pelo modelo de simulação, a partir do desdobramento das decisões do PSP (SCHRAMM, 2009).

Embora seja possível realizar o estudo dos fluxos de trabalho no empreendimento a partir do uso da simulação, a elaboração de uma linha de balanço na fase determinística pode fornecer informações que permitam avaliar a localização e o pré-dimensionamento de outros *buffer* a fim de manter os fluxos de trabalho de certos processo ininterruptos ou que seja possível manter o fluxo do produto contínuo (SCHRAMM, 2009). Além do modelo apresentado no Quadro 2, Schramm (2009) ainda apresenta três estágios de implementação. Estes estágios estão relacionados ao nível de maturidade da empresa com a prática da elaboração do PSP e ao domínio da tipologia do empreendimento a ser executado (SCHRAMM, 2009). O Quadro 2 apresenta de forma resumida as características e recomendações de cada estágio de implementação da simulação no processo de PSP.

<b>Estágio</b>	<b>Característica</b>	<b>Recomendação</b>
<b>1</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ a empresa ainda não implementou o processo de elaboração do PSP;</li> <li>✓ a tipologia do empreendimento é nova para a equipe de produção, não tendo sido ainda utilizada em nenhum empreendimento da empresa.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ empregar o modelo de elaboração do PSP na sua fase determinística;</li> <li>✓ se houver intenção de replicar a tipologia, avaliar a possibilidade de desenvolver um modelo de simulação;</li> <li>✓ avaliar a possibilidade de utilizar a simulação para o estudo de processos específicos.</li> </ul>
<b>2</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ a empresa já tem implementado o processo de elaboração do PSP;</li> <li>✓ a tipologia do empreendimento já foi utilizada em outros empreendimentos da empresa mas não há um PSP elaborado previamente;</li> <li>✓ há perspectivas de continuidade no emprego da tipologia do empreendimento em estudo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ empregar o modelo de elaboração do PSP nas suas fases determinística e estocástica;</li> <li>✓ enfatizar o estabelecimento de padrões para a sequência construtiva das unidades-base do empreendimento.</li> <li>✓ construir (e utilizar, se possível) um modelo de simulação com vistas à reutilização.</li> </ul>
<b>3</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ a empresa já tem consolidado o processo de elaboração do PSP;</li> <li>✓ a tipologia do empreendimento já foi empregada ou tem muitas características comuns a empreendimento anteriores para os quais o PSP foi elaborado;</li> <li>✓ um modelo de simulação reutilizável já foi construído e testado em um empreendimento anterior.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ revisar e adaptar as decisões do PSP na fase determinística ao novo empreendimento;</li> <li>✓ avaliar e adaptar o modelo de simulação construído anteriormente;</li> <li>✓ empregar o modelo de elaboração do PSP na sua fase dinâmica.</li> </ul>

Quadro 2: estágios de implementação do PSP com simulação (SCHRAMM, 2009)

O estágio 1 caracteriza-se pela implementação do processo de elaboração do PSP em uma empresa. Ainda, o empreendimento sob estudo tem características inéditas, ou seja, a empresa não tem experiência na sua execução, por isso recomenda-se a implementação da fase determinística do modelo de elaboração, como uma forma de capacitar a empresa na sua realização (SCHRAMM, 2009). Em função da novidade que o PSP representa para a empresa neste estágio, não se espera que seja possível ou proveitoso avançar além da fase determinística

do processo (SCHRAMM, 2009). Entretanto, pode-se avaliar a pertinência da utilização da simulação para o estudo de processos particulares (processos críticos), dada a sua natureza pontual e curta duração (SCHRAMM, 2009). No estágio 2 a empresa já tem o processo de elaboração do PSP implementado e a tipologia do empreendimento já é conhecida pela equipe de planejamento e há perspectiva de emprego desta tipologia em empreendimentos futuros (SCHRAMM, 2009). Neste caso, além do desenvolvimento do PSP na sua fase determinística, procede-se a construção de um modelo de simulação que permita sua reutilização futura (SCHRAMM, 2009). Já o estágio 3 ocorre quando a empresa já tem o processo de elaboração do PSP consolidado, a tipologia do empreendimento sob estudo já foi anteriormente executada e um modelo de simulação reutilizável já está disponível (SCHRAMM, 2009). Neste estágio, as decisões da fase determinística do PSP são avaliadas e revisadas à luz das características do empreendimento atual (SCHRAMM, 2009). Algumas adaptações podem ser necessárias e serão também realizadas no modelo de simulação. A partir da revisão do modelo, procede-se a realização da fase dinâmica do PSP. Neste caso, procura-se explorar os efeitos de mudanças mais pontuais no sistema de produção (ou uma “regulagem fina”), principalmente baseadas na experiência adquirida na gestão de empreendimentos anteriores (SCHRAMM, 2009).

### **3.7.2 Método de Gestão da Produção na Construção Civil com Uso da Modelagem BIM 4D**

Biotto (2012) desenvolveu um modelo de gestão da produção com a utilização da modelagem 4D. Este trabalho foi uma evolução natural dos trabalhos desenvolvidos pelo NORIE sobre PSP e simulação (RODRIGUES, 2006; SCHRAMM, 2004, 2009). O método proposto é composto por três fases (BIOTTO, 2012): (a) preparação da empresa para o uso de modelos BIM 4D e melhoria do sistema de gestão da produção; (b) fase de gestão da produção com o uso da modelagem BIM 4D; e (c) fase de análise de dados e tomada de decisão. A Figura 11 apresenta o método e suas três fases e a Figura 12 apresenta a fase de gestão da produção nos seus desdobramentos de acordo com os níveis hierárquicos.

Na fase de preparação, a empresa construtora deve estar consciente do investimento a ser feito, e por isso, deve disponibilizar o capital necessário para aquisição de equipamentos e *software* adequados à modelagem 4D, disponibilizar tempo para o treinamento de seus funcionários e incentivar um ambiente de trabalho colaborativo (BIOTTO, 2012). Em seguida, deve-se definir quem são os usuários dos modelos 4D. Como se trata de um método para gestão da produção, os prováveis usuários são os mestres, engenheiros de obras, engenheiros de planejamento e

coordenadores da produção, podendo expandir para fornecedores, clientes, operários, entre outros (BIOTTO, 2012). Após a identificação do usuário do modelo, define-se o escopo da modelagem, ou seja, quais atividades ou sistemas de produção serão estudados, e de quais unidades de análise (BIOTTO, 2012): unidade base, módulo de repetição da unidade base, empreendimento e canteiro de obras.

Em seguida, define-se o grau de detalhamento dos modelos 4D baseado no PSP ou no PCP. Os modelos 4D devem ser progressivamente detalhados ao longo da gestão da produção, partindo de sua versão menos detalhada no projeto do sistema de produção, passando pelo planejamento nos níveis de longo e médio prazo, até sua versão mais detalhada no estudo do planejamento do curto prazo (BIOTTO, 2012). Entretanto, quando se desenvolve o estudo dos processos críticos no PSP, o nível de detalhamento do modelo 4D pode aumentar dependendo do nível de detalhe dos pacotes de trabalho a serem estudados (BIOTTO, 2012).

Contudo, o detalhamento pode ocorrer de duas formas, ou pelo detalhamento dos objetos no modelo BIM, ou nos arquivos de cronogramas. Dessa forma, pode-se utilizar a mesma geometria 3D para representar diversas atividades, sem haver necessidade de detalhamento do modelo BIM 3D, mantendo o arquivo da modelagem 4D mais leve e fácil de trabalhar, além de reduzir o tempo com a modelagem (BIOTTO, 2012). Em seguida, faz-se a seleção dos *softwares* para a modelagem. A empresa pode optar por comprar o *software* de modelagem 4D que seja mais compatível com o programa de modelagem de produto utilizado e define os funcionários a serem capacitados para realizar a modelagem em BIM e 4D (BIOTTO, 2012).

Já a fase da gestão da produção consiste em tomar decisões sobre os sistemas de produção com o apoio de ferramentas que permitam a visualização de algumas de suas características (BIOTTO, 2012). As principais decisões envolvidas no método são aquelas propostas por Schramm (2004) para a realização do PSP (BIOTTO, 2012): sequenciamento da unidade base, dimensionamento dos recursos de produção, planejamento dos fluxos de trabalho (com a linha de balanço), o balanceamento e sincronização de equipes, e dimensionamento da capacidade dos recursos de produção, entre outros. Além disto, foram consideradas, ainda, decisões como (BIOTTO, 2012): a definição dos equipamentos de transporte vertical, análise de interferências de equipamentos de proteção coletiva e instalações do canteiro, planejamento da logística e layout do canteiro de obras. Dependendo do tipo de empreendimento a configuração física é diferente, podendo trazer diferentes unidades de análise (BIOTTO, 2012): unidade base; módulos de repetição da unidade base (por exemplo, torre, quadra, entre outros); e

empreendimento. Na modelagem BIM, é necessário modelar a unidade base, seu módulo de repetição e o empreendimento, sempre considerando os equipamentos de transporte vertical, equipamentos de proteção coletiva, materiais em estoques e instalações provisórias de canteiro (BIOTTO, 2012). Já para o arquivo de cronograma, pode-se iniciar a quantificação das atividades através de planos já utilizados pela empresa ou elaborar um cronograma com todas as atividades referentes aos objetos modelados em BIM 3D (BIOTTO, 2012).

Na fase de análise e tomada de decisão, pode-se avaliar a necessidade de ajustes no modelo, no arquivo de cronograma, ou da elaboração de novas alternativas e cenários do sistema de produção (BIOTTO, 2012). Como o plano de longo prazo elaborado está sujeito a alterações e atualizações devido à variabilidade e incertezas a função controle dos planos de médio e curto prazo podem fornecer parâmetros para realizar essa modificação (BIOTTO, 2012). Dessa forma, novas alternativas de plano podem ser simuladas por meio das ferramentas de elaboração do PSP apresentado por Schramm (2004) e Rodrigues (2006) e pelos modelos 4D (BIOTTO, 2012).

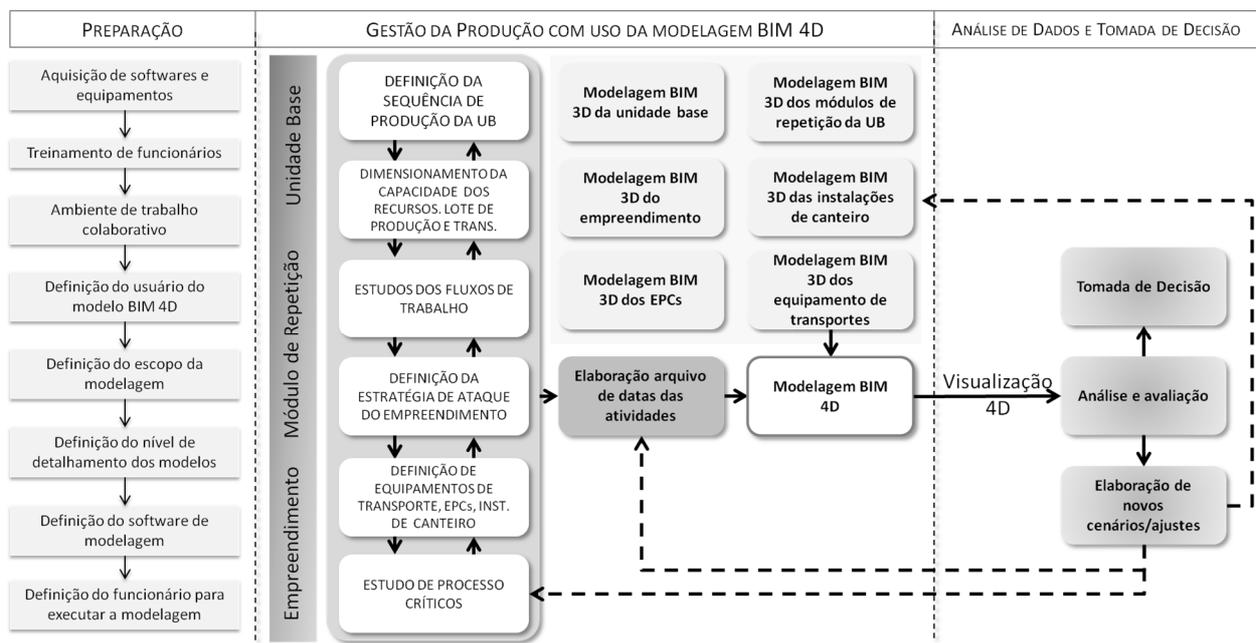


Figura 11: método do uso da modelagem BIM 4D na gestão da produção (BIOTTO, 2012)

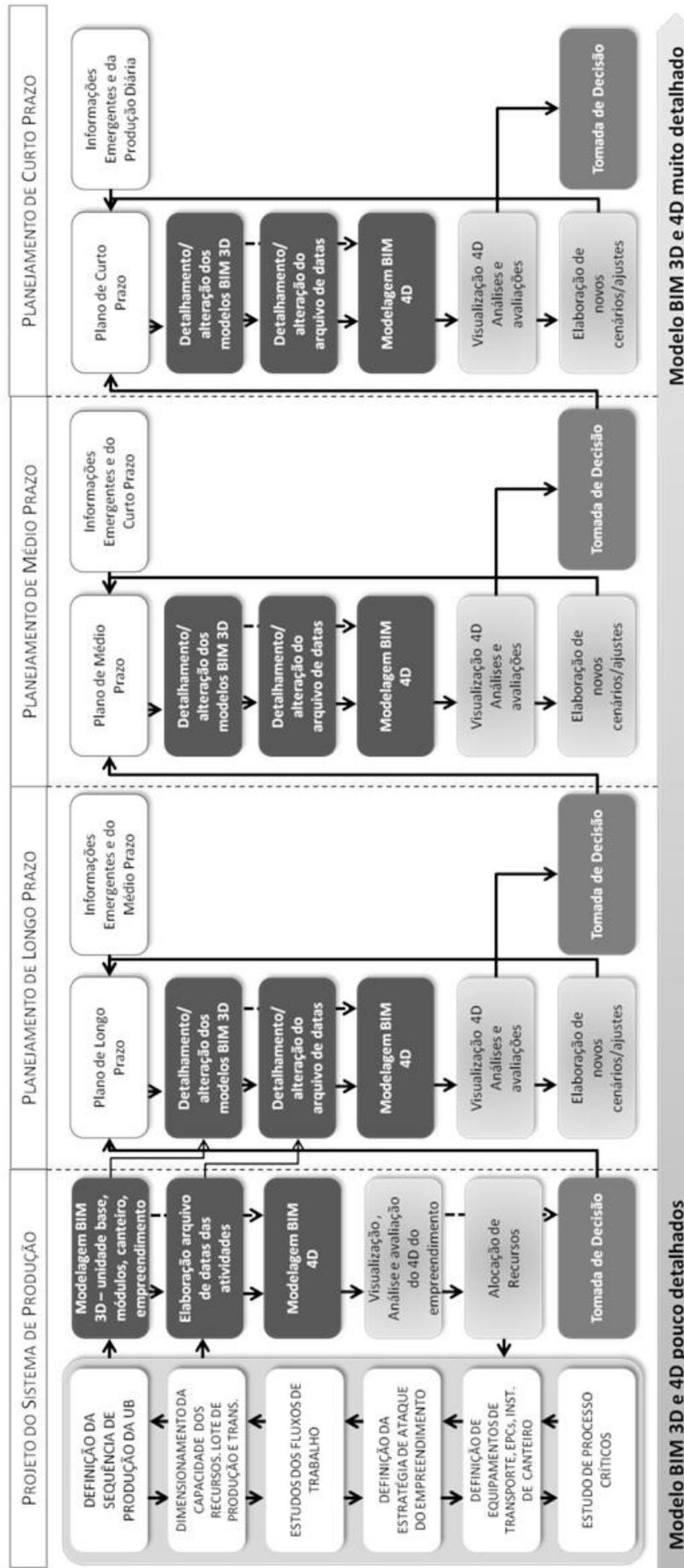


Figura 12: desdobramento do método nos níveis hierárquicos da gestão da produção (BIOTTO, 2012)

## 4. MÉTODO DE PESQUISA

Este capítulo apresenta uma descrição do método de pesquisa utilizado para a realização desse trabalho. O capítulo começa com a descrição da escolha de estratégia de pesquisa utilizada no seu desenvolvimento. Posteriormente são apresentados o delineamento do processo de pesquisa e a descrição das etapas. Por fim, são apresentados os constructos definidos para avaliação do método proposto e as fontes de evidência utilizadas.

### 4.1 ESTRATÉGIA DE PESQUISA

Este trabalho trata de uma pesquisa sobre gestão da produção com auxílio da tecnologia da informação e comunicação (TIC), mais especificamente, da proposição do uso da simulação de eventos discretos e modelagem 4D no Projeto do Sistema de Produção. Isso implica ser uma pesquisa que estuda o artificial, em oposição às ciências naturais.

Segundo March e Smith (1995), as ciências naturais envolvem atividades de descoberta e justificativa, ou seja, a geração ou proposição de alegações específicas e teste ou validação dessas alegações. Os mesmos autores afirmam que *design science research* (ciências do design ou ciências prescritivas) consistem em atividades de construção de um artefato para um propósito específico e avaliação da utilidade desse artefato (MARCH; SMITH, 1995). Simon (1996<sup>18</sup> *apud* VAISHNAVI; KUECHLER, 1996) ainda afirma que nas ciências naturais produz-se conhecimentos sobre objetos e fenômenos do mundo que descrevem e explicam como estes se comportam e interagem entre si, enquanto a *design science research* gera conhecimentos referentes a objetos artificiais, feitos pelo homem, os quais são projetados para alcançar alguns objetivos desejáveis. March e Smith (1995) ainda afirmam que tanto as atividades da *design science research* como das ciências naturais são necessárias para o avanço do conhecimento.

Para van Aken (2004) o produto da *design science research* é o design, o qual pode ser definido como uma representação de um sistema ou processo a ser realizado. Este mesmo autor relata que para realizar o design, é necessário utilizar um ciclo de solução de problemas, o qual consiste em (VAN AKEN, 2004): definição do problema e contexto, planejamento da intervenção, implementação da solução e avaliação. Van Aken (2004) ainda afirma que o *design*

---

<sup>18</sup> SIMON, H. **The Sciences of the Artificial**. Cambridge, MA: MIT Press.1996, 3. ed.

pode ser de três tipos: (a) *object-design*, ou seja, o desenvolvimento da intervenção ou artefato; (b) *realization-design*, que é o planejamento da intervenção para a construção do artefato; e (c) *process-design*, o qual é o método a ser adotado para desenvolver a solução do problema.

A *design science research* é uma forma de produção de conhecimento que envolve o projeto ou a construção de soluções inovadoras, destinadas a resolver categorias de problemas enfrentados no mundo real e, por esse meio, para fazer uma contribuição para o avanço do conhecimento (LUKKA, 2003). Assim, essa estratégia de pesquisa apresenta dois componentes básicos, a prática e a teoria, os quais são apresentados na Figura 13.

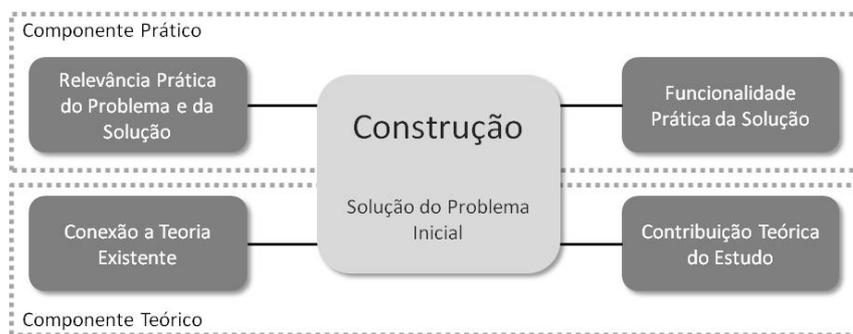


Figura 13: elementos centrais da *design science research*, adaptado de Lukka (2003)

Mas, segundo Holmstrom *et al.* (2009), o objetivo principal da *design science research* é solucionar uma classe de problemas e não apenas criar conhecimentos de caráter explanatório. A *design science research* é uma abordagem de pesquisa que procura (HOLMSTROM *et al.*, 2009): (a) explorar novas soluções alternativas para resolver problemas, (b) explicar esse processo exploratório de soluções alternativas de solução de problemas, e (c) melhorar o processo de solução do problema.

Para utilizar a estratégia de pesquisa da *design science research*, Holmstrom *et al.* (2009) afirma que primeiramente o cientista cria o fenômeno artificial para posteriormente obter as informações necessárias para avaliá-lo. Dessa forma o pesquisador está interessado em desenvolver os meios para um fim, ou seja, um artefato para solucionar o problema (HOLMSTROM *et al.*, 2009). Entretanto, a *design science research* pode resultar em diferentes tipos de produtos, ou *outcomes*:

- a) **constructos ou conceitos** - são a base conceitual usada para desenvolver a solução de um problema específico, eles formam uma linguagem especializada e compartilham o conhecimento de uma disciplina ou áreas do conhecimento (MARCH; SMITH, 1995);

- b) **modelo** - é um conjunto de proposições ou declaração que expressa as relações entre constructos, o modelo pode ser compreendido como uma descrição de como as coisas são (MARCH; SMITH, 1995);
- c) **método** - é um conjunto de passos (algoritmo ou diretrizes) usadas para realizar uma tarefa, são baseados em um conjunto de constructos subjacentes (uma linguagem) e uma representação (um modelo) do espaço ou ambiente da solução (MARCH; SMITH, 1995);
- d) **implementação ou instantiation** - é a implementação do artefato no seu ambiente, ela operacionaliza constructos, modelos e métodos, demonstrando a viabilidade e efetividade dos mesmos (MARCH; SMITH, 1995); e
- e) **regras tecnológicas** - é um conjunto de conhecimento geral, conectado a intervenções ou artefatos com uma solução desejada ou desempenho em uma área de aplicação, o conjunto de conhecimento geral pode ser entendido como a existência de uma prescrição geral para um conjunto de problemas (VAN AKEN, 2004);

Lukka (2003) define as etapas de uma *design science research*: (a) encontrar um problema de relevância prática; (b) obter um entendimento profundo sobre o tópico; (c) desenvolver uma construção para resolver o problema; (d) implementar e testar a solução; (e) examinar o escopo e aplicabilidade da solução; e (f) identificar e analisar a contribuição teórica.

No presente trabalho, optou-se pela abordagem da *design science research* pelos seguintes motivos: (a) a elaboração do PSP lida com a construção de um plano que tem como objetivo contribuir para a gestão do empreendimento, ou seja, seu foco incide sobre um problema real e de relevância prática para a empresa sendo estudada; (b) seu desenvolvimento baseia-se em um modelo para elaboração do PSP proposto previamente e que carece de refinamento quanto à sua adequação em contextos diferentes daquele que o originou, bem como quanto ao emprego de novas ferramentas, tais como simulação e modelagem 4D, para o seu desenvolvimento; (c) o processo de elaboração do PSP envolve estreita cooperação dos intervenientes do empreendimento em estudo, que assumem a forma de uma equipe, na qual o aprendizado se dá com base na proposição e experimentação de soluções para os problemas encontrados. O principal produto desta pesquisa foi a construção de um método (*process-design*) do uso da simulação de eventos discretos e modelagem 4D no processo de PSP. Este método foi avaliado em função da sua utilidade e facilidade de uso.

## 4.2 DELINEAMENTO DA PESQUISA

O delineamento da pesquisa é apresentado na Figura 14. A pesquisa foi dividida em quatro grandes fases: revisão bibliográfica, exploratória, desenvolvimento e consolidação, as quais são relacionadas às etapas típicas da *design science research*.

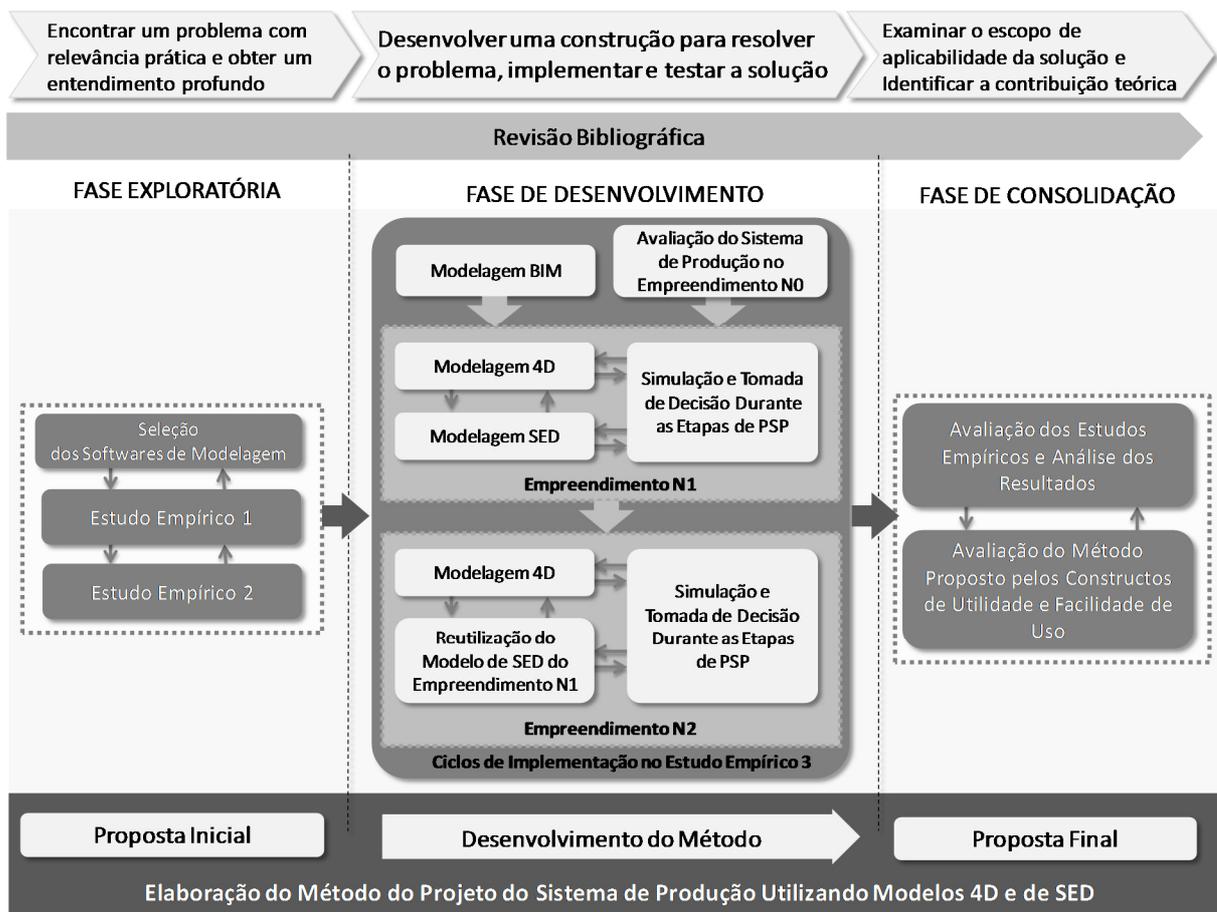


Figura 14: delineamento da pesquisa

A **revisão bibliográfica** foi realizada ao longo de toda a pesquisa, dando suporte ao desenvolvimento, implementação e contribuições das soluções propostas ao longo do desenvolvimento do trabalho. Esta etapa da pesquisa foi realizada com o intuito de encontrar trabalhos que: (a) tivessem desenvolvido métodos, modelos e abordagens para projetar sistemas de produção na construção civil; e (b) discutissem como é utilizada a simulação de eventos discretos e modelagem 4D na construção civil. Inicialmente, foi realizada uma busca de trabalhos desenvolvidos pelo Grupo de Gerenciamento e Economia da Construção do NORIE/UFRGS sob este tema: Biotto (2012), Rodrigues (2006) e Schramm (2004, 2009). A seguir, foram analisados congressos internacionais sobre o tema, principalmente o *International*

*Group for Lean Construction* (IGLC) e o *Winter Simulation Conference* (WSC), e revistas acadêmicas internacionais.

Na fase exploratória, foi realizada a **seleção dos software** utilizados na pesquisa e os **estudos empíricos (EE) 1 e 2**. Na fase de desenvolvimento, foi realizado o **estudo empírico 3**, no qual foi possível aplicar a proposta inicial de método de elaboração de PSP com o uso das ferramentas de 4D e SED em dois empreendimentos distintos. Na última fase, foi **analisada a implementação dos estudos empíricos** e feita uma **avaliação do método** proposto.

### 4.3 FASE EXPLORATÓRIA

A fase exploratória deste trabalho compreende a seleção dos *software* para a utilização na pesquisa e os estudos empíricos 1 e 2. Estas três etapas ocorreram de forma paralela.

#### 4.3.1 Seleção dos softwares

Foram utilizados três diferentes *software* comerciais neste trabalho: modelagem da SED, modelagem BIM e modelagem 4D. A seguir, descreve-se o processo de seleção dos mesmos e o treinamento realizado pela pesquisadora.

##### 4.3.1.1 Simulação de Eventos Discretos

Optou-se por adotar o *software* Arena® 10, da Rockwell Automation Inc., o mesmo utilizado por Schramm (2009), que desenvolveu um estudo anterior sobre o uso de SED para o projeto do sistema de produção no mesmo grupo de pesquisa. Esta decisão foi tomada em função: (a) do alto custo de compra de um novo *software*; (b) pelo fato de que a autora já tinha experiência na utilização do mesmo<sup>19</sup>; (c) pelas vantagens apontadas por Schramm (2009) em relação a outros programas computacionais; e (d) pelo desenvolvimento do módulo de processamento também desenvolvido por Schramm (2009). De fato, Schramm (2009) comparou o Arena com três outros *software*: STROBOSCOPE (Martínez, 1996), ProModel (ProModel Corporation), e Extend (Imagine That Inc.). Os critérios de avaliação dos *software* de SED foram baseados Law e Haider (1989)<sup>20</sup> e Davis e Williams (1994)<sup>21</sup>, citados por Schramm (2009): facilidade de uso,

---

<sup>19</sup>A autora atuou como bolsista de iniciação científica no estudo realizado por Schramm (2009) entre outubro de 2008 e dezembro de 2009.

<sup>20</sup> LAW, A. M.; HAIDER, S. W. Selecting Simulation Software for Manufacturing Application. **Industrial Engineering**, v. 21, n. 5; p. 33-36, May 1989.

<sup>21</sup> DAVIS, L.; WILLIAMS, G. Evaluating and selecting simulation *software* using the analytic hierarchy process. **Integrated Manufacturing Systems**, v. 5, n. 1, p. 23-32, 1994.

adequação ao contexto da pesquisa, qualidade dos recursos de animação; capacidades estatísticas e custo de aquisição. O Quadro 3 mostra o resultado da avaliação dos quatro *software*.

Critérios	Software			
	Stroboscope	ProModel	Arena	Extend
Facilidade de uso	Baixa	Média	Alta	Alta
Adequação ao contexto	Média	Baixa	Alta	Alta
Qualidade dos recursos de animação	Média	Alta	Alta	Média
Capacidade estatística	Alta	Alta	Alta	Alta
Custo de Aquisição	Alta	Baixa	Alta	-
Seleção final	Não	Não	Sim	Não

Quadro 3: avaliação dos *software* de SED (SCHRAMM; 2009)

O Arena é um *software* com capacidades visuais e interativas do *Visual Interactive Modelling Systems*, discutido no capítulo anterior. Dessa forma, o mesmo permite modelar o sistema através de módulos que conte mas lógicas de programação conectadas a estes módulos. Ao final do processo de modelagem é possível obter um diagrama de rede que apresenta o sequenciamento das atividades. As entidades que fluem pelo diagrama de rede são as unidades repetitivas do empreendimento. O Arena também permite a comunicação do modelo com planilhas eletrônicas, o que facilita o processo de atribuição de valores de entrada e o processo de coleta de dados de saída. A Figura 15 mostra o ambiente de trabalho do Arena, o qual é composto por três janelas: a barra de projeto, na qual estão presentes os *templates*; o diagrama de rede, que define a sequência lógica do modelo; e exibição de planilhas.

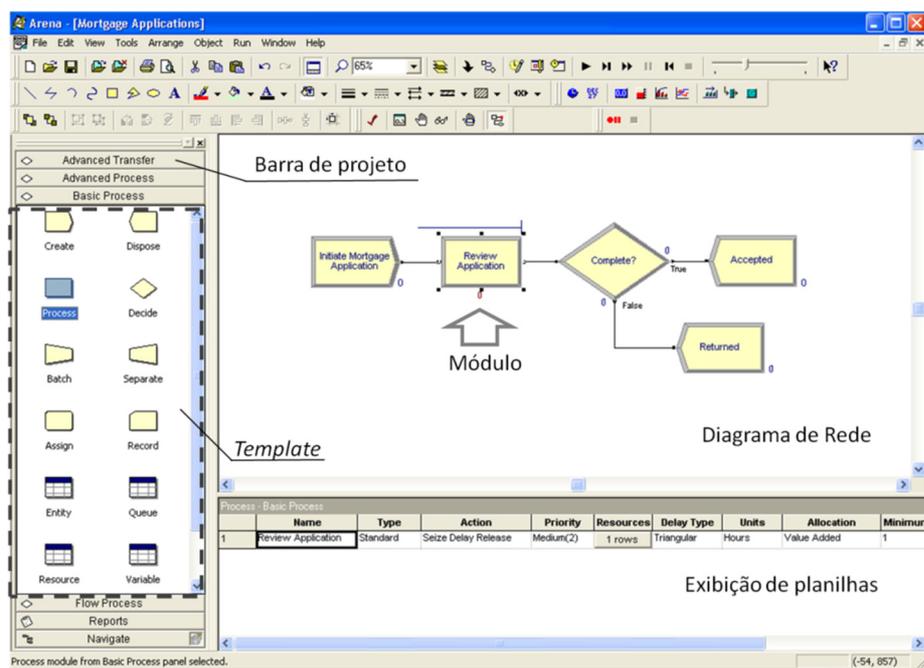


Figura 15: ambiente de trabalho do ARENA

Ao longo do desenvolvimento do seu trabalho, Schramm (2009) desenvolveu um módulo de simulação para reduzir o tempo de desenvolvimento de seus modelos. O mesmo é apresentado na Figura 16, com seus campos editáveis para: duração, recursos utilizados e lotes de produção e transferência.

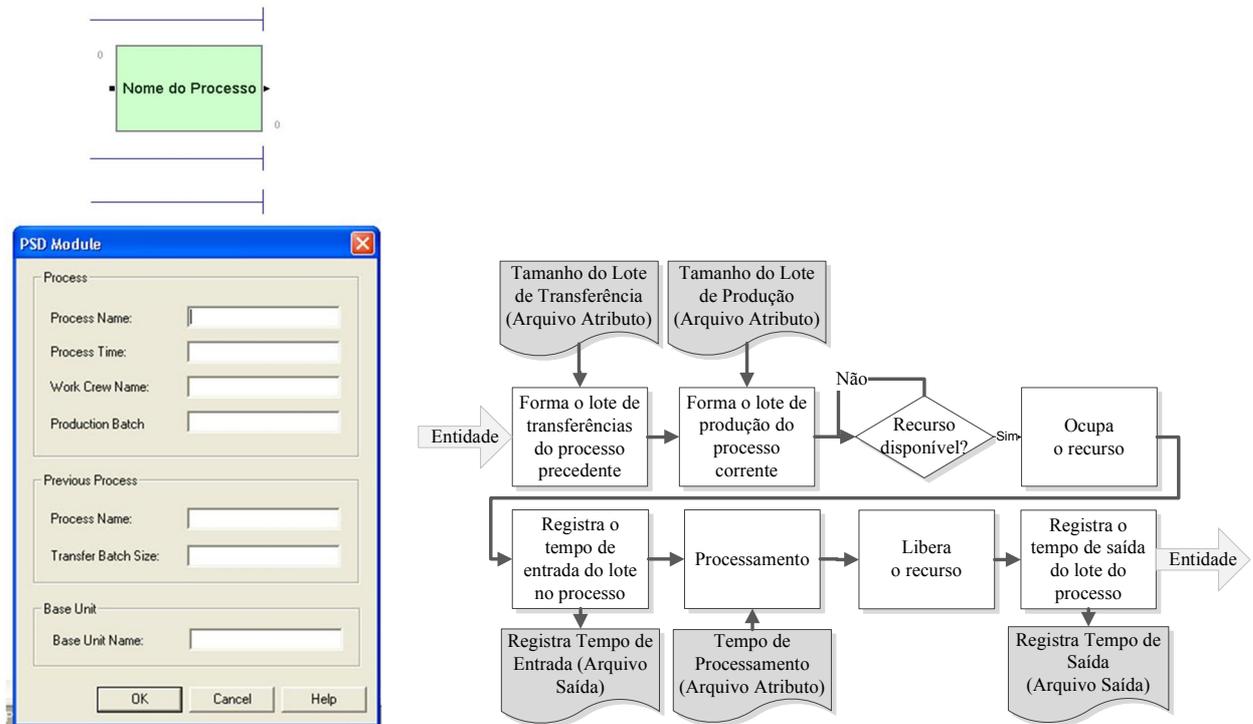


Figura 16: módulo de processamento (SCHRAMM, 2009)

#### 4.3.1.2 Modelagem BIM

Havia a necessidade de escolher um *software* BIM para a modelagem do produto, já que os projetos existentes haviam sido produzidos em 2D pelas empresas participantes desta pesquisa. Também, é necessário que o *software* BIM utilizado facilite a comunicação com o *software* de 4D, principalmente pela extensão IFC. A seleção do *software* de modelagem BIM foi realizada durante um *workshop* interno sobre os programas *Revit Architecture* (Autodesk), na sua versão 2012, e *ArchiCAD* (Graphisoft), na sua versão 16, realizado nos dias 23 e 24 de julho de 2013, por pesquisadores e alunos do NORIE-UFRGS, a maioria dos quais envolvidos no projeto TIC-HIS. Alguns destes alunos tinham grande experiência na utilização dos mesmos. Ambos os *softwares* eram gratuitos para os alunos em sua versão educacional. Os critérios de avaliação adotados nesta avaliação estão apresentados no Quadro 4.

Critérios	Softwares	
	Revit	ArchiCAD
Formatação inicial do modelo BIM	pouca formatação	necessidade de definir penas e padrões
Funções básicas e lógica do programa	Similar	Similar
Quantitativos	necessidade de edição de planilhas	necessidade de edição de planilhas
Importação/exportação	dificuldade de exportar em IFC	facilidade de exportar em IFC
Inserção e localização de informações	dificuldade de inserir informações no IFC	gestão de informações no IFC
Seleção final	Não	Sim

Quadro 4: avaliação dos *software* de modelagem BIM

Ambos os *software* permitem inserir plantas em 2D, como plano de fundo, e modelar os elementos por sobreposição. Já os quantitativos são extraídos com a necessidade de escolher quais informações devem aparecer nas planilhas dependendo do tipo de material, se é a granel ou unidade. Como o *ArchiCAD* salva de forma separada os arquivos de penas e padrões do modelo, o arquivo final apresenta um tamanho menor comparado ao *Revit*. O *ArchiCAD* também apresenta a vantagem de possibilitar a criação de modelos separados, mas conectados entre si, através da extensão .MOD, permitindo atualização entre esses modelos diferentes.

Quanto à exportação em IFC, o *Revit* apresenta dificuldades de exportar os elementos em posições corretas. Também não apresenta de forma facilitada a inserção de informações em IFC ou escolha de quais informações serão exportadas. Já o *ArchiCAD* permite a gestão do IFC, mostrando informações de cada elemento e possibilitando a criação de novas informações. Dessa forma, *software* escolhido para esta pesquisa foi o *ArchiCAD*. O treinamento da equipe<sup>22</sup> teve início durante o *workshop*, o qual permitiu uma primeira familiarização com os programas, e seguiu com a utilização de manual e fóruns de discussão na internet. Durante a fase exploratório, foi utilizado o *Revit* no EE1 e o *ArchiCAD* no EE2 como forma de teste para avaliar a facilidade de comunicação com o *software* de 4D. Dessa forma, a seleção do *software* BIM foi influenciado pela natureza do problema real. É importante salientar que a modelagem BIM para este trabalho apresenta algumas características peculiares. Como o modelo BIM tem o objetivo de produzir o modelo 4D, o modelo do produto teve que ser produzido no nível de detalhe necessário para a atribuição de atividades de execução e com as informações necessárias de IFC para alcançar o seu objetivo.

<sup>22</sup> A equipe de modelagem BIM foi composta por quatro bolsistas de iniciação científica.

Método para integração da simulação de eventos discretos e modelagem 4D no projeto do sistema de produção de empreendimentos habitacionais de interesse social.

### 4.3.1.3 Modelagem 4D

Foram avaliados três *software* de modelagem 4D aos quais a equipe de pesquisa teve acesso: *Navisworks* (pela versão estudantil de 2012), *Navigator* (versão 08.11.08.43) e *Synchro PRO™* (versão 2012). A avaliação foi feita ao longo dos estudos 1 e 2. Como o *software* de modelagem 4D foi utilizado para representar as saídas da simulação do Arena, necessita ter facilidade de comunicação com os dados de duração da SED, além de importar de forma correta as informações do modelo BIM. Também era importante a facilidade de conexão do plano de longo prazo aos elementos em 3D. O Quadro 5 apresenta a comparação entre os *softwares* analisados.

Critérios	Softwares		
	ProjectWise Navigator V8i	Navisworks Manage	Synchro Professional
Inserção de arquivos 3D	vários formatos de importação	vários formatos de importação	vários formatos de importação permite sincronização
Inserção e atualização de arquivos de cronograma	apenas aceita a importação em <i>xml</i> ou <i>mpx</i>	vários formatos de importação e permite editar diretamente no programa	vários formatos de importação e permite editar diretamente no programa
Conexão entre atividade e elemento	existem regras de conexão necessidade de separar os elementos em grupos	existem regras de conexão necessidade de separar os elementos em grupos	manualmente inserção dos elementos como recursos
Inserção e animação de objetos temporários	classificação das atividades inserção de atores e caminhos de movimentação	classificação das atividades inserção caminhos de movimentação	classificação das atividades inserção caminhos de movimentação
Recursos gráficos disponíveis	similar	similar	similar
Geração e animação e vídeos	similar	similar	similar
<b>Seleção final</b>	<b>Não</b>	<b>Não</b>	<b>Sim</b>

Quadro 5: *softwares* de modelagem 4D

O *software Syncho* foi escolhido em função das seguintes vantagens: a sincronia do modelo 3D e inserção dos elementos como recursos através do modelo de arquivo IFC. O treinamento da equipe de pesquisa<sup>23</sup> foi realizado através do manual de utilização do programa.

## 4.3.2 Estudo Empírico 1

### 4.3.2.1 Descrição da Empresa L

A empresa L é uma empresa construtora e incorporadora de pequeno porte fundada em 1980 e situada na cidade de Canoas/RS. A empresa atua no mercado imobiliário da região

<sup>23</sup> A equipe de modelagem 4D foi composta por três bolsistas de iniciação científica.

metropolitana de Porto Alegre, especificamente no nicho de mercado de edificações comerciais e residenciais (de média e baixa rendas). A empresa tem sistema da qualidade certificado pela ISO 9001:2008 desde 2005, assim como pelo Sistema de Avaliação da Conformidade de Empresas de Serviços e Obras (SIAQ), do PBQP-H, nível A desde 2005.

Esta empresa tem sido uma parceira do NORIE/UFRGS no desenvolvimento de pesquisas em gestão da produção e de desenvolvimento de produto desde 1996. Na gestão da produção, esta empresa emprega um modelo de planejamento e controle da produção fortemente baseado no Sistema *Last Planner*. Nos últimos anos a empresa L vem modificando a tipologia de seus empreendimentos. Anteriormente trabalhava mais com condomínios de casas assobradadas e geminadas, e no Período de realização da pesquisa vinha e envolvendo mais com condomínios de edifícios em alvenaria estrutural.

#### 4.3.2.2 Descrição do Empreendimento L1

O empreendimento L1 tratava-se de um condomínio fechado de edifícios, com um total de 428 unidades habitacionais, divididos em 9 edifícios com 8 pavimentos cada um. Cada pavimento é composto por 6 apartamentos, os quais são divididos por uma junta de dilatação separando 2 apartamentos, escada e elevador dos restantes 4 apartamentos. Além das unidades habitacionais, previa-se a construção de áreas verdes, playground, salão de festas e estacionamento privativo.

O empreendimento teve início em outubro de 2011 e prazo final previsto para março de 2014. A área privativa das unidades habitacionais varia entre 52m<sup>2</sup> à 55m<sup>2</sup>, sendo compostas por sala de estar/jantar, cozinha, lavanderia, dormitório casal e solteiro, banheiro e sacada. O Quadro 6 apresenta resumidamente os principais materiais e técnicas construtivas empregados no empreendimento e a Figura 17 apresenta a implantação do empreendimento e o detalhamento da fachada.

<b>Elemento Construtivo</b>	<b>Materiais/Técnicas Construtivas</b>
<b>Fundações</b>	Estaca escavada
<b>Paredes</b>	Alvenaria estrutural de blocos cerâmicos
<b>Lajes</b>	Concreto moldado <i>in loco</i>
<b>Cobertura</b>	Estrutura de madeira
<b>Acabamento das paredes internas e tetos</b>	Gesso corrido e forro de gesso
<b>Acabamento das paredes externas</b>	Monocapa
<b>Esquadrias</b>	Janelas de alumínio e portas de madeira

Quadro 6: descrição dos materiais/técnicas construtivas do empreendimento L1



Figura 17: implantação e perspectiva da fachada do empreendimento L1

#### 4.3.2.3 Descrição das Atividades Realizadas

Este empreendimento já havia sido estudado por outra pesquisa desenvolvida pelo NORIE Biotto(2012), na qual já havia sido elaborado um Projeto do Sistema de Produção. O foco desse estudo foi o processo de modelagem em BIM, 4D e SED, apenas para treinar a equipe envolvida na pesquisa, sem a aplicação da modelagem do sistema de produção para apoiar a tomada de decisão do empreendimento. Por esse motivo, apenas as atividades de execução da laje e elevação da alvenaria foram modeladas.

A modelagem 4D e SED foi realizada com o intuito de avaliar qual as principais dificuldades para integrar as informações de saída da SED e de entrada do 4D e analisar alternativas de *software* 4D em relação à integração com a SED. A modelagem BIM foi realizada de forma mais detalhada, em relação ao trabalho de Biotto (2012), devido a dois fatores: (a) ao treinamento da equipe para a modelagem; e (b) o interesse em avaliar a forma de representação das atividades da SED pelos elementos do modelo do produto. O Quadro 7 apresenta resumidamente as atividades realizadas.

Etapa	Atividade	Ações/ Fontes de Evidências
Preparação para o estudo	2 visitas ao canteiro de obra e entrevista com engenheiro da obra	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ entrevistas não estruturadas com engenheiro da obra para compreensão dos processos em execução;</li> <li>✓ coleta e análise de documentos de planejamento desenvolvido pela obra, projetos arquitetônicos, elétricos e hidráulicos;</li> <li>✓ coleta e análise de documentos gerados no estudo de Biotto (2012)</li> <li>✓ registros fotográficos do canteiro de obras.</li> </ul>
Modelagem BIM/3D	Modelagem BIM unidade base (Revit)	✓ elaboração do modelo BIM da unidade base.
	Modelagem BIM do empreendimento (Revit)	✓ replicação da unidade base nos pavimentos de cada bloco e na quantidade de blocos necessária.
	Modelagem 3D do empreendimento (SketchUp)	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ criação de volumes representando as atividades do empreendimento;</li> <li>✓ detalhamento de equipamentos de proteção coletiva.</li> </ul>
Modelagem SED	Modelagem SED da unidade base (Arena)	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ preparação das planilhas eletrônicas de entrada e saída de dados para a unidade base;</li> <li>✓ modelagem da lógica de simulação da unidade base;</li> <li>✓ validação interna do modelo de simulação.</li> </ul>
	Modelagem SED do empreendimento (Arena)	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ preparação das planilhas eletrônicas de entrada e saída de dados para o empreendimento;</li> <li>✓ replicação da lógica da unidade base na quantidade de pavimentos e blocos necessários;</li> <li>✓ validação interna do modelo de simulação.</li> </ul>
Modelagem 4D	Vinculação Automática entre SED e 4D (Planilha eletrônica)	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ formatação dos dados de saída de simulação pela interface de uma planilha eletrônica;</li> <li>✓ elaboração de uma macro para facilitar a formatação.</li> </ul>
	Modelagem 4D da unidade base (Navigator)	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ separação dos elementos da unidade base em grupos;</li> <li>✓ conexão dos grupos de elementos da unidade base às atividades.</li> </ul>
	Modelagem 4D do empreendimento (Navigator)	✓ conexão dos grupos de elementos da unidade base às atividades.

Quadro 7: resumo das atividades desenvolvidas no EE1

### 4.3.3 Estudo Empírico 2

#### 4.3.3.1 Descrição da Empresa S

A empresa S é uma empresa construtora e incorporadora fundada em 1988 e situada na cidade de Fortaleza/CE. A empresa atua no mercado imobiliário de Fortaleza, especificamente no nicho de mercado de edifícios comerciais e residenciais. A empresa tem sistema da qualidade certificado pela ISO 9001:2008, assim como pelo Sistema de Avaliação da Conformidade de Empresas de Serviços e Obras (SIAQ), do PBQP-H, nível A.

A empresa S foi uma das fundadoras do Programa de Inovação da Indústria da Construção Civil do Estado do Ceará (INOVACON-CE), que desde 1998 busca o desenvolvimento tecnológico da construção civil cearense através da cooperação entre as empresas participantes, instituições

de ensino superior, e consultores nacionais e locais. Os avanços obtidos por esta empresa ao longo dos anos, na gestão da construção, principalmente no que se refere à filosofia *lean*, tem atraído a atenção de pesquisadores nacionais e estrangeiros.

#### 4.3.3.2 Descrição do Empreendimento S1

O empreendimento S1 consistiu de um edifício residencial, com 28 pavimentos, sendo 2 subsolos de garagem, 3 primeiros andares ocupados por áreas de uso comum, os 22 seguintes pavimentos-tipo e cobertura, num total de 44 unidades habitacionais. As unidades habitacionais tem área privativa de 80m<sup>2</sup> e são compostas por uma suíte, um banheiro, uma dependência de empregada, sala e cozinha conjugada e três sacadas. O empreendimento teve início em 28 de março de 2011 e prazo final previsto para 20 de janeiro de 2014. O Quadro 8 apresenta resumidamente os principais materiais e técnicas construtivas empregados no empreendimento e a Figura 18 apresenta a implantação do empreendimento e o detalhamento da fachada.



Figura 18: implantação e perspectiva da fachada do empreendimento S1

Elemento Construtivo	Materiais/Técnicas Construtivas
Fundações	Estaca raiz
Paredes	Alvenaria de blocos cerâmicos
Pilares e Lajes	Concreto moldado <i>in loco</i> e laje nervurada
Acabamento das paredes internas e tetos	Gesso corrido e forro de gesso
Acabamento das paredes externas	Cerâmica
Esquadrias	Janelas de alumínio e portas de madeira

Quadro 8: descrição dos materiais/técnicas construtivas do empreendimento S1

#### 4.3.3.3 Descrição das Atividades Realizadas

As empresas participantes do INOVACON-CE entraram em contato com a equipe de pesquisa para obter capacitação sobre simulação computacional. A estruturação da capacitação consistia em uma parte teórica, com aulas expositivas, e uma parte aplicada, com o uso do *software* Arena, o qual o empreendimento apresentado acima foi escolhido. Dessa forma, este estudo foi realizado sob condições diferenciadas, já que os participantes do estudo tiveram uma base teórica maior sobre SED e modelagem 4D. Por esse motivo toda a modelagem foi realizada pela interface do *software* de simulação Arena, já que o mesmo foi apresentado e utilizado na fase prática desta capacitação. Também a duração do estudo foi bem restrita, sendo realizado de agosto a setembro de 2012.

A partir da identificação da tipologia do empreendimento, foi observado que a modelagem das atividades de fachada seria mais vantajosa devido a: (a) possibilidade de exploração visual das ferramentas que estavam sendo utilizadas; e (b) possibilidade de utilizar as decisões e conclusões desse estudo nas outras empresas participantes do INOVACON-CE, já que esta tipologia construtiva era similar entre elas. Também foi escolhida as atividades de fachada, porque o empreendimento já estava executando as atividades de estrutura. Devido a este motivo e ao curto período de execução do estudo, não seria possível realizar todas as etapas do PSP. Dessa forma, optou-se por realizar um projeto de processos críticos. Assim, as atividades vinculadas aos elementos externos como, alvenaria de vedação, esquadrias e revestimento de cerâmica, foram o foco deste estudo e do modelo 4D. As atividades internas, com interface com as atividades de fachada, foram apenas modeladas no modelo de simulação.

Participaram os seguintes profissionais de gestão da produção e planejamento da empresa: diretor da empresa, engenheiro da obra, dois representantes da empresa de consultoria de planejamento que prestava serviços à empresa S. Diferente do EE1, este teve o intuito de utilizar o processo de modelagem BIM, 4D e SED para auxiliar no processo de tomada de decisão do empreendimento. Dessa forma foram desenvolvidas as etapas de: (a) preparação para o estudo; (b) modelagem BIM e SED; (c) desenvolvimento de projeto de processos críticos; e (d)

---

Método para integração da simulação de eventos discretos e modelagem 4D no projeto do sistema de produção de empreendimentos habitacionais de interesse social.

modelagem 4D. O Quadro 9 apresenta de forma resumida as atividades desenvolvidas neste estudo.

<b>Etapa</b>	<b>Atividade</b>	<b>Ações/ Fontes de Evidências</b>
<b>Preparação para o estudo</b>	1 reunião com o engenheiro da obra, diretor da empresa e empresa consultora de planejamento	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ definição dos objetivos do estudo;</li> <li>✓ coleta e análise de documentos de planejamento e projetos.</li> </ul>
<b>Modelagem BIM</b>	Modelagem BIM unidade base (ArchiCAD)	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ elaboração do modelo BIM da unidade base.</li> </ul>
	Modelagem BIM do empreendimento	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ replicação da unidade base nos pavimentos necessários (ArchiCAD);</li> <li>✓ elaboração de equipamentos de proteção coletiva e de movimentação vertical (SketchUp).</li> </ul>
	1 reunião para validação do modelo BIM	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ validação dos modelos BIM (unidade base e empreendimento) e dúvidas quanto ao projeto;</li> </ul>
<b>Modelagem SED</b>	Modelagem SED das atividades internas e fachada (Arena)	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ preparação das planilhas eletrônicas de entrada e saída de dados;</li> <li>✓ sequenciamento inicial das atividades.</li> </ul>
	3 reuniões com o engenheiro da obra, diretor da empresa e empresa consultora de planejamento	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ coleta de durações das atividades;</li> <li>✓ caminhada estruturada do modelo;</li> <li>✓ validação da sequencia e lógicas de programação</li> </ul>
<b>Desenvolvimento do Estudo de Projeto de Processos Críticos</b>	2 reuniões com o engenheiro da obra, diretor da empresa e empresa consultora de planejamento	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ simulação de 5 cenários (3 alternativas da atividade de contrapiso e 2 alternativas de execução da fachada).</li> </ul>
<b>Modelagem 4D</b>	Modelagem 4D do empreendimento (Synchro)	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ reagrupamento dos recursos (elementos BIM) em grupos de atividades;</li> <li>✓ conexão dos grupos de elementos às atividades;</li> </ul>

Quadro 9: resumo das atividades desenvolvidas no EE2

## 4.4 FASE DE DESENVOLVIMENTO

### 4.4.1 Estudo Empírico 3

#### 4.4.1.1 Descrição da Empresa N

A empresa N é uma empresa construtora e incorporadora de médio porte o qual foi criada a partir da fusão de quatro empresas situadas na região metropolitana de Porto Alegre. A empresa N atua hoje no mercado imobiliário do Rio Grande do Sul, especificamente no nicho de mercado de edificações comerciais e residenciais (de média e baixa rendas). A empresa tem sistema da qualidade certificado pela ISO 9001 desde 2012, assim como pelo Sistema de Avaliação da Conformidade de Empresas de Serviços e Obras (SIAQ), do PBQP-H, nível A. Duas das empresas formadoras da empresa N têm sido parceiras no NORIE/UFRGS no

desenvolvimento de pesquisas em gestão da produção e de desenvolvimento de produto. Na gestão da produção, a empresa N utiliza um sistema planejamento e controle da produção que possui alguns elementos do Sistema *Last Planner*. Atualmente a empresa N tem 6 empreendimentos concluídos, totalizando 3.394 unidades habitacionais desta tipologia, e 13 empreendimentos em andamento, totalizando 5.350 unidades habitacionais.

#### 4.4.1.2 Descrição dos Empreendimentos

O estudo envolveu empírico 3 envolveu três empreendimentos (N0, N1 e N2), com a mesma tipologia construtiva localizados em uma mesma área de investimento imobiliário. Devido ao grande volume de obras nessa tipologia na empresa N, tornou-se vantajoso estudar os empreendimentos escolhidos (N0, N1 e N2) sob o escopo do Projeto do Sistema de Produção com o uso de SED e 4D. Dessa forma as decisões tomadas nos empreendimentos escolhidos, podem ser utilizadas e adaptadas nos outros empreendimentos de mesma tipologia, formalizando um PSP para este tipo específico de empreendimento e empresa. Também é importante salientar que, para a escolha do empreendimento, a equipe de pesquisa deu a preferência a empreendimentos que utilizassem tecnologias industrializadas, devido à sua crescente importância na construção habitacional de baixa renda. Os empreendimentos são apresentados na Figura 19 e localizam-se na Região Metropolitana de Porto Alegre, todos financiados pelo Programa Minha Casa, Minha Vida.

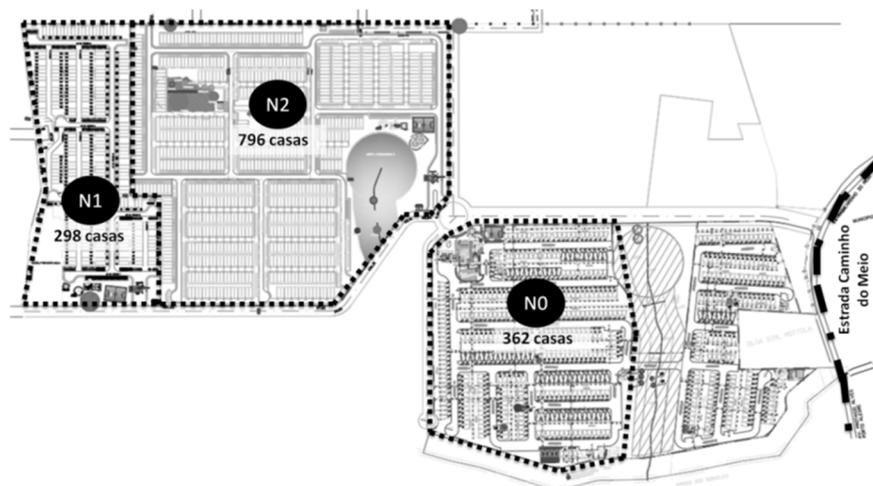


Figura 19: implantação dos empreendimentos que compõem o EE3

O empreendimento N0 é um condomínio fechado de casas, com um total de 362 unidades habitacionais divididas em duas fases de entrega. Estas apresentam quatro tipos de plantas, variando na área e números de dormitórios ou suítes (ver Figura 20): (a) casa A possui 2 dormitórios e 45,75 m<sup>2</sup>; (b) casa B1 possui 3 dormitórios e 58,63 m<sup>2</sup>; (c) casa B2 possui um

dormitório, uma suíte e 58,63 m<sup>2</sup>; e (d) casa C possui 2 dormitórios, uma suíte e 65,55m<sup>2</sup>. Este empreendimento teve início em novembro de 2011 e prazo final previsto para março de 2013.



Figura 20: planta baixa do empreendimento N0

Já o empreendimento N1 possui um total de 298 unidades habitacionais. Estas apresentam 2 dormitórios, um banheiro, sala e cozinha conjugada e área de serviço na parte externa, totalizando aproximadamente 43 m<sup>2</sup> (ver Figura 21). Este empreendimento teve início em março de 2013 e prazo final previsto para janeiro de 2014. O mesmo é dividido em duas fases de entrega e apresenta 13 quadras, as quais são nomeadas de C até O (Figura 21).

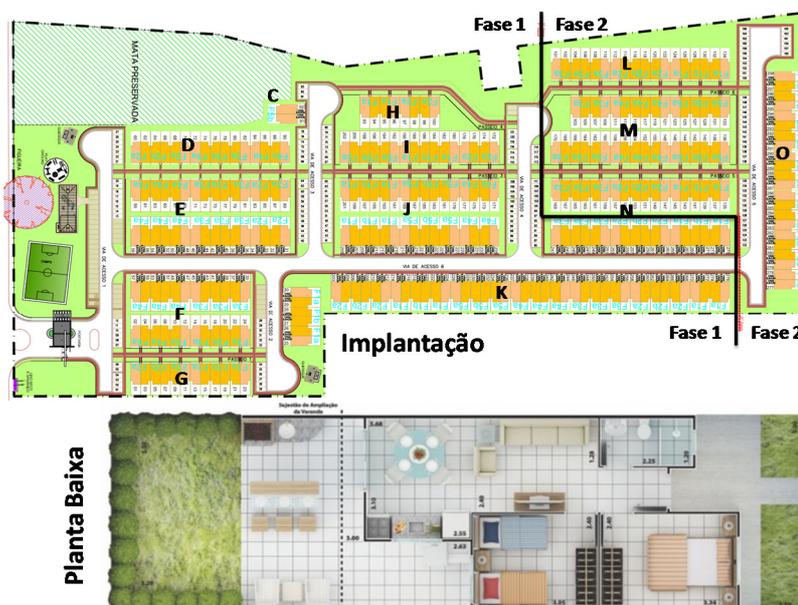


Figura 21: planta baixa e implantação do empreendimento N1

Por fim, o condomínio N2 tem um total de 796 unidades habitacionais. Estas apresentam sala e cozinha conjugada, área de serviço externa e duas opções de plantas, ou 3 dormitórios e um banheiro ou duas suítes, totalizando aproximadamente 53 m<sup>2</sup> (Figura 22). O mesmo teve início

em abril de 2013 e prazo final previsto para março de 2015. O empreendimento é dividido em três fases de entrega e apresenta 9 quadras, as quais são nomeadas de A até I (Figura 22).



Figura 22: planta baixa e implantação do empreendimento N2

Além das unidades habitacionais, prevê-se a construção de áreas de uso comum em cada um dos condomínios, incluindo portaria central, salão de festas, mini-campo de futebol gramado, *playground*, quiosques com churrasqueiras, e vagas de estacionamento. O Quadro 10 apresenta resumidamente os principais materiais e técnicas construtivas empregadas nos empreendimentos do EE3. A seguir, é descrito o processo de produção das paredes.

Elemento Construtivo	Materiais/Técnicas Construtivas
Fundações	<i>Radier</i>
Paredes	Concreto Armado <i>in loco</i>
Janelas	Alumínio
Portas	Madeira
Acabamento das paredes internas	Pintura e Cerâmica nas Áreas Molhadas
Forro e Telhado	Telha Cerâmica, Estrutura Metálica e Gesso
Acabamento das paredes externas	Textura e Pintura

Quadro 10: descrição dos materiais e técnicas construtivas dos empreendimentos N0,N1 e N2

#### 4.4.1.3 Descrição da Tecnologia Construtiva Utilizada na Execução das Paredes

Tendo em vista as características peculiares da tecnologia construtiva empregada na execução das paredes no EE3, o processo de construção utilizado será descrito sucintamente nessa seção. Primeiramente, são executados os *radier* e instalações elétricas e hidrossanitárias da forma tradicional (Figura 23 – etapas 1).



**Etapa 1:** radier e esperadas instalações elétricas e hidráulicas



**Etapa 2:** instalação das telas e reforços estruturais



**Etapa 3:** instalações elétricas posicionadas nas telas



**Etapa 4:** colocação das formas das paredes



**Etapa 5:** regularização das paredes



**Etapa 6:** estrutura e telhamento dom telha cerâmica

Figura 23: detalhes do sistema construtivo das casas do EE3

A unidade de produção da atividade de paredes corresponde a duas unidades habitacionais, já que cada conjunto de fôrmas compõem duas casas. A execução das paredes inicia pela colocação de uma tela de aço, na qual são fixadas as instalações elétricas e hidrossanitárias. Posteriormente são montadas as fôrmas de alumínio, ao redor das telas pré-montadas (Figura 23 – etapas 2, 3, 4). Depois de montadas as fôrmas, as paredes são preenchidas com concreto usinado. A montagem das formas e a concretagem de cada dupla de casas duram apenas um

dia. No dia seguinte as formas podem ser removidas, o que permite a utilização ininterrupta das mesmas, pois seu custo é relativamente alto em relação aos outros recursos. Após alguns dias de cura, são feitos alguns arremates em função de possíveis falhas na concretagem. Por fim, são executadas a cobertura com o auxílio de linhas de vida (Figura 23 – etapas 6) e as atividades de acabamento interno e externo.

#### 4.4.1.4 Descrição das Atividades Realizadas

No empreendimento N0 foi realizado o diagnóstico do sistema construtivo, o qual durou de setembro a novembro de 2012. Este diagnóstico teve como objetivo identificar algumas oportunidades de melhoria no sistema de produção da empresa e também mobilizar alguns dos participantes para engajá-los no estudo. Foram realizadas visitas à obra e acompanhadas as reuniões de curto prazo, para caracterizar o dia a dia da obra e dificuldades de gestão. O resumo das ações realizadas nesse diagnóstico está apresentado no Quadro 11.

Etapa	Atividade	Ações/ Fontes de Evidências
Diagnóstico do Sistema de Produção	1 visita na obra para iniciar o diagnóstico do sistema	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ apresentação do objetivo do estudo;</li> <li>✓ entrevista aberta com o engenheiro da obra sobre os problemas enfrentados da gestão desse tipo de empreendimento.</li> </ul>
	acompanhamento de 2 reuniões de curto prazo	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ observação direta da rotina de programação semanal;</li> <li>✓ entrevista aberta com o engenheiro da obra sobre os problemas enfrentados na programação semanal;</li> <li>✓ aplicação do protocolo de boas práticas de planejamento.</li> </ul>
	análise de documentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ análise de projetos arquitetônicos;</li> <li>✓ análise de planos de longo prazo de dois outros empreendimentos executados pela empresa e já concluídos;</li> <li>✓ plano de qualidade;</li> <li>✓ planos de curto prazo.</li> </ul>
	1 seminário com a participação do setor de planejamento, diretor da produção e diretor do planejamento	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ apresentação dos resultados do diagnóstico e discussão das melhorias a ser implementadas.</li> </ul>

Quadro 11: resumo das atividades desenvolvidas no empreendimento N0

Foram utilizados gráficos de aderência ao plano e linha de balanço, além as observações realizadas em obra para mostrar como o planejamento e controle da produção estava acontecendo. Os dados desse diagnóstico serviram de base para os trabalhos subsequentes de melhorias nas obras N1 e N2 e os mesmos foram apresentados para a gerência da empresa visando a definir algumas diretrizes para implementações futuras do PSP.

As modelagens 4D e de SED dos empreendimentos N1 e N2 foram realizadas de forma sequencial. Dessa forma, foi possível aprimorar o processo de modelagem. Este iniciou pela modelagem BIM da unidade base e, em paralelo, a modelagem de SED e 4D da unidade base. Depois de validado os modelos da unidade base, foi elaborado o modelo 4D e SED do empreendimento N1. Apenas com o fim do estudo do empreendimento N1, iniciou-se a modelagem do empreendimento N2. O Quadro 12 apresenta de forma resumida as atividades de modelagem do EE3.

<b>Etapa</b>	<b>Atividade</b>	<b>Ações/ Fontes de Evidências</b>
<b>Modelagem BIM</b>	Modelagem BIM unidade base (ArchiCAD)	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ elaboração do modelo BIM da unidade base;</li> <li>✓ definição das propriedades de IFC para cada elemento da unidade base.</li> </ul>
<b>Modelagem SED</b>	Modelagem SED da unidade base (Arena)	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ preparação das planilhas eletrônicas de entrada e saída de dados;</li> <li>✓ sequenciamento inicial das atividades.</li> </ul>
	Modelagem SED do empreendimento N1 (Arena)	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ preparação das planilhas eletrônicas de entrada e saída de dados;</li> <li>✓ replicação da sequência da unidade base em trechos do empreendimento.</li> </ul>
	Modelagem SED do empreendimento N2 (Arena)	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ reutilização das planilhas eletrônicas de entrada e saída de dados;</li> <li>✓ reutilização do modelo de SED do empreendimento N1, mas em frentes de trabalho.</li> </ul>
<b>Modelagem 4D</b>	Modelagem 4D da unidade base (Synchro)	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ inserção das unidades;</li> <li>✓ conexão dos elementos às atividades.</li> </ul>
	Modelagem 4D do empreendimento (Synchro)	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ inserção da implantação do empreendimento;</li> <li>✓ inserção das unidades base para todo o empreendimento;</li> <li>✓ conexão dos elementos às atividades.</li> </ul>

Quadro 12: resumo do processo de modelagem dos empreendimentos N1 e N2

No empreendimento N1 foi aplicado o método de elaboração de PSP com o uso da SED e modelos 4D, desde a análise da unidade base até o empreendimento como um todo. O estudo teve início em dezembro de 2012 e fim em fevereiro de 2013, ou seja, as decisões sobre o sistema de produção foram realizadas antes do início do empreendimento. Foram realizadas 6 reuniões a fim de coletar informações, de tomar decisão quanto as estratégias produtivas e apresentar resultados. O Quadro 13 apresenta de forma resumida as atividades desenvolvidas neste estudo.

Etapa	Atividade	Ações/ Fontes de Evidências
<b>Estudo da Unidade Base</b>	1 reunião com a equipe de produção do empreendimento N1 <sup>24</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ apresentação do que é PSP;</li> <li>✓ definição da sequência da unidade base através do diagrama de precedência;</li> <li>✓ pré dimensionamento dos recursos através da planilha de pré-dimensionamento.</li> </ul>
	1 reunião com a equipe de produção do empreendimento N1	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ apresentação do que é simulação e como pode ser utilizada na gestão da construção;</li> <li>✓ validação dos modelos da unidade base;</li> <li>✓ discussão das durações históricas e determinação das distribuições de probabilidade das atividades.</li> </ul>
<b>Estudo do empreendimento N1</b>	1 reunião com a equipe de produção do empreendimento N1	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ definição de 2 alternativas de plano de ataque do empreendimento</li> </ul>
	1 reunião com a equipe de produção do empreendimento N1	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ discussão dos resultados dos cenários 1 e 2 através de histogramas e linha de balanço.</li> </ul>
	1 reunião com a equipe de produção do empreendimento N1	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ discussão dos resultados dos cenários 3 e 4 através de histogramas, linha de balanço, sequenciamento de concretagens e gráfico de tempo em espera.</li> </ul>
	1 reunião com a equipe de produção do empreendimento N1	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ localização dos estoques ao longo do tempo.</li> </ul>

Quadro 13: resumo das atividades desenvolvidas no empreendimento N1

No empreendimento N2 também foi aplicado o método de elaboração de PSP com SED e 4D, mas apenas a análise do empreendimento, já que a unidade base se assemelha com o empreendimento N1. Foram realizadas 4 reuniões a fim de coletar informações, tomar decisão quanto as estratégias produtivas e apresentar resultados. O estudo teve início em março de 2012 e fim em maio de 2013, ou seja, as decisões sobre o sistema de produção também foram realizadas antes do início do empreendimento. O Quadro 14 apresenta de forma resumida as atividades desenvolvidas neste estudo.

<sup>24</sup> A equipe de produção do empreendimento N1 era composta pelo engenheiro da obra, coordenador de obras horizontais, gerente de planejamento e 2 responsáveis pelo planejamento das obras.

Método para integração da simulação de eventos discretos e modelagem 4D no projeto do sistema de produção de empreendimentos habitacionais de interesse social.

Etapa	Atividade	Ações/ Fontes de Evidências
<b>Estudo do empreendimento N2</b>	1 reunião com a equipe de produção do empreendimento N2 <sup>25</sup>	✓ definição de 2 alternativas de plano de ataque do empreendimento.
	1 reunião com a equipe de produção do empreendimento N2	✓ discussão dos resultados dos cenários 1 e 2 através de histogramas, linha de balanço, sequenciamento de concretagens e gráfico de tempo em espera.
	1 reunião com a equipe de produção do empreendimento N2	✓ discussão dos resultados dos cenários 3 através de histogramas, linha de balanço, sequenciamento de concretagens, gráfico de tempo em espera e modelo 4D.
	1 reunião com a equipe de produção do empreendimento N2	✓ discussão dos resultados dos cenários 4 através de histogramas, linha de balanço, sequenciamento de concretagens, gráfico de tempo em espera e modelo 4D.

Quadro 14: resumo das atividades desenvolvidas no empreendimento N2

#### 4.5 FASE DE CONSOLIDAÇÃO

Nessa etapa, os dados gerados pelos três estudos foram reunidos e comparados visando propor a versão final do método, considerando suas contribuições. Por se tratar de uma pesquisa construtiva, o artefato gerado necessitou ser avaliado através de dois constructos: utilidade e facilidade de uso. Outros trabalhos que propuseram avaliações de modelos gerenciais foram também utilizados como referência para definição desses critérios, principalmente os estudos de Schramm (2009) e Biotto (2012).

Com relação à utilidade do método (ver Quadro 15), entende-se que esse pode ser considerado útil se houver melhoria no processo de tomada de decisão do PSP com a modelagem de SED e 4D. Esta melhoria pode ser advinda do aumento da comunicação e entendimento das decisões entre os participantes, da utilização das informações provenientes da modelagem do sistema de produção na tomada de decisão e na integração das informações para a tomada de decisão. Já sobre a facilidade de uso do método, foi analisada a participação das pessoas no processo de modelagem do sistema de produção, a transparência das informações no processo e a eficiência do método de modelagem do sistema de produção.

<sup>25</sup> A equipe de produção do empreendimento N2 era composta pelo coordenador de obras horizontais, gerente de planejamento e 2 responsáveis pelo planejamento das obras.

Constructo	Desdobramento	Subconstructo	Fontes de Evidência
Utilidade	<b>Aumento da comunicação e entendimento das decisões entre os participantes</b>		Observação Participante e Entrevista
	<b>Utilização das informações provenientes da modelagem do sistema de produção na tomada de decisão</b>	Principais decisões tomadas pelo uso do método	Observação Participante
		Maior número de informações para tomada de decisão	Registro do número de cenários simulados e registro de solicitações por novos cenários
Facilidade de Uso	<b>Mecanismos de participação das pessoas no processo de modelagem</b>	Integração dos participantes no processo	Observação Participante
		Número de participantes para a tomada de decisão	Registro do número de participantes nas reuniões
	<b>Transparência das informações no processo</b>	Facilidade de entender os modelos e obter as informações desejadas	Observação Participante
		Interesse em continuar o uso das ferramentas	Entrevista com os participantes
	<b>Eficiência do método de modelagem</b>	Tempo despendido nas modelagens BIM, SED e 4D	Registro do tempo despendido

Quadro 15: constructo utilidade e facilidade de uso

## 4.6 FONTES DE EVIDÊNCIAS

### 4.6.1 Entrevistas

Segundo Yin (2003) as entrevistas são fontes de evidências essenciais no desenvolvimento de estudos de caso já que uma de suas principais vantagens é possibilitar a realização de inferências sobre os dados registrados segundo a percepção dos entrevistados. As entrevistas realizadas neste trabalho estão resumidas no Quadro 16.

Assunto		Respondentes	Estudos Aplicados
<b>Entrevista estruturada</b>	IBPPCP (RECK, 2010)	Engenheiros de obras	N0
<b>Entrevista aberta</b>	Apresentação do tema da pesquisa e definição dos objetivos do estudo	Diretor da Empresa/ Diretor de Planejamento	EE2 e EE3
		Gerente de Planejamento	EE3
		Engenheiro da Obra	EE2 e EE3
		Engenheiro de Planejamento	EE2 e EE3
	Verificação dos constructos utilidade e facilidade de uso	Empresa de consultoria de Planejamento	EE2
		Engenheiro da Obra, Coordenador das Obras, Gerente de Planejamento, Analista de Planejamento	EE3

Quadro 16: resumo dos tipos de entrevistas realizadas em cada estudo

Como entrevista estruturada, no diagnóstico do sistema de produção do EE3 foi utilizado o roteiro do boas práticas de planejamento proposto por Reck (2010), no qual são utilizadas três fontes de evidência (entrevista estruturada, análise documental e observação sistemática) para

Método para integração da simulação de eventos discretos e modelagem 4D no projeto do sistema de produção de empreendimentos habitacionais de interesse social.

estruturar a avaliação do sistema de planejamento e controle em obra. Foram realizadas duas formas de entrevista abertas durante este trabalho. A primeira consistiu na apresentação da pesquisa aos envolvidos das empresas, tendo também como objetivo a sensibilização dos gestores dos empreendimentos do EE2 e EE3. Já o segundo tipo de entrevista foi realizado para avaliar o método proposto através dos constructos de utilidade e facilidade de uso. Esta está apresentada no Apêndice A deste trabalho.

#### **4.6.2 Observação Participante**

A observação participante, segundo Yin (2003), é um modo especial de observação, no qual, o pesquisador não é um mero observador passivo, mas assume uma variedade de papéis dentro do estudo de caso e pode participar dos eventos estudados. Uma vez que o foco deste trabalho refere-se ao processo de elaboração do PSP, a observação participante foi uma das principais oportunidades para coleta de dados durante este trabalho. Nesse caso, durante as reuniões de elaboração do PSP a pesquisadora assumiu um papel ativo na implementação e desenvolvimento do processo. Esse papel atuante do pesquisador é um procedimento comum na realização de *design science research*. Desta forma, em todas as reuniões de PSP realizadas no EE3, os resultados das observações foram anotados no caderno de campo, além de ser gravado o desenvolvimento da reunião. Dessa forma as principais reflexões acerca das informações coletadas foram registradas e serviram de base para criar um histórico do processo para futuras reflexões.

#### **4.6.3 Observação Direta e Registro Fotográfico**

Segundo Yin (2003) a observação direta pode ser utilizada em estudos de caso para analisar alguns comportamentos relevantes ou condições ambientais. Segundo o mesmo autor, as observações diretas podem ser realizadas informalmente, ou de forma sistemática, através do uso de protocolos observacionais. Este tipo de evidência é normalmente útil em prover informações adicionais sobre o tema de estudo. No EE3, essa fonte de evidência foi utilizada para aplicação do roteiro de boas práticas de planejamento (RECK, 2010) para avaliar a forma e rotina de aplicação do planejamento e controle da produção. Além disso, a observação direta e o registro fotográfico foram utilizados durante: (a) as reuniões de curto prazo do empreendimento N0, na fase de diagnóstico do sistema de produção do EE3; e (b) de visitas às obras dos três estudos empíricos deste trabalho, para coletar informações de leiaute de canteiro,

arranjo físico dos equipamentos e estoques, complementando os dados obtidos em entrevistas e nas análises de documentos.

#### **4.6.4 Análise de documentos**

O uso mais importante de documentos é em corroborar e aumentar as evidências provenientes de outras fontes (YIN, 2003). Para análise do sistema de produção dos empreendimentos, fez-se necessário a análise de documentos digitais elaborados pelas empresas participantes. Dessa forma, durações de atividades da empresa N foram obtidas de empreendimentos similares e já concluídos desta empresa e foram utilizados como dados históricos de entrada para a simulação. Já a análise dos planos de longo, médio e curto foi utilizada para evidenciar as impressões obtidas durante o diagnóstico do sistema de produção do EE3. E, por fim, os projetos em CAD 2D foram analisados e foram utilizados como dados de entrada para a modelagem BIM.

## 5. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

Este capítulo descreve e discute os estudos empíricos desenvolvidos durante esta pesquisa. Ao final é apresentado o método de elaboração do PSP com a utilização de SED e 4D e a avaliação do mesmo.

### 5.1 ESTUDO EMPÍRICO 1

Inicialmente, foram coletados documentos para a modelagem BIM/3D e a definição do sistema de produção a ser modelado. Esta definição do sistema de produção consiste nas duas primeiras etapas do PSP definidas por de Schramm (2009): (a) definição da sequência de execução da unidade base, e (b) pré-dimensionamento da capacidade dos recursos, lotes de produção e transferência e ritmos de produção.

Dessa forma, na primeira visita ao canteiro de obras foram obtidos os projetos necessários para a modelagem BIM 3D do empreendimento, o plano da qualidade e o plano de longo prazo da obra. Nesta visita, também foi realizado um registro fotográfico das atividades que envolvidas nos processos de execução da laje e alvenaria e também do *layout* do canteiro. Com esses dados foi possível definir, inicialmente, as atividades do sistema de produção através de um diagrama de precedência. As atividades, representadas no diagrama de precedência, são: (a) concretagem, forma, armadura e instalações hidrossanitárias e elétricas; (b) marcação da primeira fiada; (c) elevação final da alvenaria; (d) vergas, contravergas; (e) instalações elétricas; (f) cinta de respaldo; e (g) *groute*. Com os dados de durações do plano de longo prazo do empreendimento, foi possível definir a planilha de pré dimensionamento da capacidade produtiva, com durações determinísticas, lotes de produção e transferência.

A partir da definição do sistema a ser estudado, iniciou-se a modelagem da unidade base do modelo de SED. Para o modelo de simulação, adotou-se a construção modular, ou seja, elaboração do modelo e validação em partes da construção, iniciando por módulos menores e evoluindo em tamanho e complexidade ao longo do seu desenvolvimento. Dessa forma foi criado primeiro a sequência de execução do sistema de produção para um edifício e posteriormente replicado 9 vezes, de acordo com o número de edifícios presentes no empreendimento.

O modelo de simulação foi programado para ler de uma planilha eletrônica as durações das atividades, lotes de produção e transferência e escrever as durações de início e fim de cada atividade, como pode ser visto na Figura 24. Em todos os estudos foi utilizada a distribuição triangular, pois mesmo utilizando dados históricos das empresas, estes registros não eram confiáveis. Os mesmos poderiam ter inconsistências na inserção das durações executadas no software de planejamento utilizado pelas empresas estudadas, o MS Project. Dessa forma, optou-se por iniciar as discussões quanto à distribuição das atividades pelos dados dos cronogramas dos empreendimentos e depois discutir estas distribuições com base na experiência da gerencia.

Foi utilizada duração de *warmup* para o sistema, pois era de interesse que a simulação representasse o tempo de mobilização e desmobilização das equipes de produção. Em todos os estudos, o número de replicações foi estabelecido para um nível de confiança mínimo de 95% e um erro admissível de 10% do valor da média. Apenas as médias dessas replicações foram utilizadas na conexão ao modelo 4D, de acordo com a recomendação de Law e McComas (1991).

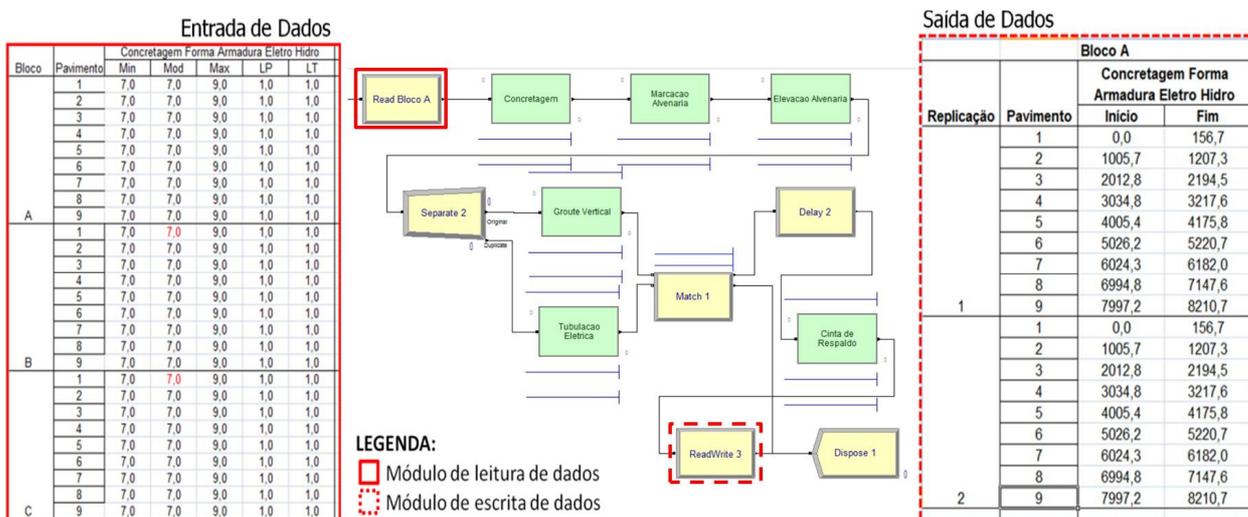


Figura 24: modelo de simulação apresentando as planilhas de entrada e saída de dados e as sequências de execução de cada edifício

De forma paralela a modelagem de SED, foi realizada a modelagem BIM. Esta foi realizada nos *softwares* Revit Architecture e MEP, e com a utilização de um *template* para habitação de interesse social desenvolvido pelo Ministério de Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior<sup>26</sup>. O modelo BIM da unidade base, que no caso do EE1 é o pavimento tipo, foi

<sup>26</sup> Este arquivo pode ser obtido através do site do Ministério das Cidades ([www.construirdesenvolvimento.com.br/index.php/92/difusao-normalizacao-bim/arquivos-bim/](http://www.construirdesenvolvimento.com.br/index.php/92/difusao-normalizacao-bim/arquivos-bim/)).

modelado com os seguintes elementos: (a) laje de concreto armado; (b) blocos cerâmicos; (c) instalações elétricas e hidrossanitárias; (d) pontos de *groute*; (e) vergas e contravergas; e (f) cinta de respaldo. O modelo da unidade base foi detalhado nesses elementos para avaliar a necessidade de detalhamento para a vinculação com as atividades do sistema de produção e, conseqüentemente, com as durações da simulação.

A partir do pavimento tipo, o mesmo foi replicado para representar todo o empreendimento no número de pavimentos e blocos necessários para representar o empreendimento. Mas devido a restrições de *hardware* e dificuldade de manipulação do arquivo relacionado ao seu tamanho, não foi possível utilizar o modelo do empreendimento elaborado no Revit. Assim, foi utilizado o *software* SketchUP para representar os volumes das atividades de alvenaria e proteções coletivas. A Figura 25 apresenta os modelos da unidade base e do empreendimento.



Figura 25: modelo 3D e BIM do EE1

Ao final da modelagem BIM da unidade base, foi possível realizar a caminhada estruturada para a validação da sequência de execução e coleta de dados. Esta caminhada estruturada consistiu na segunda visita a obra e foi realizada com o auxílio do engenheiro da obra. A Figura 26 apresenta as imagens dos elementos do modelo BIM agrupadas para representar as atividades presentes no diagrama de precedência do sistema de produção de laje e alvenaria. Com essa representação de atividades através dos elementos, é possível visualizar as atividades presentes inicialmente no diagrama de precedência e confrontá-las com: (a) os elementos presentes no BIM; e (b) o sistema de produção executado no EE1. Com essa confrontação, é possível verificar se todos os elementos estão sendo representados por uma atividade, ou se todas as atividades necessárias para realizar um elemento estão representadas no diagrama de precedência do sistema de produção.

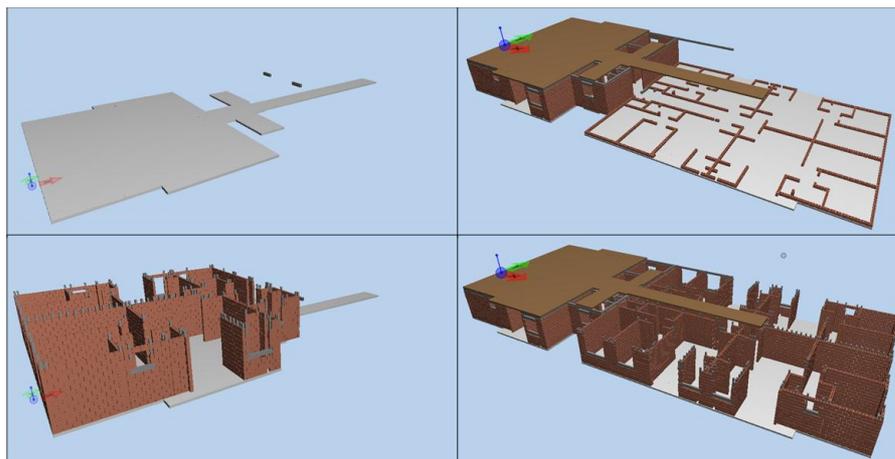


Figura 26: caminhada estruturada do EE1

Durante a caminhada estruturada, foram também verificadas as durações das atividades, definindo valores de mínimos e máximos, tamanho da equipe e lotes de produção e transferência com o engenheiro da obra. Com os dados do diagrama de precedência e planilha de pré-dimensionamento dos recursos coletadas e validadas externamente, foi possível inserir esses dados no modelo de simulação e validá-lo internamente. Rodando o modelo, foi possível analisar os relatórios de saída e visualizar a animação das entidades geradas pelo próprio Arena. A animação do Arena é apresentada na Figura 27 e acontece enquanto o modelo está sendo simulado - em detalhe é apresentada a entidade (círculo vermelho) que flui ao longo de vários processos. Dessa forma, se houver alguma interrupção na sequência lógica do modelo que não corresponde à sequência definida no diagrama de precedência, esta pode ser visualizada rapidamente.

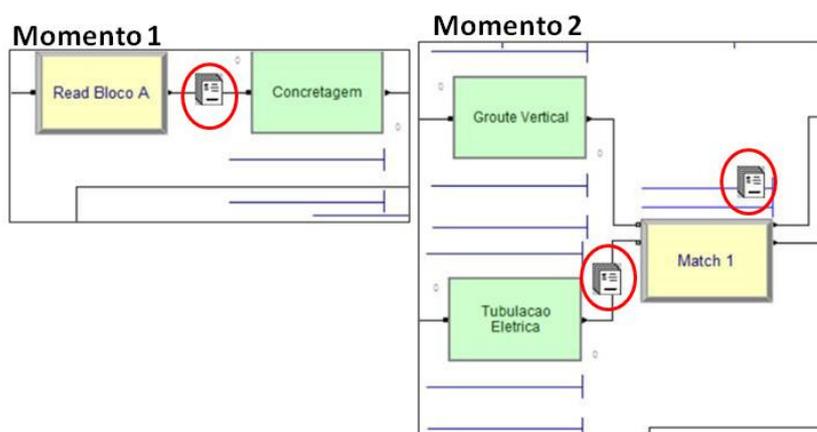


Figura 27: animação interna do modelo de SED no EE1

Já a Figura 28 apresenta duas etapas do relatório de saída do modelo de simulação. A primeira parte apresenta a listagem de tempo de espera das entidades nas filas presentes no modelo, em conjunto com comentários quanto as durações de processamento das atividades. A segunda é

um gráfico de utilização das atividades dentro do modelo, mostrando o gargalo da sequência modelada. O processo gargalo é aquele processo mais lento de um sistema de produção, ou, segundo Slack, Chambers e Johnston (2007), é a capacidade que restringe um processo e o mesmo governa as saídas de todo o processo. Dessa forma, o processo gargalo do modelo do EE1 é a atividade de concretagem, pois o mesmo apresenta a utilização de 74%.

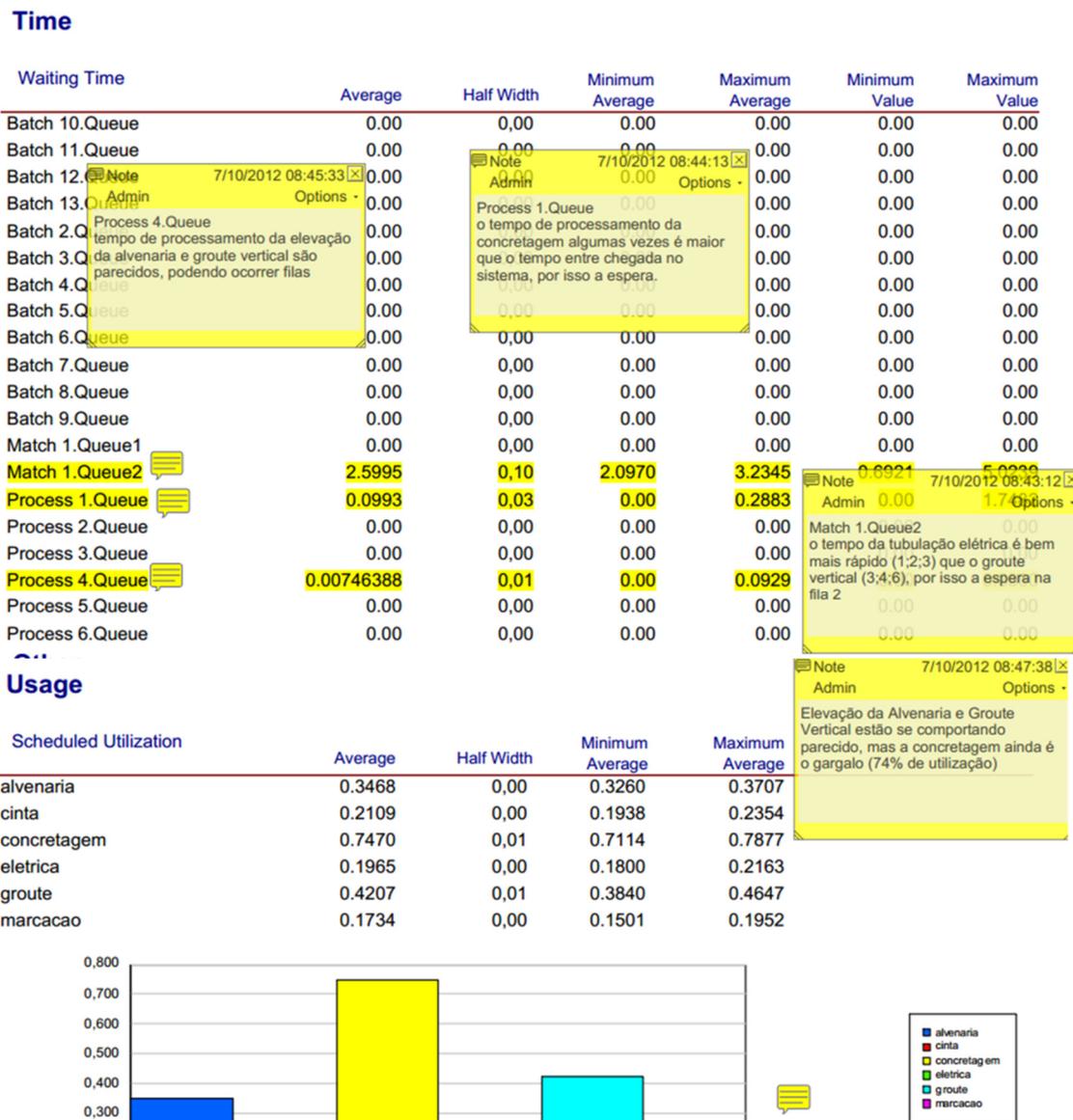


Figura 28: partes do relatório de simulação doEE1

Mas o resultado da SED gravado na planilha de saída de dados é apresentado como datas de início e fim das atividades em dias acumulados sendo representados em números inteiros. Para utilização conjunta da SED e a visualização 4D, foi necessário formatar as durações de saída das atividades do Arena para formatação típica de *software* de CPM, como Microsoft Office Project. Essa formatação foi primeiramente realizada pela própria interface de uma planilha

eletrônica e posteriormente foi refinada em uma macro através do *Visual Basic for Applications* (VBA). Os dados de saída do Arena estão apresentados na Figura 29 (a).

Atividades	Finais	Início	Término
Concretagem Forma Armadura Eletro Hidro	01_02	0	1
Concretagem Forma Armadura Eletro Hidro	03_06	26	27
Marcação 1 Fiada	01_02	2	3
Marcação 1 Fiada	03_06	28	29
Tubulação Elétrica 12 fiada	01_02	4	5
Tubulação Elétrica 12 fiada	03_06	30	31
Elevação Avenaria 12 Fiada	01_02	6	7
Elevação Avenaria 12 Fiada	03_06	32	33
Groute Vertical 12 Fiada	01_02	8	9
Groute Vertical 12 Fiada	03_06	34	35
Cinta de Respaldo	01_02	10	11
Cinta de Respaldo	03_06	36	37

(a) durações de início e fim de cada atividade – saída da simulação

Nome Project	Início	Término
Concretagem Forma Armadura Eletro Hidro - 01_02	01/08/2012 07:00:00	02/08/2012 17:00:00
Concretagem Forma Armadura Eletro Hidro - 03_06	27/08/2012 07:00:00	28/08/2012 17:00:00
Marcação 1 Fiada - 01_02	03/08/2012 07:00:00	04/08/2012 17:00:00
Marcação 1 Fiada - 03_06	29/08/2012 07:00:00	30/08/2012 17:00:00
Tubulação Elétrica 12 fiada - 01_02	05/08/2012 07:00:00	06/08/2012 17:00:00
Tubulação Elétrica 12 fiada - 03_06	31/08/2012 07:00:00	01/09/2012 17:00:00
Elevação Avenaria 12 Fiada - 01_02	07/08/2012 07:00:00	08/08/2012 17:00:00
Elevação Avenaria 12 Fiada - 03_06	02/09/2012 07:00:00	03/09/2012 17:00:00
Groute Vertical 12 Fiada - 01_02	09/08/2012 07:00:00	10/08/2012 17:00:00
Groute Vertical 12 Fiada - 03_06	04/09/2012 07:00:00	05/09/2012 17:00:00
Cinta de Respaldo - 01_02	11/08/2012 07:00:00	12/08/2012 17:00:00
Cinta de Respaldo - 03_06	06/09/2012 07:00:00	07/09/2012 17:00:00

A agrupar Atividade e Finais de Apartamento  
Utilização da função CONCATENAR

Procura os dias na matriz de referência  
Utilização da função PROCV

(c) tratamento dos dados através das funções CONCATENAR e PROCV

Figura 29: tratamento dos dados de saída do Arena com auxílio de funções de uma planilha eletrônica

Cada atividade é representada pelo seu respectivo nome e local de realização (concretagem – 1pav – bloco A, por exemplo) e as durações são descritas através de datas e horários. Foi necessária uma matriz de referência apresentada na Figura 29 (b). Através da função PROCV<sup>27</sup>, as durações acumuladas são procuradas na matriz de referência e o valor correspondente da data do calendário é retornado e através da função CONCATENAR<sup>28</sup>, as colunas do nome da atividade e local foram agrupadas em uma sequência de texto. A macro, apresentada na Figura 30, realiza a mesma formatação, mas numa interface mais amigável, com caixas de diálogo com o usuário.

Dias Acumulados	Início
0	01/08/2012 07:00
1	02/08/2012 07:00
2	03/08/2012 07:00
3	04/08/2012 07:00
4	05/08/2012 07:00
5	06/08/2012 07:00
6	07/08/2012 07:00
7	08/08/2012 07:00
8	09/08/2012 07:00
9	10/08/2012 07:00
10	11/08/2012 07:00
11	12/08/2012 07:00
12	13/08/2012 07:00
13	14/08/2012 07:00
14	15/08/2012 07:00
15	16/08/2012 07:00
16	17/08/2012 07:00
17	18/08/2012 07:00
18	19/08/2012 07:00
19	20/08/2012 07:00
20	21/08/2012 07:00

(b) matriz de referência das durações de início

<sup>27</sup> Definição da lógica da função pelo Excel: procura um valor na primeira coluna à esquerda de uma tabela e retorna um valor na mesma linha de uma coluna especificada.

<sup>28</sup> Definição da lógica da função pelo Excel: agrupa várias sequências de caracteres de texto em uma única sequência de texto.

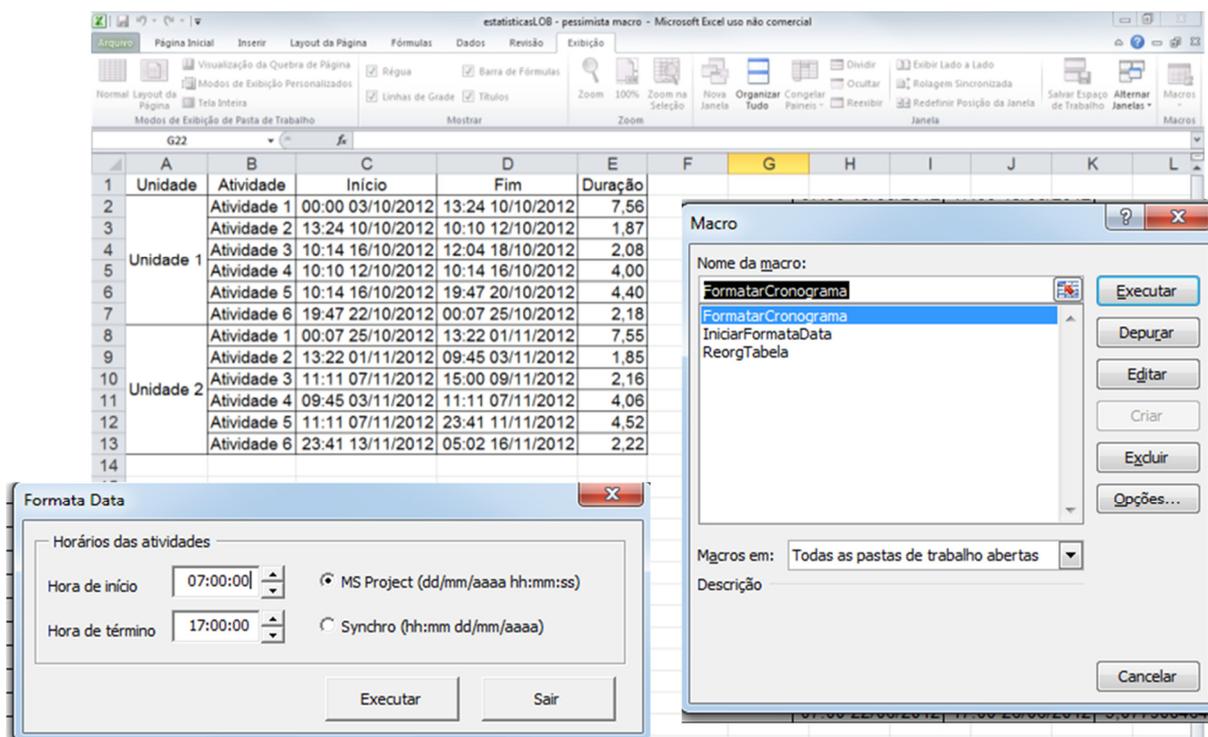


Figura 30: utilização do VBA para tratamento dos dados de saída do Arena

Com o sistema de produção e do produto modelados, deu-se início a modelagem 4D. Esta foi realizada no *software* ProjectWise Navigator V8i (Bentley Systems). Primeiramente foram inseridos no programa o modelo BIM da unidade base, o arquivo com a lista de nomes dos elementos e o arquivo de cronograma. A seguir foram agrupados os elementos de acordo com a lista de nomes dos elementos, que corresponde ao grupo de elementos que formam as atividades (todos os pontos de *route* são agrupados para representar a atividade execução do *route*, por exemplo). Com os grupos de elementos e as atividades, foi possível conectar umas às outras. O ambiente de trabalho do Navigator é apresentado Figura 31 e detalhada os dados de entradas do processo de modelagem 4D.

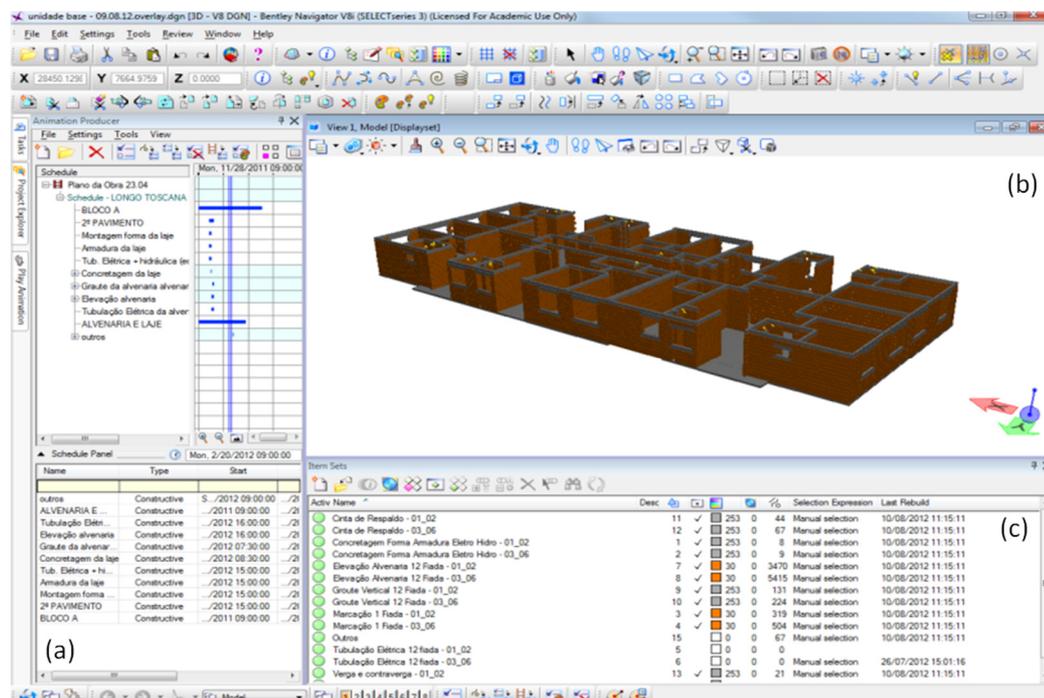


Figura 31: ambiente de trabalho do ProjectWise Navigator V8i: (a) o arquivo de datas de início e fim na extensão .xml; (b) o arquivo em BIM da unidade base na extensão .dgn; e (c) o arquivo de nomes dos elementos na extensão .csv

### 5.1.1 Considerações Finais sobre o Estudo Empírico 1

Como comentado anteriormente, este empreendimento já havia sido analisado em um estudo anterior sobre o projeto do sistema de produção. Entretanto, o processo de modelagem foi distinto, em função da necessidade de utilizar de forma conjunta os modelos SED e BIM 4D.

Neste estudo exploratório, foram realizadas as duas primeiras etapas do PSP, definidas por Schramm (2009): a definição da sequência de produção e pré-dimensionamento da capacidade produtiva. Estas etapas foram realizadas em conjunto com a modelagem do sistema de produção, mostrando uma interligação entre elas. Logo, com a definição da sequência de produção da unidade base foi possível definir a lógica de programação através das atividades de processamento da SED. Já com o término da modelagem BIM da unidade base foi possível realizar a caminhada estruturada com o modelo para validar a sequência de execução do diagrama de precedência e coletar durações estocásticas para o modelo de simulação. Esta etapa caracteriza a validação da sequência de execução inicial o pré-dimensionamento da capacidade produtiva da unidade base. Dessa forma, no EE1 foi possível explorar a integração entre a modelagem de SED e a geração de modelos BIM 4D do sistema de produção.

A Figura 32 apresenta as etapas de modelagem geradas pelos diferentes *software* utilizados no EE1. Nessa figura é possível identificar as entradas e saídas de informações de cada uma das

etapas com a sua respectiva extensão de arquivo e descrição das informações contidas nos mesmos. Como pode ser observado, a quantidade de extensões e linguagens de exportação de arquivos é relativamente grande. Existem duas entradas de informações diretas da SED para a modelagem 4D, o nome dos elementos para a construção dos grupos de elementos e as datas de início e fim de cada atividade. Já com relação ao modelo BIM e 3D, existe uma entrada para cada modelo o que caracteriza um modelo de 4D para cada unidade de análise, ou seja, um modelo 4D para a unidade base e outro para o empreendimento.

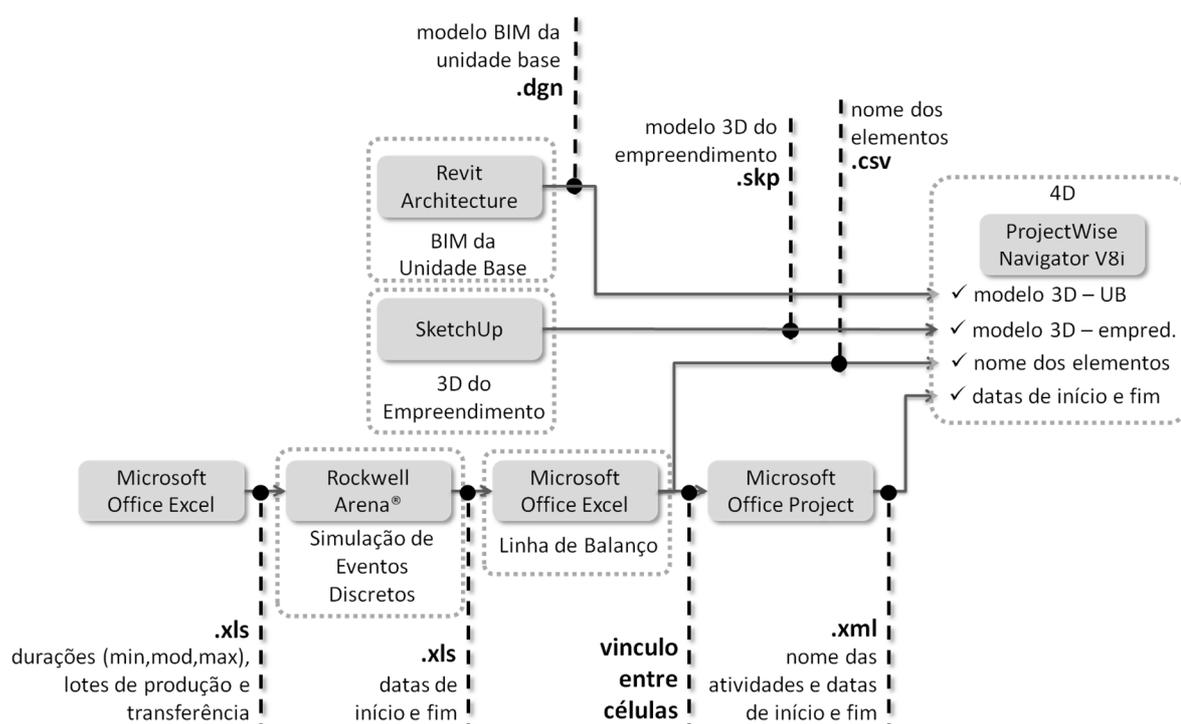


Figura 32: etapas de modelagem do EE1

Neste estudo empírico constatou-se que os programas computacionais utilizados tinham problemas de compatibilização entre si. Primeiramente o modelo do empreendimento elaborado no Revit, após a replicação do pavimento tipo e dos blocos de edifício, tornou-se relativamente pesado para a manipulação da modelagem 4D. Isso tornou inviável a sua utilização nos computadores disponíveis para a realização desta pesquisa e, por esse motivo, testou-se a criação de volumes no SketchUP.

Quanto à utilização do programa Microsoft Project, constatou-se que o mesmo apenas aumenta a complexidade do fluxo de modelagem, sem trazer muitos benefícios ao processo. O mesmo foi necessário porque o *software* Navigator não permite o vínculo direto de uma planilha eletrônica, mesmo que a formatação das durações seja a mesma da formatação típica de programas de planejamento e controle.

## 5.2 ESTUDO EMPÍRICO 2

O estudo EE2 iniciou pela definição dos objetivos do estudo. Esta foi realizada em uma reunião por vídeo conferência entre a equipe de gestão da produção do empreendimento<sup>29</sup> e a equipe de pesquisa formada para este estudo<sup>30</sup>. Primeiramente, foi apresentado o objetivo do estudo com relação ao programa de capacitação e posteriormente discutido a escolha das atividades a serem estudadas. Assim, a equipe de pesquisa sugeriu a modelagem das atividades de fachada como uma forma de disseminação dos benefícios e dificuldades da modelagem para os participantes do INOVACON, já que os mesmos realizam empreendimentos com tipologias construtivas semelhantes. A ideia foi bem recebida pela equipe de produção do empreendimento e seguiu-se a solicitação de projetos arquitetônicos, leiaute de canteiro, plano de longo prazo e linha de balanço do empreendimento.

A segunda etapa do EE2 foi a definição do sistema de produção a ser modelado e a coleta de informações. Mas diferentemente do EE1, a definição do sistema de produção foi realizada diretamente no *software* Arena e nas planilhas eletrônicas que o compunha, já que a equipe do empreendimento tinha familiaridade com a ferramenta através do programa de capacitação. Dessa forma, com os documentos de linha de balanço e longo prazo da obra, foi possível iniciar a modelagem de SED a partir da preparação das planilhas eletrônicas de entrada e saída de dados do modelo e o sequenciamento inicial das atividades.

Em paralelo à modelagem de simulação, foi realizada a modelagem da unidade base BIM<sup>31</sup> através do *software* ArchiCAD com os projetos fornecidos pela empresa S. Mas, devido a incoerências de detalhes de projeto presentes entre os detalhamentos de fachada, planta tipo e cortes presente no projeto arquitetônico, foi necessário validar o modelo da unidade base com o que estava sendo executado em obra. Dessa forma, a segunda e terceira reuniões por vídeo conferência do estudo fora, para a validação do modelo BIM da unidade base e para a caminhada estruturada da sequência de execução das atividades internas e coleta de durações estocásticas, número de equipes e lotes de produção e transferência.

---

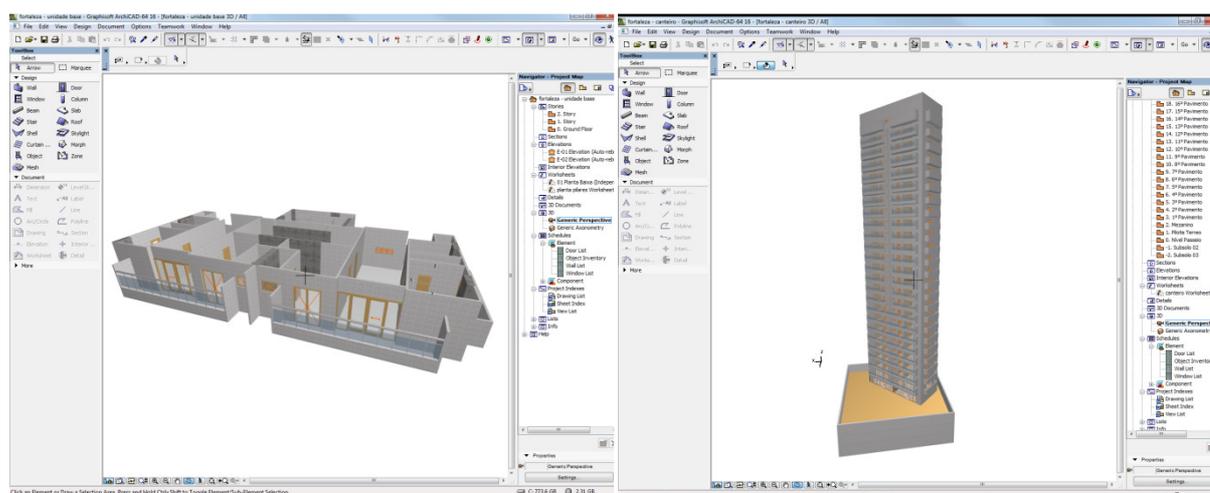
<sup>29</sup> A equipe de produção do empreendimento do EE2 corresponde ao engenheiro da obra, diretor da empresa e empresa consultora de planejamento.

<sup>30</sup> A equipe de pesquisa para o EE2 corresponde a dois pesquisadores, sendo a autora deste trabalho um deles.

<sup>31</sup> Esta modelagem foi realizado pela equipe de pesquisa a qual consistia em dois bolsistas de iniciação científica e a autora deste trabalho.

Logo em seguida, foi realizada a validação interna do modelo de SED, de forma similar ao que havia sido feito no EE1, mas acrescida da ferramenta de visualização dos dados de saída de simulação utilizado por Schramm (2009), a linha de balanço. Esta validação interna foi realizada apenas pela equipe de pesquisa.

Após a validação do modelo BIM da unidade base, foi iniciada a modelagem do empreendimento, com a exportação da unidade base na extensão módulo. Essa extensão no *software* ArchiCAD permite que o modelo seja manipulado como um bloco único, mas permanece a conexão com o arquivo original. Assim, quando é feita uma alteração na unidade base, o módulo em bloco é atualizado. Com esta extensão de arquivo, foi possível replicá-lo no número de pavimentos correspondentes em outro modelo BIM, denominado empreendimento. Essa forma de modelagem permitiu que fossem utilizados dois modelos diferentes, reduzindo o tamanho do arquivo, facilitando a sua manipulação e permitindo a conexão entre eles. A Figura 33 apresenta os modelos BIM produzidos nessa etapa.



(a) BIM da unidade base

(b) BIM da empreendimento

Figura 33: modelos BIM do EE2

Logo após o término da modelagem BIM e de SED, iniciou-se a análise do empreendimento, compreendendo as atividades de definição da estratégia de execução, estudos dos fluxos de trabalho e dimensionamento da capacidade de produção, definidas nas etapas do PSP de Schramm (2009). Estas etapas do PSP foram realizadas de forma iterativa, de acordo com a simulação de cada tipo de cenário, visualização dos seus resultados e tomada de decisão. A simulação de cenários foi realizada de forma conjunta com a equipe de produção do empreendimento em dois encontros de dois turnos, realizados na obra.

Os primeiros cenários simulados estão relacionados às discussões sobre as atividades internas com interface com as atividades de fachada. A Figura 34 representa o resultado da simulação desses cenários através da linha de balanço. A atividade de contrapiso não estava explícita na linha de balanço original do empreendimento e o impacto dessa atividade na quantidade de trabalho em progresso não era conhecida pela equipe de planejamento e produção do empreendimento. Assim, foram solicitados pela equipe de produção do empreendimento três cenários com lotes de produção da atividade de contrapiso diferentes (ver Figura 34): (a) lote de produção de cinco pavimentos, referente ao cenário A; (b) lote produção de três pavimentos, referente ao cenário B; e (c) a atividade de contrapiso sendo realizada em conjunto com a alvenaria externa, cenário C. A comparação entre esses cenários permitiu uma redução do trabalho em progresso médio de 31,5 dias úteis - cenário A - para 15,8 dias úteis - cenário B - e zero - cenário C -, respectivamente. Como consequência, houve uma redução de 109 dias úteis de execução das atividades internas, quando comparados os cenários A e C.

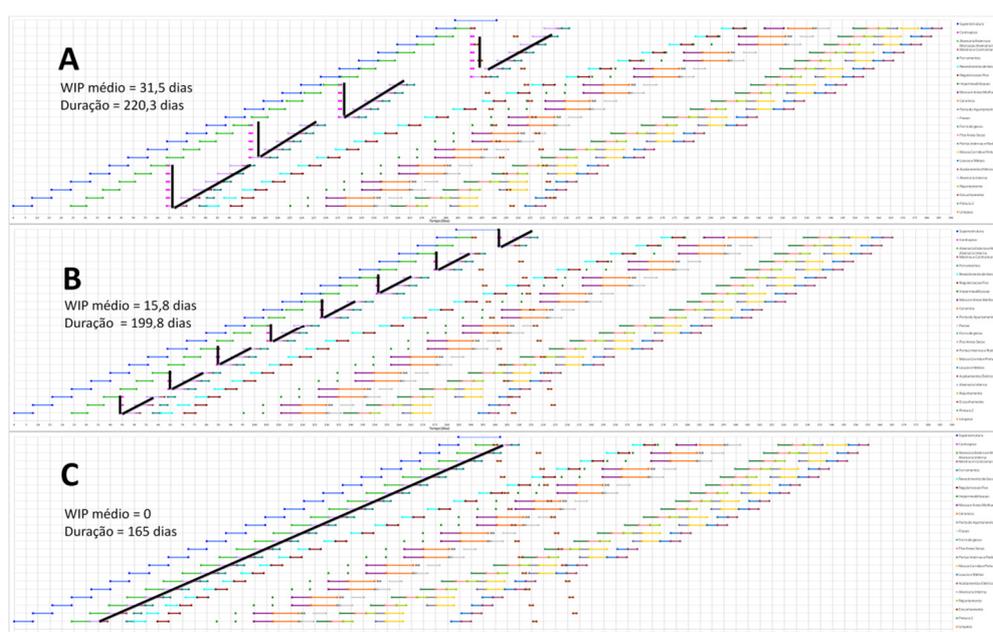


Figura 34: comparação entre cenários de contrapiso, a linha preta destaca os fluxos da atividade de contrapiso e da atividade seguinte

Na sequência, foram discutidas as atividades relacionadas à fachada. Primeiramente, foi modificada a unidade-base dessas atividades de acordo com a escolha da equipe de produção do empreendimento. Dessa forma, antes do estudo a fachada seria executada nos quatro panos principais, relacionados aos pontos cardeais, e dois panos complementares, que correspondiam aos locais de montagem dos equipamentos de transporte vertical, nesse caso, os guinchos. A Figura 35 apresenta estas duas formas de produção da fachada.

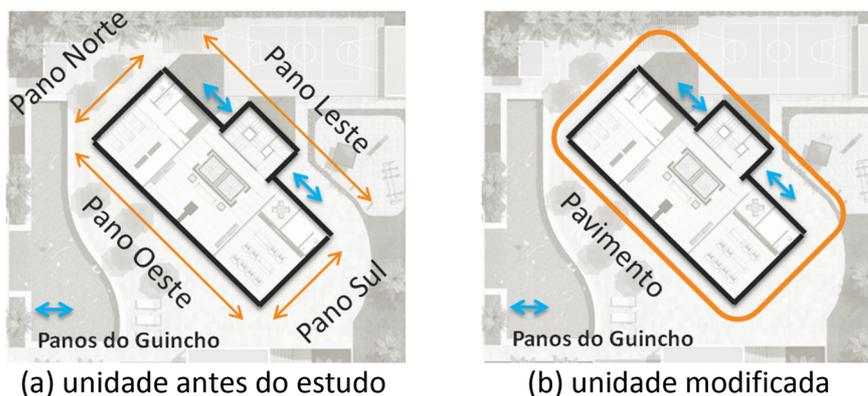


Figura 35: unidade de produção da fachada

Os dois cenários simulados de fachada foram (ver Figura 36): (a) execução das unidades de produção de forma sequencial; e (b) execução de cada pano dos guinchos após a montagem dos elevadores internos. O prazo total do empreendimento e da execução da fachada é menor para o cenário B, o qual resulta em uma redução de 119 dias de trabalho com relação ao cenário A.

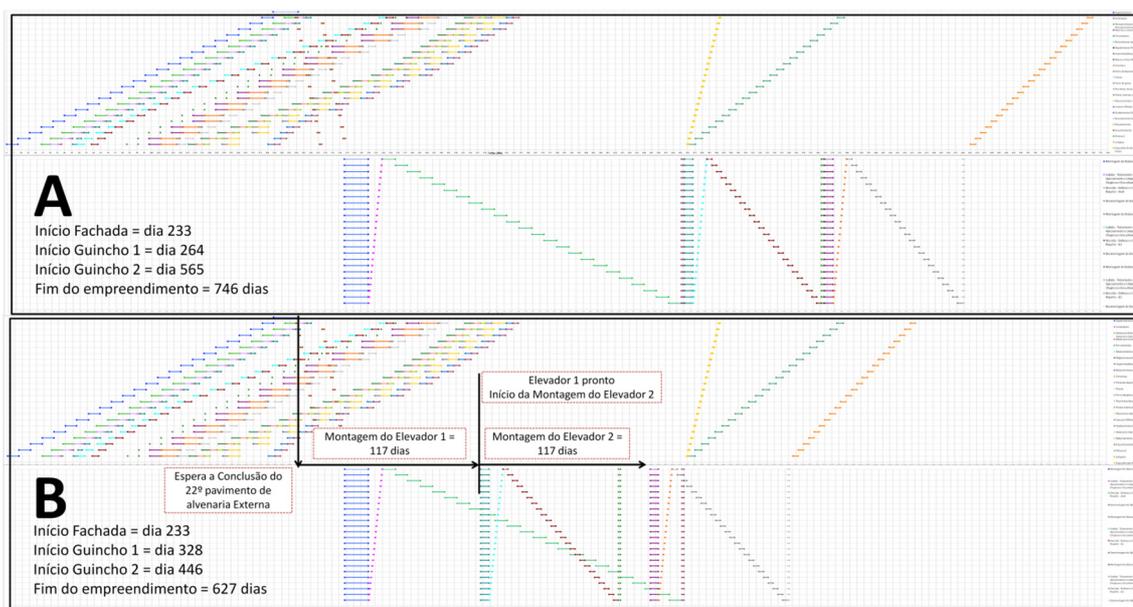


Figura 36: comparação entre cenários de fachada com base na Linha de Balanço

A modelagem 4D do EE2 ocorreu de forma paralela a simulação dos cenários, mas apenas foi finalizada ao final desse processo de decisão. Dessa forma, a modelagem 4D do empreendimento apenas foi utilizada como síntese das decisões realizadas através do modelo de SED e da linha de balanço.

Para iniciar a modelagem 4D, o modelo do empreendimento foi exportado na extensão IFC 2X3 (*Industry Foundation Class*). Com essa forma de importação, todos os elementos construtivos foram inseridos automaticamente no Synchro como recursos, separados por tipos de elementos e nível de pavimento que o mesmo está associado (ver Figura 37). Mas essa organização de

recursos não condiz com o agrupamento necessário dos elementos para cada atividade. Na sequência de atividades do empreendimento, as paredes externas e internas eram executadas por equipes diferentes e em momentos diferentes, formalizando duas atividades distintas. Mas, na classificação do modelo IFC, os elementos de parede estavam todos agrupados por andar, tornando necessária a reorganização da classificação dos elementos apresentada na Figura 37.

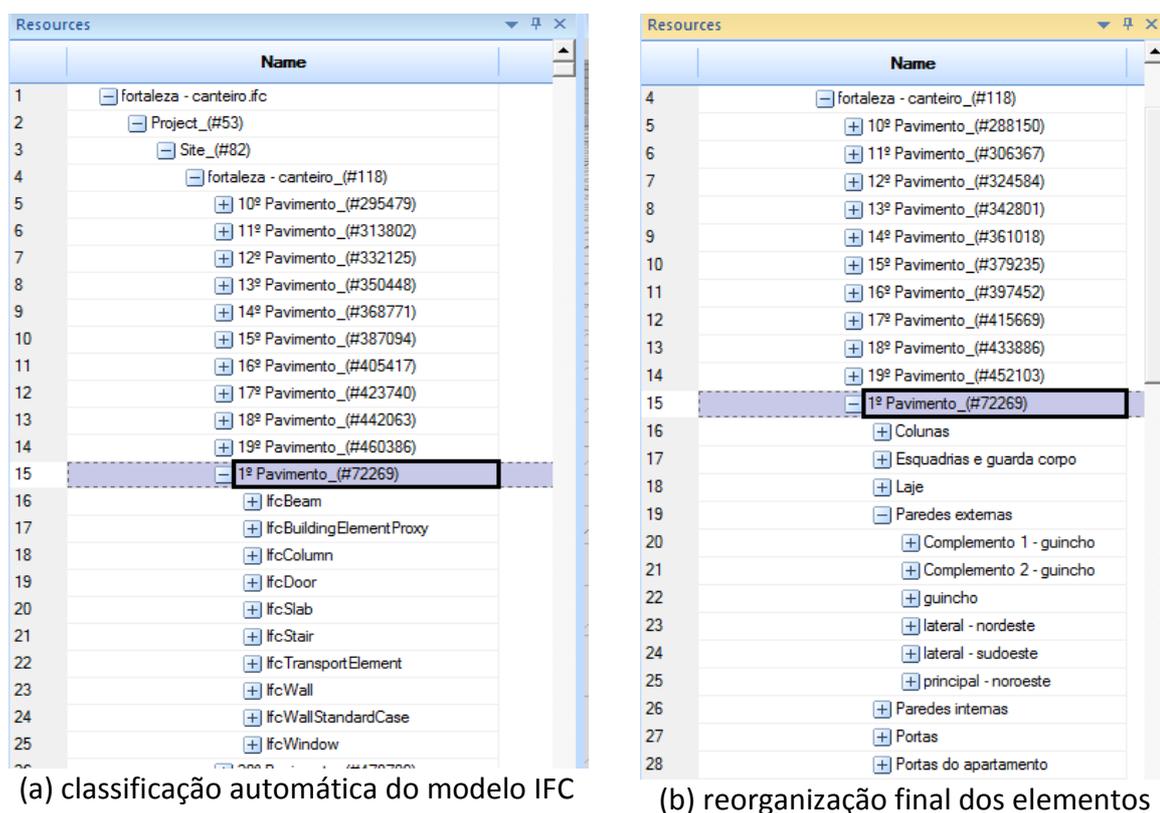


Figura 37: reorganização dos recursos

Em paralelo, foram inseridas as atividades e durações através do vínculo das células da planilha eletrônica e a aba de inserção das atividades do Synchro. Por fim, foram conectados cada recurso à sua atividade. As Figura 38 apresenta o ambiente de trabalho do Synchro e detalhados os dados de entradas do processo de modelagem 4D.

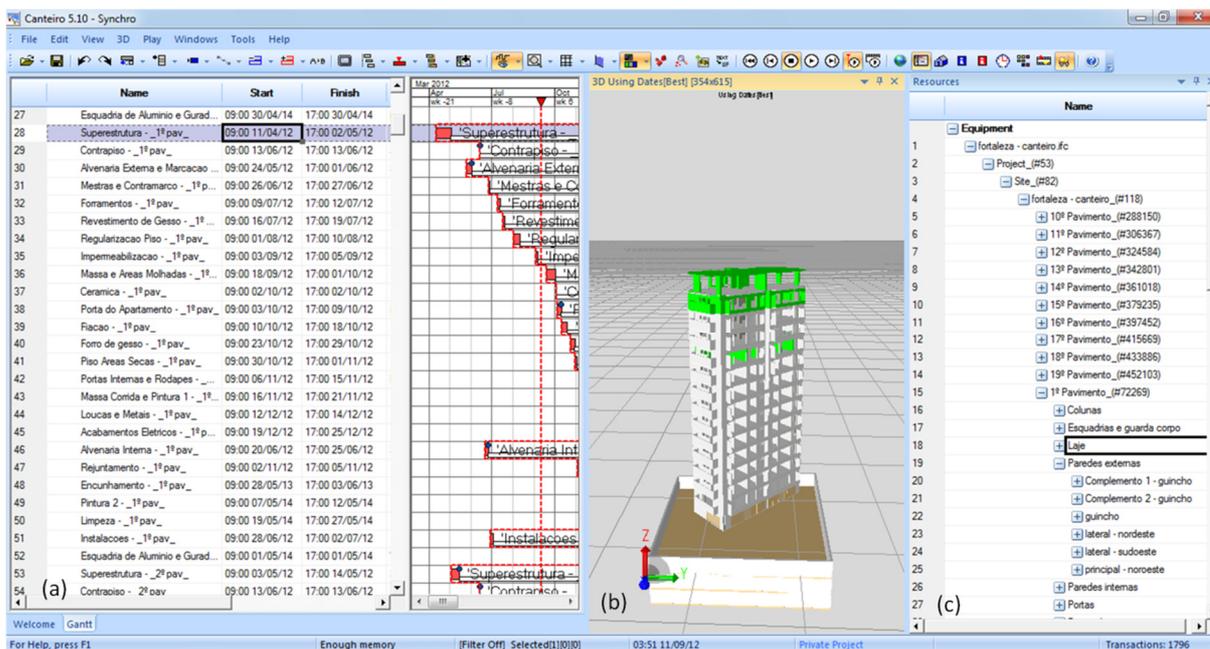


Figura 38: ambiente de trabalho do Synchro, as abas mostram: (a) o arquivo de datas de início pela vinculação entre células; (b) o arquivo em BIM do empreendimento importado em IFC; e (c) a classificação dos elementos IFC, importados junto com o modelo BIM

Ao final da simulação dos cenários, iniciou-se a alocação dos equipamentos de proteção coletiva e movimentação vertical no canteiro. O seu posicionamento foi definido a partir das normas técnicas pertinentes e experiência da equipe de produção e planejamento do empreendimento. Os mesmos foram modelados e posicionados inicialmente no *software* SketchUP e posteriormente foram inseridos no Synchro como elementos 3D.

Apenas no final do processo de simulação e tomada de decisão foram alocados os equipamentos no canteiro e, dessa forma, finalizada a modelagem 4D. A Figura 39 apresenta imagens de diferentes períodos no cenário B de execução da fachada, a qual é possível observar: (a) a execução da supraestrutura e montagem das bandejas de proteção coletiva, letra A; (b) montagem do balancim após a conclusão da supraestrutura e elevação da alvenaria, letra B; e (c) execução do emboço e cerâmica do 16º pavimento.

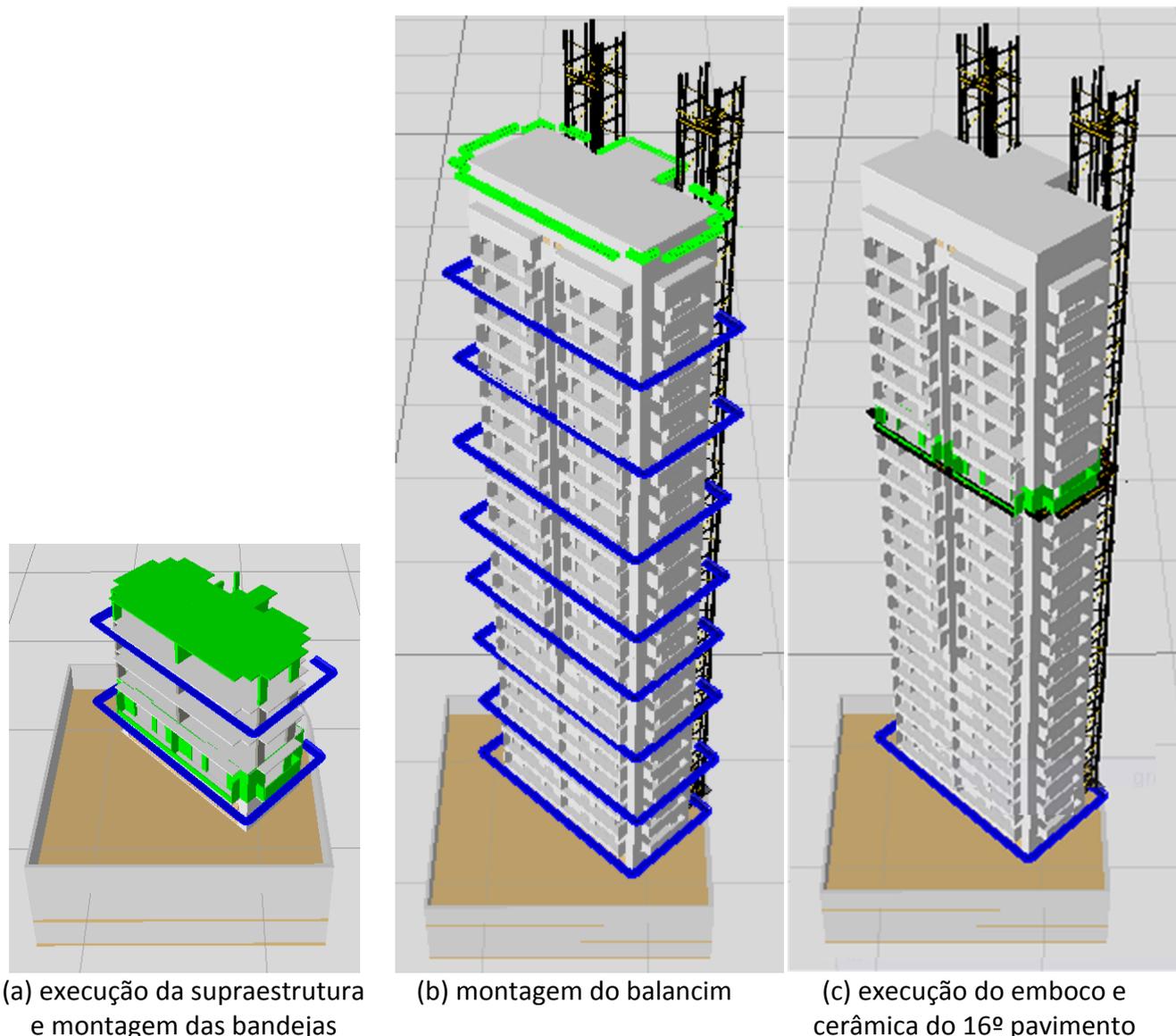


Figura 39: modelo 4D do cenário B da fachada

### 5.2.1 Considerações Finais sobre o Estudo Empírico 2

O processo de tomada de decisão do PSP neste estudo foi similar em relação ao EE1 quanto à elaboração das etapas de definição da sequência de execução da unidade base e pré-dimensionamento da capacidade produtiva. Mesmo utilizando a interface e planilhas eletrônicas do modelo de SED do Arena, essas duas etapas do PSP foram realizadas de forma interligada como o modelo de SED e modelo BIM.

Entretanto, no EE2 pode-se avançar com relação à análise do empreendimento presente no PSP, definida por Schramm (2009), mas focada no projeto de processos críticos. Esta análise do empreendimento também evidenciou uma interação entre SED e ferramentas de visualização. Dessa forma, considerando diferentes lotes de produção da atividade de contrapiso, a análise

dos principais fluxos de trabalho e o dimensionamento da capacidade foram realizados com base na linha de balanço. Já para as atividades de fachada essa análise foi realizada primeiramente pela linha de balanço e posteriormente sintetizada com o modelo 4D.

A visualização do trabalho sendo produzido foi facilitada através do emprego do modelo 4D, quando comparado com a linha de balanço, já que cada uma dessas ferramentas apresenta propósitos diferentes de representação espacial. Enquanto na linha de balanço o foco é o fluxo de trabalho das equipes de produção em uma sequência ordenada de unidades repetitivas, no modelo 4D o foco é onde esta equipe está produzindo dentro do canteiro de obras. Assim no 4D é possível observar possíveis conflitos relacionados à segurança, utilização de equipamentos, entre as atividades ou entre equipes de uma mesma atividade.

Durante a elaboração do estudo observou-se dificuldades quanto à implementação da utilização conjunta das ferramentas. A primeira delas foi o grande esforço para a modelagem, totalizando 79 horas, como detalhado no Quadro 17.

<b>Etapas</b>	<b>Duração</b>
<b>Simulação do empreendimento</b>	<b>41 horas</b>
✓ preparação das planilhas	9 horas
✓ sequência de execução das atividades internas	10 horas
✓ sequência de execução da fachada	7 horas
✓ validação interna, erros de lógica e depuração	9 horas
✓ simulação de cenários	6 horas
<b>BIM da unidade base</b>	<b>18 horas</b>
✓ arquitetônico (paredes e esquadrias)	16 horas
✓ estrutural pilares	4 horas
<b>BIM do empreendimento</b>	<b>4 horas</b>
✓ replicação dos pavimentos	1 horas
✓ modelagem dos subsolos e cobertura	4 horas
<b>4D do empreendimento</b>	<b>16 horas</b>
✓ reorganização dos elementos	8 horas
✓ conexão entre atividades e recursos	4 horas
✓ alocação de recursos	4 horas
<b>Total de horas de modelagem</b>	<b>79 horas</b>

Quadro 17: durações das atividades de modelagem por etapa no EE2

Como consequência, houve a dificuldade de inserir o modelo 4D desde o início do processo de simulação. Com essa inserção antecipada, poder-se-ia ter analisado melhor cada cenário e as conclusões dessas análises poderiam ser usadas para retroalimentar o processo de simulação, validando o modelo ou modificando possíveis suposições equivocadas como apresentado nas etapas de modelagem. Em paralelo à simulação, e pela falta da utilização do modelo 4D desde o início da modelagem, foi necessário utilizar ferramentas auxiliares de visualização como a representação da implementação e as unidades de produção das fachadas (Figura 35) e o

posicionamento dos equipamentos de proteção coletiva e de movimentação vertical, primeiramente em um modelo 3D no SketchUP, para depois ser inserido no modelo BIM 4D.

A Figura 40 apresenta de forma resumida as etapas de modelagem do sistema de produção do EE2. Para o modelo de simulação, assim como no EE1, foi necessário inserir em planilhas eletrônicas as durações na forma de distribuição triangular (mínimo, moda e máximo), lotes de produção e transferência de cada atividade. Do modelo de simulação foram extraídas as durações de início e fim de cada atividade para a elaboração da linha de balanço de cada cenário. A média dessas durações foram inseridas diretamente no modelo 4D, já que o Syncho apresenta essa vantagem com relação ao Navigator utilizado no EE2. Também são utilizadas no processo de modelagem 4D os modelos do empreendimento e dos equipamentos do canteiro.

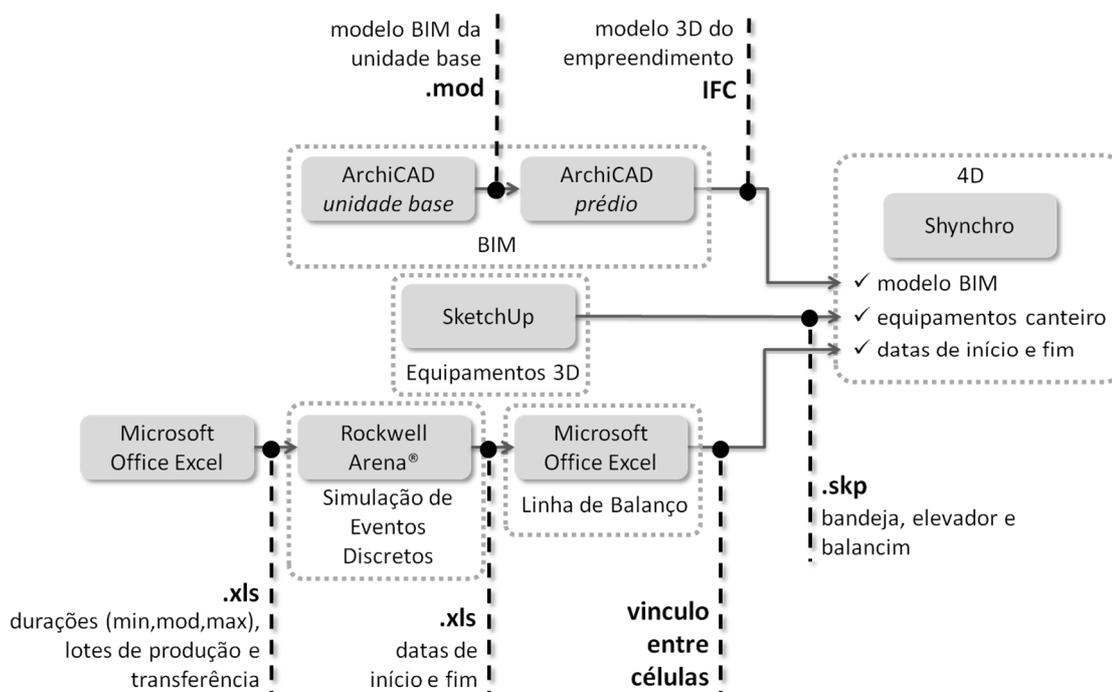


Figura 40: etapas de modelagem do EE2

A forma de realizar a modelagem do EE2 apresentou algumas vantagens em relação ao EE1. Pôde-se perceber que o Synchro tem mais facilidade de obtenção de informações de planilhas eletrônicas, quando comparado ao Navigator. Neste último, é necessário utilizar MS Project para transformar o formato de arquivo de entrada no programa de 4D. Também é possível observar uma melhora no processo de modelagem BIM do empreendimento, já que o ArchiCAD permite a utilização de dois modelos deferentes (unidade base e empreendimento) interligados entre si.

### 5.3 PROPOSTA INICIAL DE MÉTODO

Ao final da fase exploratória deste trabalho foi possível estruturar uma proposta inicial de método de utilização da SED e 4D durante as etapas de decisão do PSP. A Figura 41 apresenta este método.

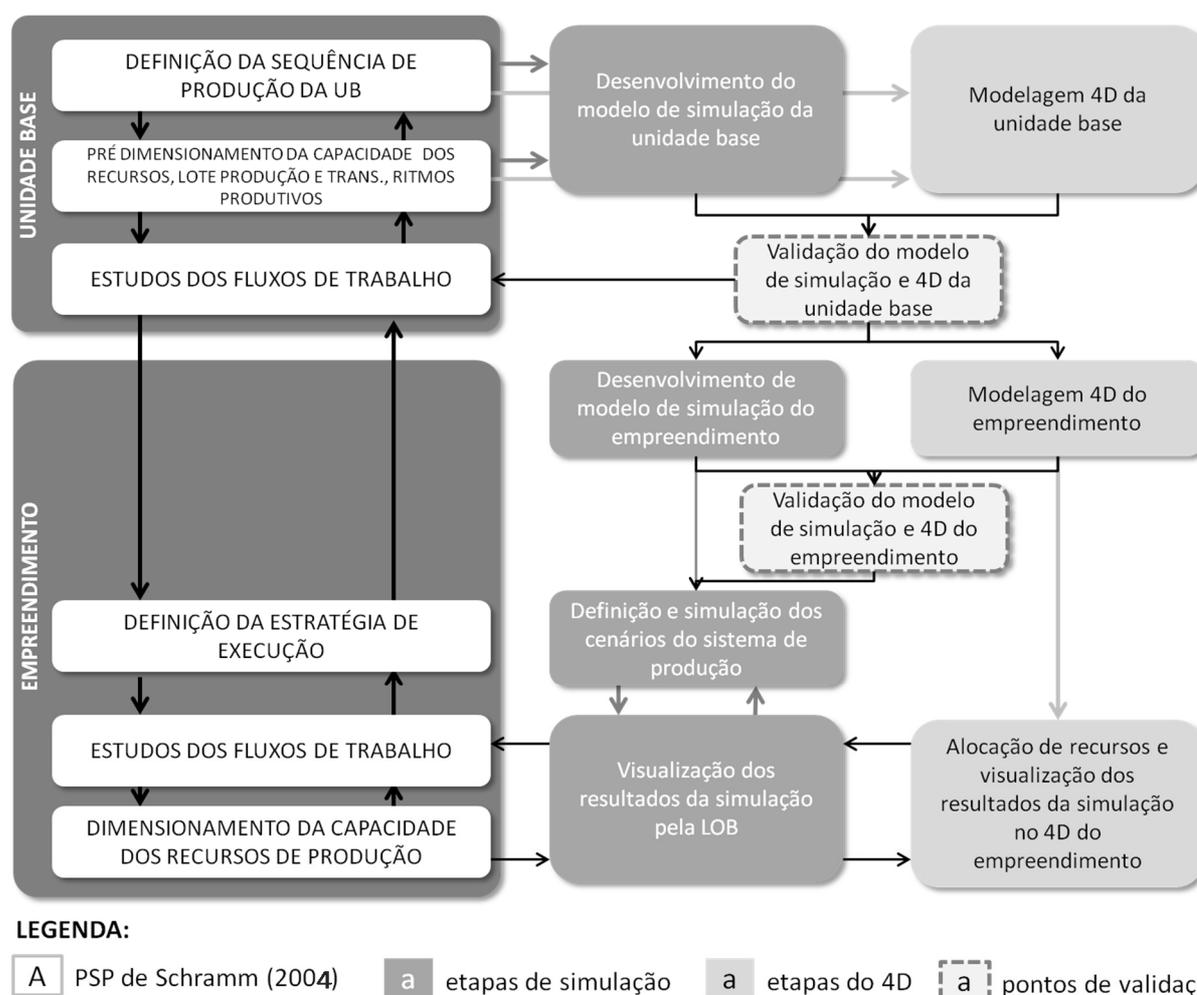


Figura 41: método inicial de integração durante o PSP da SED e 4D

O mesmo está dividido em três colunas distintas. A primeira são as etapas de decisão do PSP proposto por Schramm (2004) e separadas em duas unidades de análise – unidade base e empreendimento. A segunda e terceira são, respectivamente, as etapas de modelagem da SED e 4D acompanhando as unidades de análise do PSP.

Primeiramente são definidos a sequência de execução, pré-dimensionamento da capacidade dos recursos, desenvolvimento do modelo SED e 4D da unidade base. Posteriormente, é necessário uma validação conjunta dos três modelos: (a) conceitual, que é composto por documentos de representação do sistema de produção (diagrama de precedência, planilha de pré-

dimensionamento da capacidade); (b) de SED; (c) e BIM 4D. Nesta validação são avaliadas as etapas de execução representadas nesses diferentes modelos e estudado os fluxos de trabalho da unidade base através da simulação do modelo de SED e de BIM 4D, esta última representando os resultados da SED. A seguir, são replicados os modelos, SED e BIM 4D, na totalidade do empreendimento. Com os modelos de empreendimento formalizados é necessário validá-los. Em seguida são definidas as alternativas de PSP para o sistema de produção, simuladas na SED, visualizadas no BIM 4D e LOB e, dessa forma, estudados os fluxos de trabalho, dimensionamento da capacidade e estratégias de execução do empreendimento. Esta proposição inicial de método serviu de base para a elaboração do PSP nos empreendimentos N1 e N2 do EE3.

## 5.4 ESTUDO EMPÍRICO 3

A descrição e discussões sobre o EE3 será realizado pela seguinte sequência. Primeiro, serão apresentados os resultados da avaliação do sistema realizado no empreendimento N0. A seguir, é detalhado o processo de PSP desenvolvidos nos empreendimentos N1 e N2. Por fim, são apresentadas as considerações finais deste estudo.

### 5.4.1 Avaliação do Sistema de Produção

A avaliação do sistema de produção utilizado nos três empreendimentos ocorreu de setembro a novembro de 2012 no empreendimento N0. Nessa ocasião foi realizada uma visita inicial ao canteiro de obras, e houve o acompanhamento de duas reuniões de planejamento de curto prazo e aplicação do protocolo de boas práticas de planejamento e três visitas para realizar o MFV.

O resultado dessa avaliação foi iniciado pela análise dos gráficos existentes na empresa para avaliar o processo de planejamento e controle. A Figura 42 mostra a evolução do indicador de percentual de pacotes concluídos<sup>32</sup> (PPC) do período de 26 de setembro de 2011 a 10 de setembro de 2012. Mesmo com uma tendência de aumento do PPC, a média do mesmo nesse período ainda foi relativamente baixa, indicando que existe uma limitada eficácia do planejamento de curto prazo.

---

<sup>32</sup> O percentual de pacotes concluídos é calculado pelo número de atividades planejadas completas divididas pelo número total de atividades planejadas, expressas em porcentagem (BALLARD, 1994). Esse mesmo autor explica que atingindo maiores porcentagens de PPC corresponde realizar mais trabalhos corretos com os recursos disponíveis. Este indicador mensura o desempenho do sistema de planejamento baseado no *last planner*.

---

Método para integração da simulação de eventos discretos e modelagem 4D no projeto do sistema de produção de empreendimentos habitacionais de interesse social.

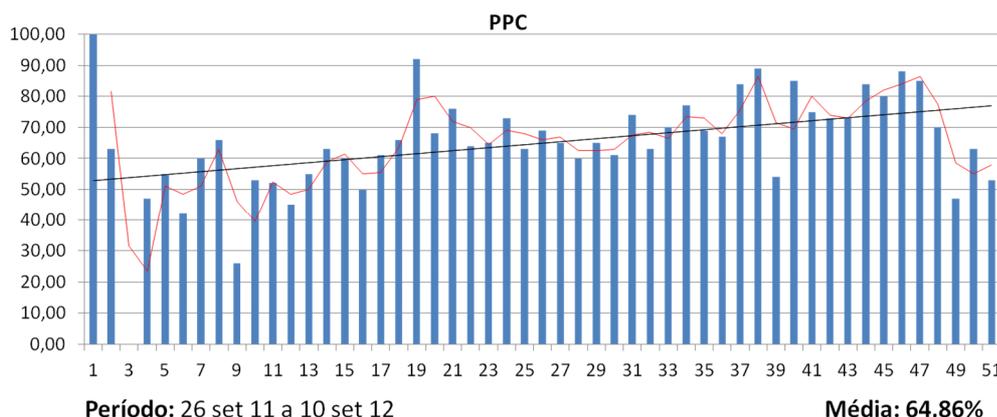


Figura 42: série de dados do percentual de pacotes de concluídos do empreendimento N0

Analisando os gráficos de causas da não conclusão dos pacotes neste mesmo período (Figura 43), pode-se observar que boa parte da não conclusão é devido a superestimação da produtividade (51%) e falta de programação de mão de obra (30%). Esses dois motivos indicam que tanto as equipes de produção das atividades quanto a gerência da obra têm dificuldade em dimensionar a capacidade de produção das equipes. Em relação ao total de problemas detectados no planejamento as causas relacionadas à mão de obra representam 67% do total (ver Figura 43 – letra a).

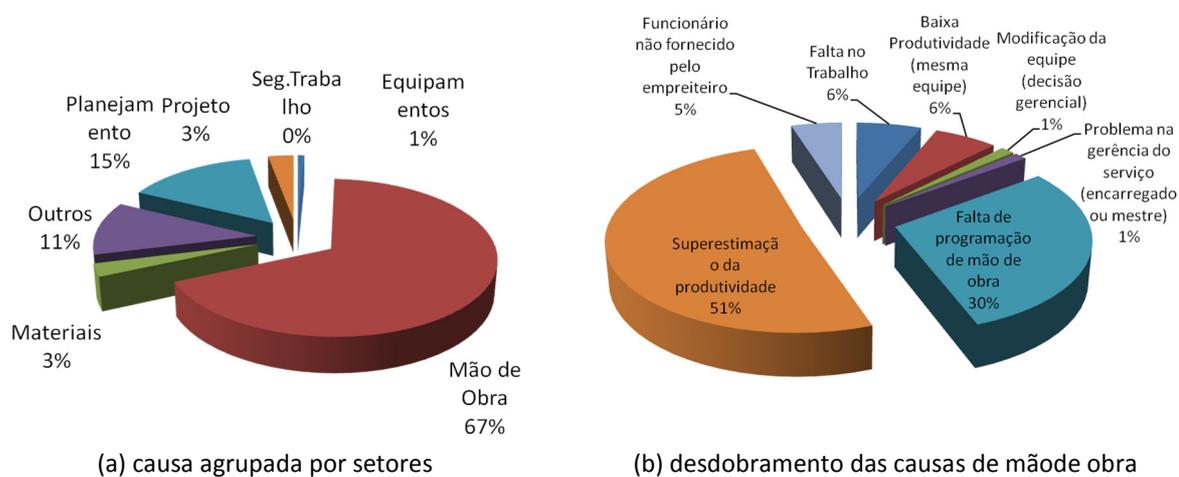
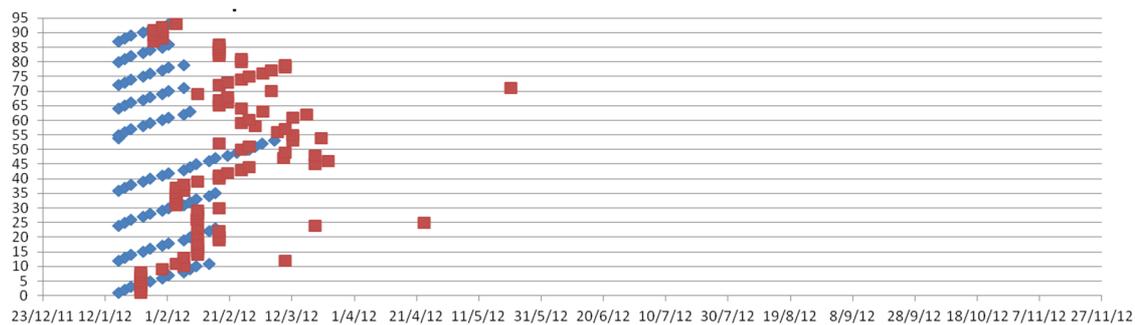
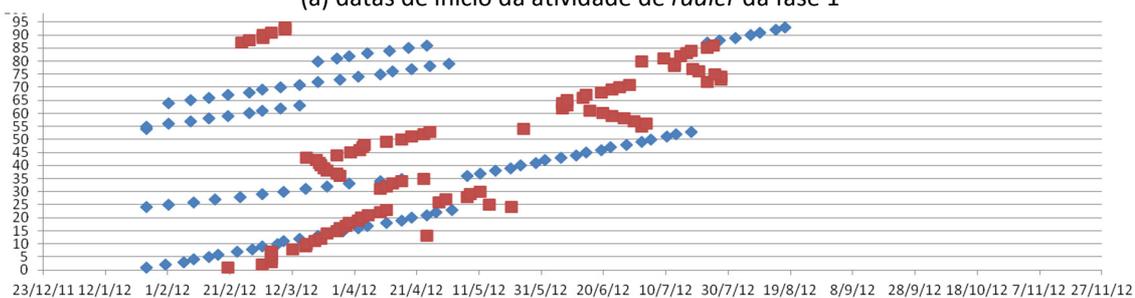
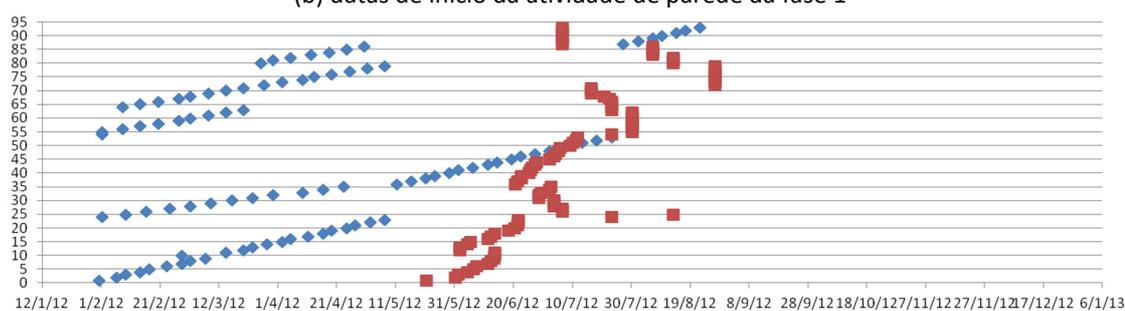


Figura 43: causas do não cumprimento dos planos acumulado do empreendimento N0

Avaliando a aderência aos lotes de produção, pode-se observar que existia também uma dificuldade de seguir o plano de ataque definido inicialmente para o empreendimento N0. Na Figura 44 são apresentados os gráficos de aderência ao plano das atividades de *radier*, parede e cobertura da primeira fase de entrega do empreendimento. No eixo *x* são apresentadas as datas e no *y* cada uma das unidades base desta fase.

(a) datas de início da atividade de *radier* da fase 1

(b) datas de início da atividade de parede da fase 1



(c) datas de início da atividade de cobertura da fase 1

**LEGENDA:** ■ Data planejada ■ Data executada

**Nota:** os pontos em azul são as datas de início de cada atividade para cada unidade habitacional e em vermelho a data que realmente iniciou cada atividade.

Figura 44: gráficos de aderência ao plano do empreendimento N0

Existe um deslocamento do início real ao planejado e inversões na sequência de ataque, ou seja, em alguns casos inicia-se a execução de conjuntos de unidades na sequência inversa à que foi planejada. A inversão pode ser vista na Figura 45, na qual se mostra a sequência planejada e a executada de acordo com a altura dos patamares de cada casa. Esta última seria a ideal devido à possibilidade de encunhamento da forma da casa mais abaixo com a casa no patamar superior, facilitando a fixação da forma e não necessitando a utilização da forma de dois oitões em todas as casas da mesma fita.

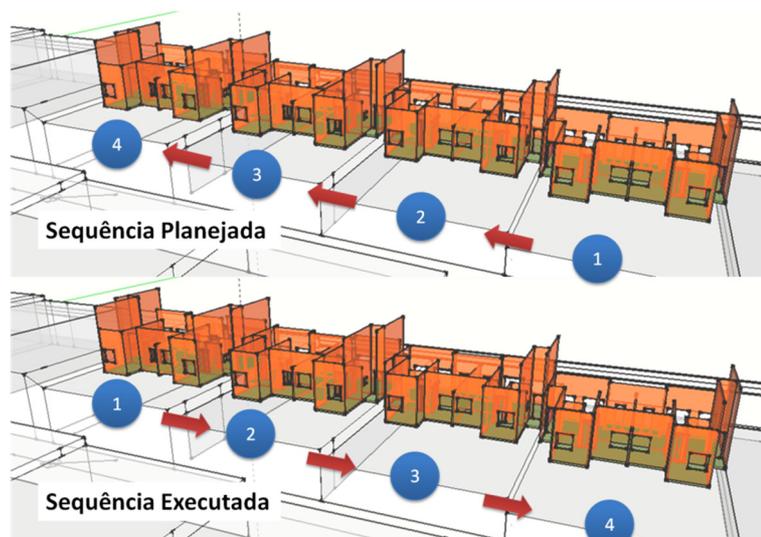


Figura 45: sequência de execução das unidades habitacionais nos empreendimentos do EE3

Isso indica que o plano de ataque que o plano de ataque<sup>33</sup> inicial do empreendimento N0 não estava sendo seguido na obra. Mas também constatou-se que a gerência da obra não havia participado da definição do mesmo, antes do início da obra. Analisando as durações de execução das atividades, pode-se perceber que existe uma grande variabilidade. A Figura 46 mostra as durações mínimas, máximas, médias e a moda das atividades de *radier*, parede e cobertura. Essa variabilidade na execução das atividades evidencia em parte a dificuldade de dimensionamento da capacidade das equipes e por outro lado a quantidade de trabalho em progresso presente desde o início até o fim de cada atividade.

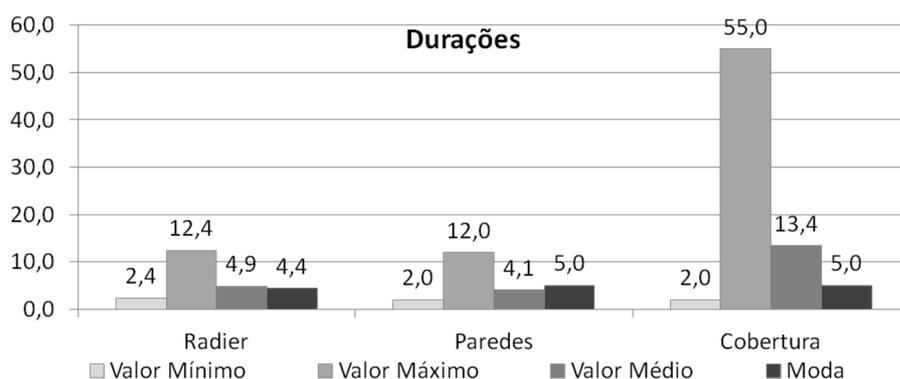
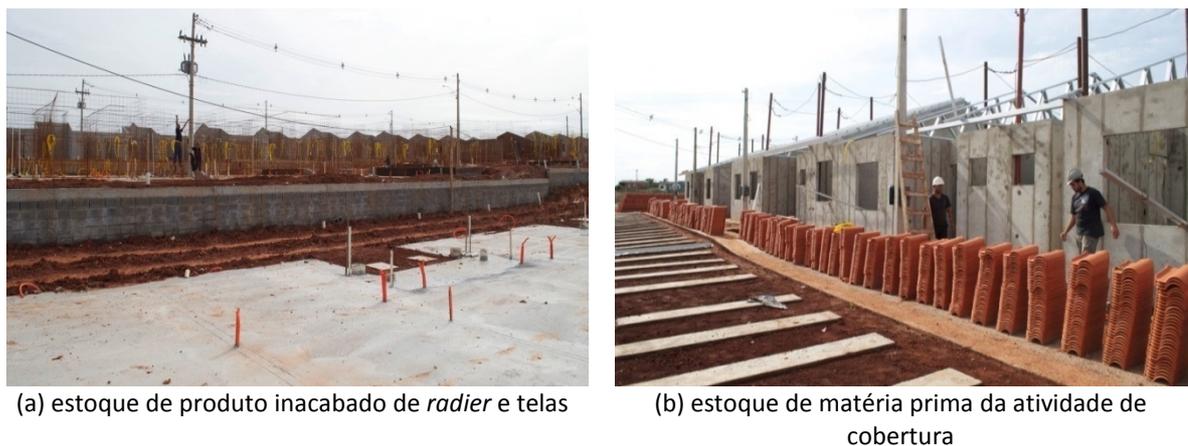


Figura 46: variabilidade das durações das atividades no empreendimento N0

Pode-se observar pela Figura 47 um grande número de estoques no canteiro de matéria prima e produto inacabado. Esses estoques são utilizados pela gerência da obra para proteger as frentes de trabalho ante a variabilidade de execução e incertezas inerentes ao fornecimento de materiais, produtividade mão de obra e ritmos de produção.

<sup>33</sup> Plano de ataque é o zoneamento e sequência de ataque das unidades habitacionais.

(a) estoque de produto inacabado de *radier* e telas

(b) estoque de matéria prima da atividade de cobertura

Figura 47: fotos dos estoques no canteiro

Por fim, o índice de boas práticas de planejamento foi utilizado para avaliar o sistema planejamento em relação às práticas que compõem o Sistema *Last Planner*. Foi utilizado o protocolo de aplicação desenvolvido por Reck (2010) e seguida a mesma estruturação de avaliação e análise dos dados. A Figura 48 apresenta a avaliação das práticas de planejamento do empreendimento N0 agrupadas de acordo com o seu relacionamento com os planos de longo, médio e curto prazo e ao processo de PCP. Pode-se observar um baixo grau de implementação das práticas de planejamento no plano de médio prazo, o que explica, em parte, a grande variabilidade de durações e estoques no canteiro.

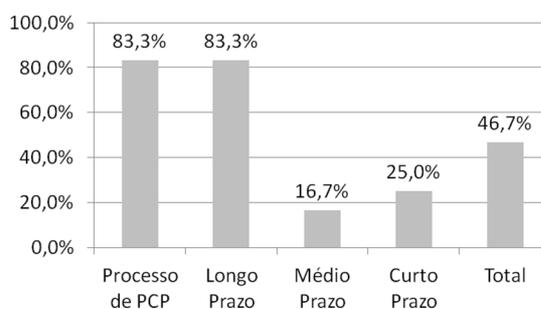


Figura 48: índice de boas práticas de planejamento do empreendimento N0, baseado em (RECK, 2010)

Ao final da avaliação do sistema de produção do empreendimento N0, os resultados foram apresentados em um seminário com a participação de representantes da diretoria da empresa, do setor de planejamento e da produção para avaliar os resultados e definir as etapas seguintes da pesquisa. Foi sugerida pela equipe de pesquisa a realização do processo de PSP com auxílio da SED e 4D como forma de melhorar a compreensão do sistema de produção através das necessárias considerações da variabilidade, interdependências, com o apoio de técnicas de visualização. Assim, iniciou-se a etapa de estudo dos empreendimentos N1 e N2.

### 5.4.2 Processo de Elaboração do Projeto do Sistema de Produção

O processo de elaboração do PSP no empreendimento N1 foi realizado desde as análises da unidade base até o empreendimento. Foram realizadas um total de 6 reuniões com a equipe de produção do empreendimento, de dezembro de 2012 a fevereiro de 2013, todas antes do início do empreendimento. Já o PSP no empreendimento N2 foi realizado apenas para a análise do empreendimento, já que a unidade base era muito similar àquela do empreendimento N1, tornando desnecessária a sua análise novamente. Foram realizadas 4 reuniões de março de 2012 a maio de 2013, também antes do início do empreendimento N2. O Quadro 18 apresenta o esforço despendido para a elaboração do PSP nos empreendimentos N1 e N2. As atividades estão apresentadas de forma cronológica através das datas de cada reunião, detalhando os participantes, horas utilizadas e material necessário para apoio ao processo. A seguir, são detalhadas cada etapa de elaboração do PSP.

Etapa do PSP		Empreendimento N1	Empreendimento N2
Definição da Sequência de Execução e Pré Dimensionamento dos Recursos da Unidade Base	Nº de reuniões	1 reunião de 2 horas	
	Carga horária	06 dez 2013	
	Participantes	Gerente de Planejamento, Coordenador dos empreendimentos, Engenheiro do empreendimento N1 e 2 responsáveis pelo planejamento das obras	
	Preparação e Apoio ao Processo	3 horas definição inicial do diagrama de precedência, planilha de pré-dimensionamento e apresentação sobre PSP	
Estudo dos Fluxos de Trabalho da Unidade Base	Nº de reuniões	1 reunião de 1 hora e meia	
	Carga horária	22 jan 2013	
	Participantes	Gerente de Planejamento, Coordenador dos empreendimentos, Engenheiro do empreendimento N1 e 2 responsáveis pelo planejamento das obras	
	Preparação e Apoio ao Processo	33 horas modelagem de SED e 4D da unidade base, simulação dos modelos com durações históricas e apresentação sobre SED	
Definição do Plano de Ataque	Nº de reuniões	1 reunião de 1 hora e meia	
	Carga horária	18 dez 2013	
	Participantes	Gerente de Planejamento, Coordenador dos empreendimentos, Engenheiro do empreendimento N1 e 2 responsáveis pelo planejamento das obras	
	Preparação e Apoio ao Processo	1 hora preparação dos planos de ataque para construção durante a reunião	

Quadro 18: esforço despendido na elaboração do PSP nos empreendimentos N1 e N2

Etapa do PSP		Empreendimento N1	Empreendimento N2
Estudos dos Fluxos de Trabalho, Dimensionamento da Capacidade dos Recursos e Definição da Estratégia de Execução	<b>Nº de reuniões</b> <b>Carga horária</b> <b>Participantes</b>  <b>Preparação e Apoio ao Processo</b>	1 reunião de 1 hora cada 29 jan 13 Gerente de Planejamento, Coordenador dos empreendimentos, Engenheiro do empreendimento N1 e 2 responsáveis pelo planejamento das obras  12 horas modelagem de SED do empreendimento, simulação dos cenário 1 e 2 e apresentação com resultados	1 reunião de 1 hora cada 19 mar 13 Gerente de Planejamento, Coordenador dos empreendimentos e 2 responsáveis pelo planejamento das obras  10 horas modelagem de SED do empreendimento, simulação dos cenário 1 e 2 e apresentação com resultados
	<b>Nº de reuniões</b> <b>Carga horária</b> <b>Participantes</b>  <b>Preparação e Apoio ao Processo</b>	1 reunião de 1 hora cada 19 fev 13 Gerente de Planejamento, Coordenador dos empreendimentos e 2 responsáveis pelo planejamento das obras  5 horas simulação dos cenário 3 e 4 e apresentação com resultados	1 reunião de 1 hora cada 21 mar 13 Gerente de Planejamento, Engenheiro do empreendimento N1 e 2 responsáveis pelo planejamento das obras  17 horas modelagem 4D do empreendimento, simulação dos cenário 3 e apresentação com resultados
	<b>Nº de reuniões</b> <b>Carga horária</b> <b>Participantes</b>  <b>Preparação e Apoio ao Processo</b>	1 reunião de 1 hora cada 26 fev 2013 Gerente de Planejamento, Coordenador dos empreendimentos e 2 responsáveis pelo planejamento das obras  15 horas modelagem 4D do empreendimento e preparação da alocação de estoques para construção durante a reunião	1 reunião de 1 hora cada 05 abr 13 Gerente de Planejamento, Coordenador dos empreendimentos e 2 responsáveis pelo planejamento das obras  4 horas simulação dos cenário 4 e apresentação com resultados

Quadro 18: esforço despendido na elaboração do PSP nos empreendimentos N1 e N2 (continuação)

#### 5.4.2.1 Definição do sistema

A primeira etapa de elaboração do PSP, assim como nos dois estudos anteriores, foi a definição do sistema de produção. Este processo iniciou-se com a análise inicial do plano de longo prazo do empreendimento N1 e definição preliminar do diagrama de precedência e planilha de pré-dimensionamento da capacidade para a unidade base pela pesquisadora. Durante a primeira reunião, foi apresentado brevemente o modelo de PSP desenvolvido por Schramm (2004) para o nivelamento e difusão de conhecimentos da equipe de produção do empreendimento. Em seguida, foi possível discutir com a equipe de produção do empreendimento N1 os documentos de definição do sistema de produção e realizar modificações conforme as relações de

precedência, produtividades e lotes de produção e transferência realizadas em obra. Essas modificações foram percebidas quando foi acompanhada a sequência inicial da unidade base, a qual estava representada no longo prazo do empreendimento. Durante a análise da sequência de execução, foram coletados dados referentes às durações de cada atividade em termos de duração mínima, moda e máxima.

A unidade base definida para os empreendimentos N1 e N2 foi uma dupla de casas, já que esta é a unidade de produção das paredes, ou seja, é a quantidade de casas por fôrma. Quanto às durações iniciais fornecidas nessa primeira reunião, as mesmas ainda eram tratadas de forma determinística pela equipe de produção do empreendimento. Como pode-se observar na Figura 49, que mostra a planilha de pré-dimensionamento resultante dessa primeira reunião, não apresenta uma variação muito grande entre a distribuição triangular de cada atividade.

	Recursos		Equipes	Lote de Produção	Lote de Transfer	Atividade Precedente	Durações (dias)		
	Equipe	Equipamento					Min	Mod	Max
1 Radier - Locação e Nivelamento	2 op		locacaoRadier	1	1		1	1	1
2 Radier - Instalações de Piso	6 op		instalacoesRadier	1	1	1	2	2	2
3 Radier - Forma, Aço e Concretagem	8 op	Forma, Caminhã	formaRadier	1	1	2	1	1	1
4 Paredes - Aço e Instalações	2 op + 4 op		instalacoesParede	1	1	3	2	2	2
5 Paredes - Forma e Concretagem	10 op	Forma, Caminhã	formaParede	1	1	4	1,00	2	3,00
6 Cobertura	10 op	Linha de Vida	cobertura	1	1	5	2	2	2
7 Tubulação Forro/Enfição	2 op	Andaime	eletrica	1	1	6	1	1	1
8 Forro Gesso	2 op	Andaime	gesso	1	1	7	2	2	2
9 Impermeabilização do Box	1 op		impermeabilizacao	1	1	8	1	1	1
10 Jardim	1 op		jardim	1	1	8	1	1	1
11 Cerâmica Interna	1 op		ceramica	1	1	9	2,00	4	6,00
12 Rejunte	1 op		ceramica	1	1	11	2	2	2
13 Textura forro e golas - PI	1 op	Andaime	texturaexterna	1	1	11	1	1	1
14 Instalações Esquadrias	2 op		esquadrias	1	1	13	1	1	1
15 Textura - PE	1 op	Andaime	texturaexterna	1	1	28	1	1	1
16 Regularização da Parede - PI	1 op	Andaime	regularizacao	1	1	14	1	1	1
17 Pintura - PE	1 op	Andaime	pinturaexterna	1	1	15	1	1	1
18 Textura - PI	1 op	Andaime	texturaexterna	1	1	16	1	1	1
19 PVA 1 demão - PI	1 op	Andaime	pinturaexterna	1	1	18	1	1	1
20 Acabamentos Esquadrias	2 op		esquadrias	1	1	19	1	1	1
21 Porta Externa e rodapé	1 op		porta	1	1	19	1	1	1
22 Louças e Tampos	1 op		loucas	1	1	21	1	1	1
23 Dispositivos Elétricos	1 op		eletrica	1	1	21	1	1	1
24 Metais	1 op		metais	1	1	22 e 23	0,25	0,25	0,25
25 PVA 2 demão - PI	1 op	Andaime	pinturaexterna	1	1	24	2	2	2
26 Portas Internas	3 op		porta	1	1	25	1	1	1
27 Limpeza	1 op		limpeza	1	1	17 e 26	2	2	2

Figura 49: planilha inicial de dimensionamento dos recursos com a indicação das durações, dimensionamento das equipes e lotes de produção

#### 5.4.2.2 Modelagem da Unidade Base

Com a sequência de execução definida na primeira reunião, foi possível modelar a mesma na SED. Dessa forma foram preparadas as planilhas de entrada e saída de dados para a unidade base, além de programar a sequência lógica do modelo de SED. Em paralelo à modelagem para a simulação, foi realizada a modelagem da unidade base em BIM através dos projetos arquitetônicos, com o *software* ArchiCAD. A Figura 50 apresenta o modelo BIM desenvolvido para representar cada uma das atividades do sistema de produção definidas pelo diagrama de precedência.

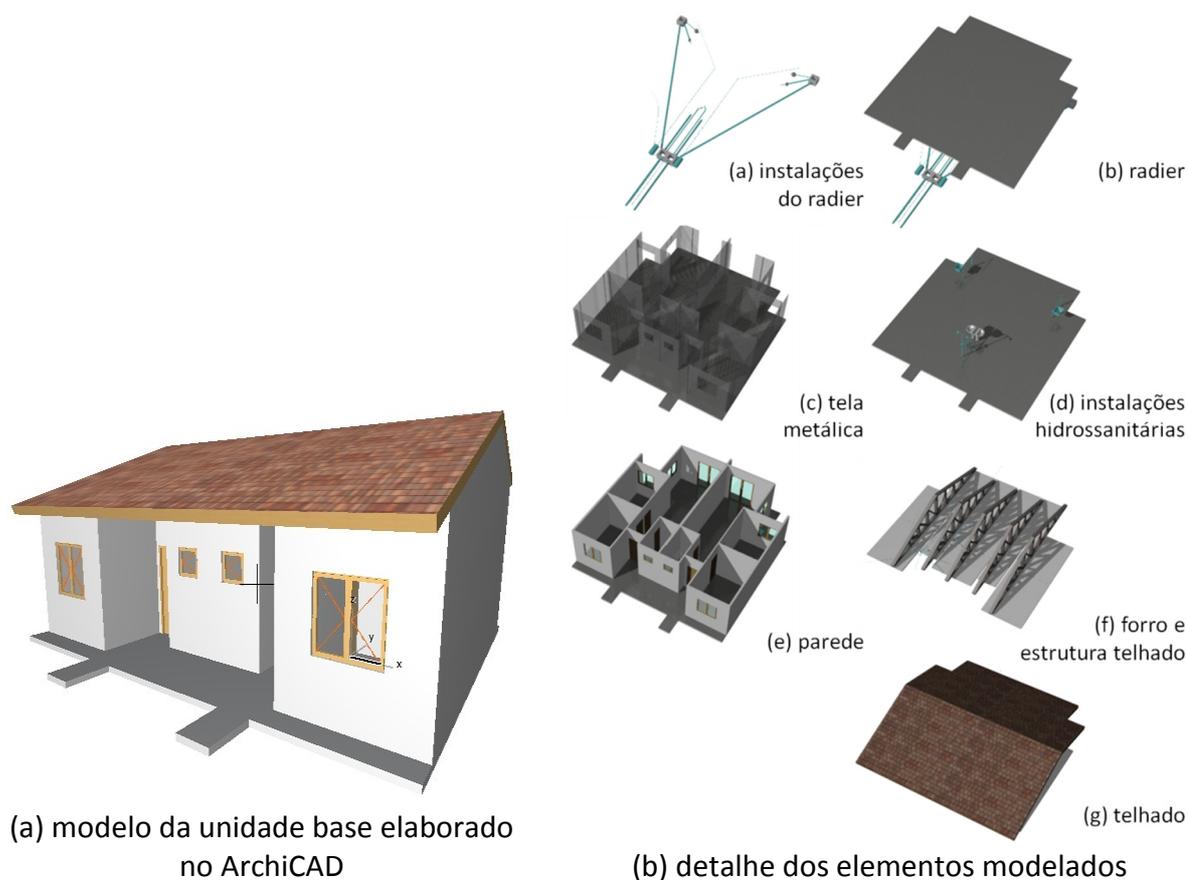
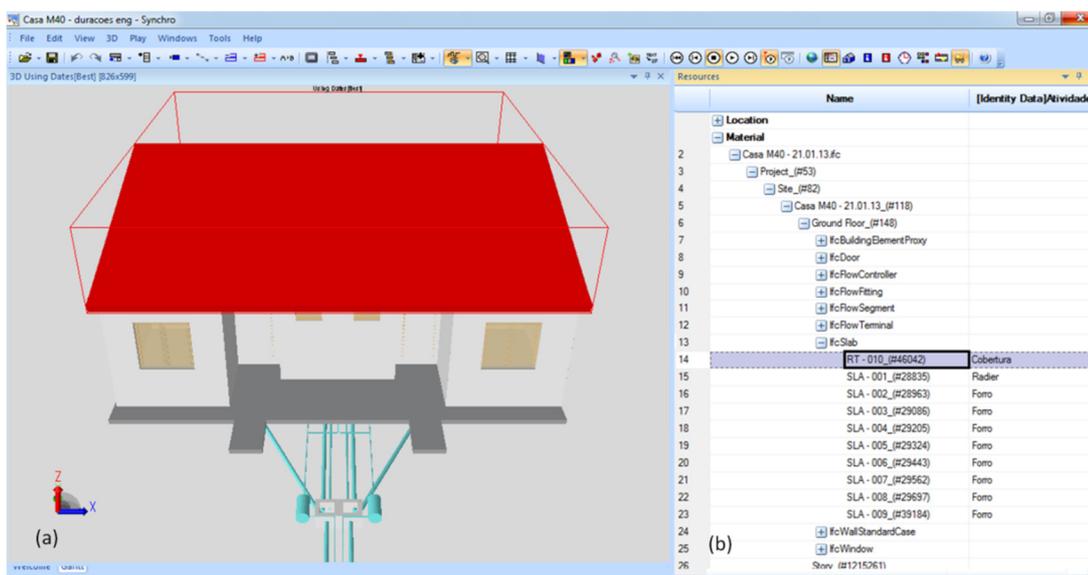
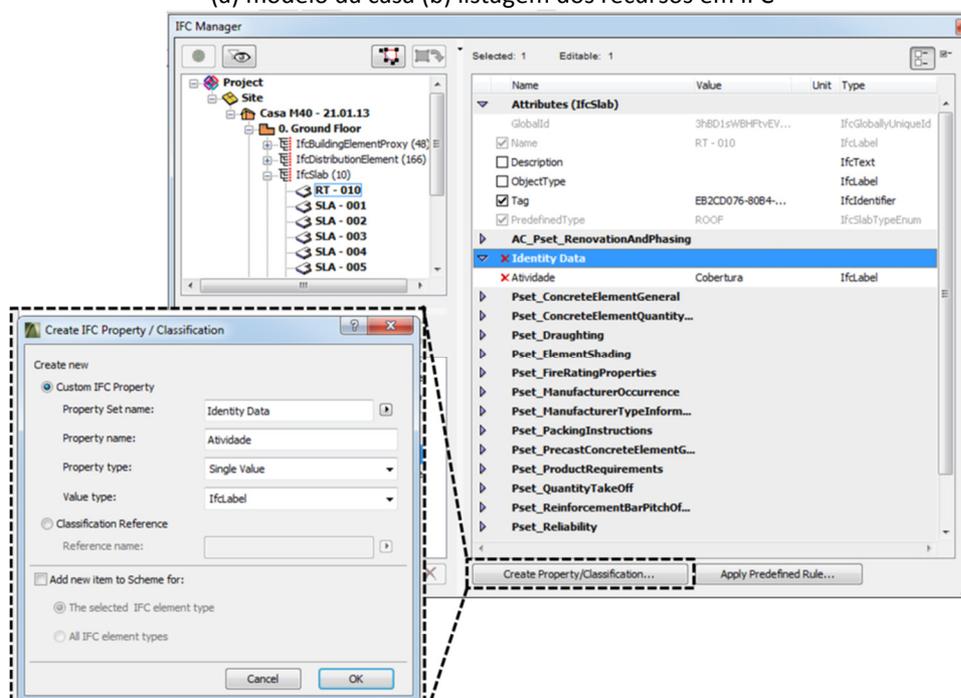


Figura 50: modelo da unidade base em BIM do EE3

Para iniciar a modelagem 4D, foi criada uma propriedade de classificação no modelo IFC. A Figura 51 apresenta a interface de criação de propriedades que o *software* ArchiCAD oferece. Para todos os elementos presentes no modelo, foram criados a propriedade “Atividade” dentro da classificação *Identity Data*. Posteriormente foi inserida para cada elemento a atividade que o mesmo iria representar no 4D. Com a importação do modelo IFC no *software* Synchro, esta nova propriedade de classificação ficava aparente para facilitar a conexão entre os elementos e as atividades - ver Figura 51 (a-b).



(a) modelo da casa (b) listagem dos recursos em IFC



(c) criação da propriedade no ArchiCAD

Figura 51: criação da propriedade *Identity Data*

Esta modelagem de SED e 4D da unidade base foi realizada apenas pela autora deste trabalho. Já a modelagem BIM foi realizada pela equipe de pesquisa, a qual consistia de uma bolsista de iniciação científica e a autora deste trabalho.

#### 5.4.2.3 Estudo dos Fluxos de Trabalho

Com o fim da modelagem da unidade base, foi possível estudar os fluxos de trabalho da mesma. Este foi realizado com a validação dos modelos de SED e BIM 4D de forma iterativa na segunda reunião com a equipe de produção.

Na segunda reunião foram apresentados inicialmente conceitos básicos de simulação, como os benefícios da modelagem de um sistema e exemplos de utilização da simulação na gestão de empreendimento da construção foram apresentados. Em seguida, foi realizada a validação da sequência de execução da unidade base e discutidas distribuições triangulares para cada atividade, com auxílio do diagrama de precedência, histogramas e o modelo 4D.

A Figura 52 ilustra como foi simulada a unidade base para a validação. Com o modelo de SED da unidade base, foram inseridas as durações fornecidas na primeira reunião e o nome das equipes encarregadas da execução das atividades.

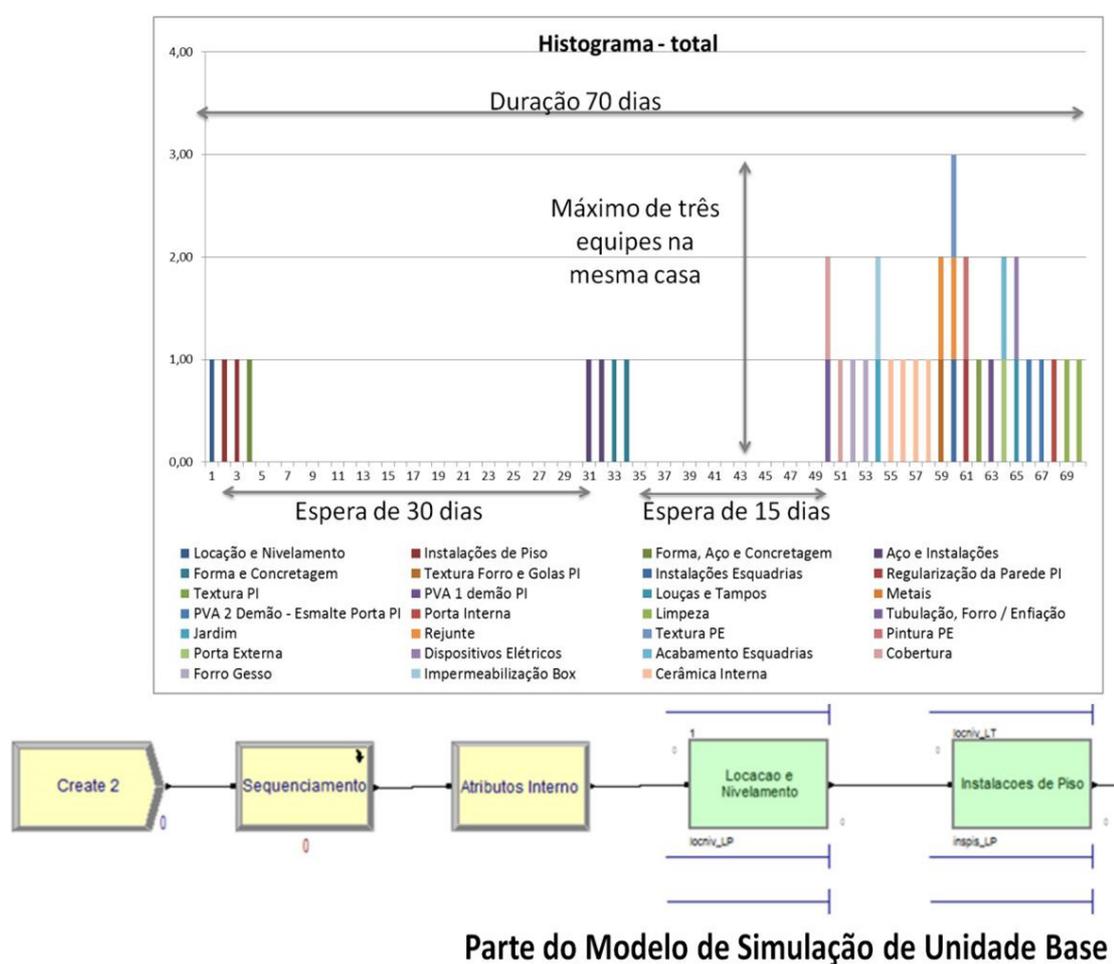


Figura 52: entrada e saída de dados do modelo de simulação para a validação da modelagem da unidade base

No histograma da Figura 52 é mostrada a duração total de uma unidade base, as esperas definidas entre atividades e o número de atividades em paralelo. Já a Figura 53 apresenta as atividades paralelas tanto no histograma como no modelo 4D. A partir dessas ferramentas, a pesquisadora foi, de atividade em atividade, questionando a equipe de produção do empreendimento se estava correta cada uma das informações de saída da simulação e as

alterações na sequência de execução foram formalizadas no diagrama de precedência. Dessa forma, foi possível validar o sequenciamento das atividades da unidade base através do auxílio do histograma e modelo BIM 4D.

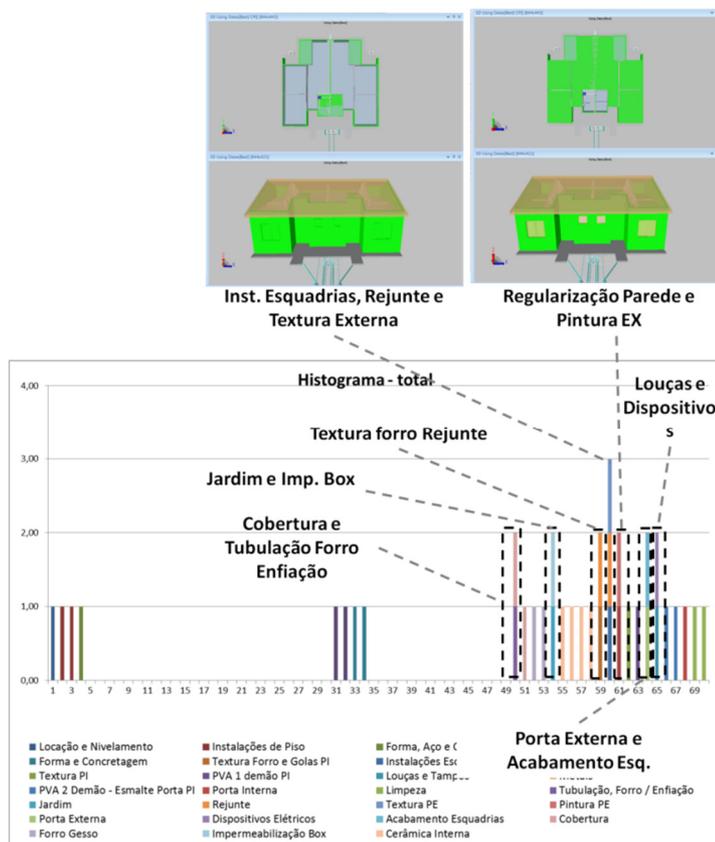


Figura 53: validação da unidade base através do 4D e gráfico de histograma

Mas, como comentado anteriormente, a equipe de produção do empreendimento tinha dificuldade em considerar a variabilidade inerente ao tempo de execução de atividades. Por esse motivo, foram analisados, pela equipe de pesquisa, dois outros empreendimentos de mesma tipologia e da mesma empresa, mas já concluídos. Assim foi possível obter dados históricos da empresa e representar de forma gráfica a variabilidade presente no sistema produtivo (ver Figura 54). Pode-se perceber que as durações históricas da empresa apresentam uma grande variabilidade e o gráfico de frequência de cada atividade indica que estes representam o tempo de ciclo dos mesmos. Por outro lado, foi comentado pela equipe de produção do empreendimento que estes dados não poderiam ser utilizados na sua totalidade, devido a possíveis problemas de inconsistência na inserção das datas executadas no Microsoft Project, ferramenta de controle utilizada pela empresa N. Mas mesmo com problemas de consistência dos dados, os mesmo foram utilizados para a discussão das reais distribuições de probabilidade das atividades.

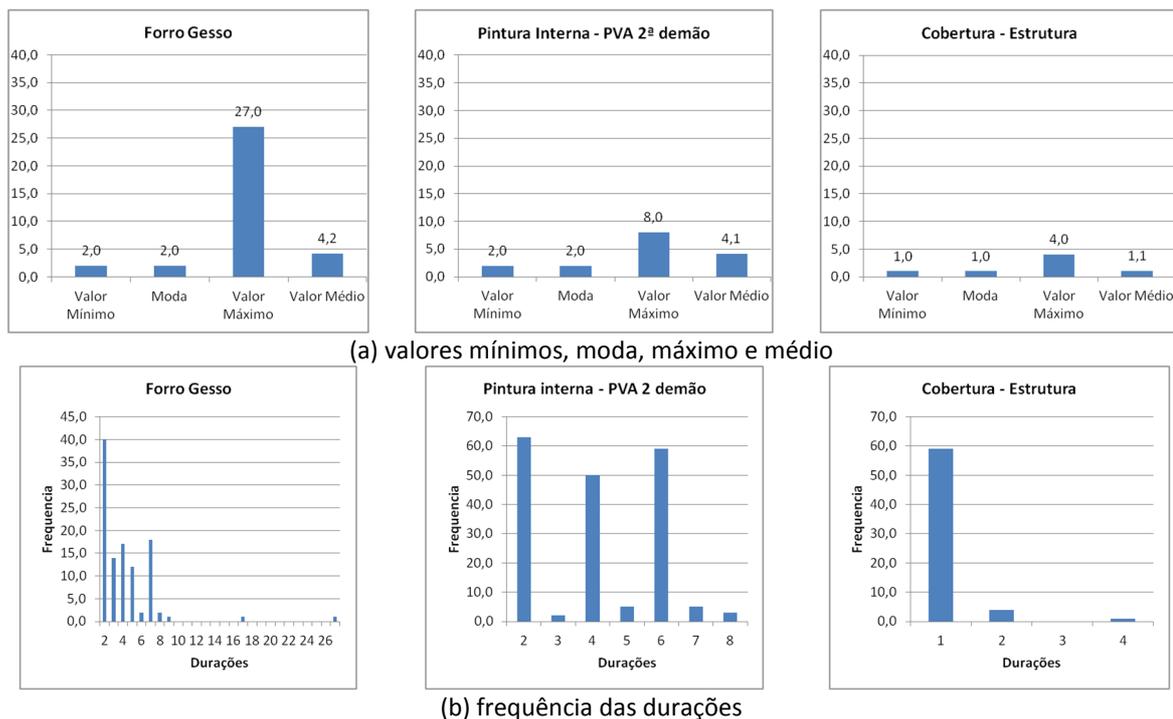


Figura 54: durações executadas das atividades de dados históricos

Para demonstrar o impacto da variabilidade detectada nos dados históricos da empresa, foi inserida no mesmo modelo de simulação da Figura 52 as durações presentes no banco de dados. A Figura 55 apresenta as durações inseridas e o resultado obtido através do histograma. A duração total da unidade base foi maior (101 dias no total) que a duração da simulação anterior (70 dias). Após mostrar os dados históricos e o resultado desta segunda simulação com a unidade base para equipe de produção do empreendimento, foi discutida a importância de considerar uma distribuição triangular mais condizente com a realidade e de acordo com a experiência acumulada da equipe de produção.

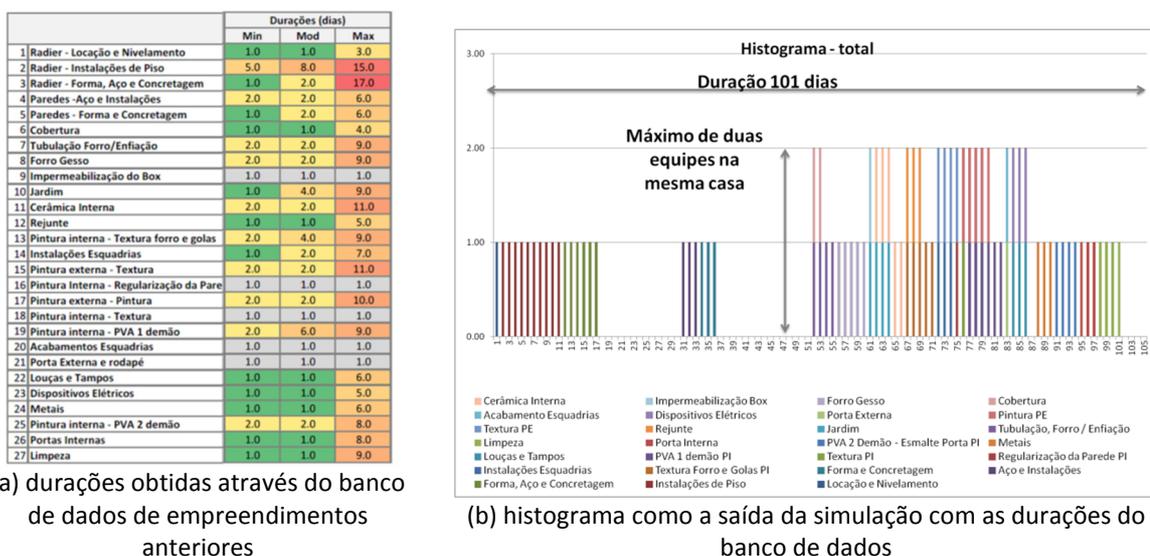


Figura 55: simulação realizada com as durações do banco de dados

A partir disso, foram estimadas novamente, para cada atividade, as durações mínima, moda e máxima. A Figura 56 apresenta a planilha final de dimensionamento dos recursos que foi considerada em todos os cenários seguintes.

	Recursos		Equipes	Lote de Produçã	Lote de Transfer	Atividade Precedente	Antes			Depois		
							Durações (dias)			Durações (dias)		
	Equipe	Equipamento					Min	Mod	Max	Min	Mod	Max
1 Radier - Locação e Nivelamento	2 op		locacaoRadier	1	1		1	1	1	1,0	1,0	2,0
2 Radier - Instalações de Piso	6 op		instalacoesRadier	1	1	1	2	2	2	1,0	2,0	3,0
3 Radier - Forma, Aço e Concretagem	8 op	Forma, Caminhãc	formaRadier	1	1	2	1	1	1	1,0	1,0	3,0
4 Paredes - Aço e Instalações	2 op + 4 op		instalacoesParede	1	1	3	2	2	2	2,0	2,0	4,0
5 Paredes - Forma e Concretagem	10 op	Forma, Caminhãc	formaParede	1	1	4	1,00	2	3,00	1,0	2,0	4,0
6 Cobertura	10 op	Linha de Vida	cobertura	1	1	5	2	2	2	1,5	2,0	3,0
7 Tubulação Forro/Enfição	2 op	Andaime	elettrica	1	1	6	1	1	1	1,0	2,0	3,0
8 Forro Gesso	2 op	Andaime	gesso	1	1	7	2	2	2	1,0	1,0	2,0
9 Impermeabilização do Box	1 op		impermeabilizacao	1	1	8	1	1	1	1,5	1,5	1,5
10 Jardim	1 op		jardim	1	1	8	1	1	1	1,0	1,0	1,0
11 Cerâmica Interna	1 op		ceramica	1	1	9	2,00	4	6,00	2,0	4,0	6,0
12 Rejunte	1 op		ceramica	1	1	11	2	2	2	1,0	1,0	2,0
13 Textura forro e golas - PI	1 op	Andaime	texturaexterna	1	1	11	1	1	1	0,5	0,5	1,0
14 Instalações Esquadrias	2 op		esquadrias	1	1	13	1	1	1	0,5	0,5	1,0
15 Textura - PE	1 op	Andaime	texturaexterna	1	1	28	1	1	1	1,0	1,0	2,0
16 Regularização da Parede - PI	1 op	Andaime	regularizacao	1	1	14	1	1	1	1,0	2,0	2,0
17 Pintura - PE	1 op	Andaime	pinturaexterna	1	1	15	1	1	1	2,0	2,0	3,0
18 Textura - PI	1 op	Andaime	texturaexterna	1	1	16	1	1	1	1,0	2,0	3,0
19 PVA 1 demão - PI	1 op	Andaime	pinturaexterna	1	1	18	1	1	1	1,0	1,0	2,0
20 Acabamentos Esquadrias	2 op		esquadrias	1	1	19	1	1	1	0,5	1,0	1,0
21 Porta Externa e rodapé	1 op		porta	1	1	19	1	1	1	1,0	1,0	2,0
22 Louças e Tampos	1 op		loucas	1	1	21	1	1	1	0,5	0,5	1,0
23 Dispositivos Elétricos	1 op		elettrica	1	1	21	1	1	1	1,0	1,0	2,0
24 Metais	1 op		metais	1	1	22 e 23	0,25	0,25	0,25	0,3	0,3	0,3
25 PVA 2 demão - PI	1 op	Andaime	pinturaexterna	1	1	24	2	2	2	2,0	3,0	4,0
26 Portas Internas	3 op		porta	1	1	25	1	1	1	0,5	0,5	1,0
27 Limpeza	1 op		limpeza	1	1	17 e 26	2	2	2	1,0	1,0	2,0
28 Regularização da Parede - PE	1 op	Andaime	regularizacao	1	1	13				1,00	1	2,00

Figura 56: planilha final de dimensionamento dos recursos com a indicação das durações iniciais e finais utilizadas no modelo de SED

#### 5.4.2.4 Modelagem dos Empreendimentos N1 e N2

Ao final da análise da unidade base, iniciou-se as análises dos empreendimentos conforme as etapas de PSP de Schramm (2004). Mas para utilizar toda a potencialidade das ferramentas de 4D e SED nesse processo de tomada de decisão, foi necessário modelar cada um dos empreendimentos. Esta modelagem foi realizada apenas pela equipe de pesquisa. Assim como elaborado nos EE1 e 2, a modelagem também foi realizada de forma modular. Enquanto o empreendimento N1 foi modelada a sequência de construção de cada quadra separadamente, já o empreendimento N2 foi adotada a lógica de frentes de trabalho de acordo com o número de equipes presente no canteiro. Isso ocorreu devido a uma evolução natural do modelo de simulação, já que o empreendimento N1 foi o primeiro a ser modelado e utilizado para o processo de tomada de decisão. No modelo do empreendimento N2 foi reutilizado a sequência de execução da quadra do empreendimento N1 e, avaliando melhor a forma de estruturação do modelo, foi modificado em frentes de trabalho para reduzir a necessidade de edição do modelo de SED entre diferentes cenários. Os modelos de SED finais são apresentados na Figura 57. Nesta é possível visualizar a simplificação que foi obtida entre o modelo de SED do empreendimento N1 e N2, reduzindo, assim, a formatação para cada cenário.

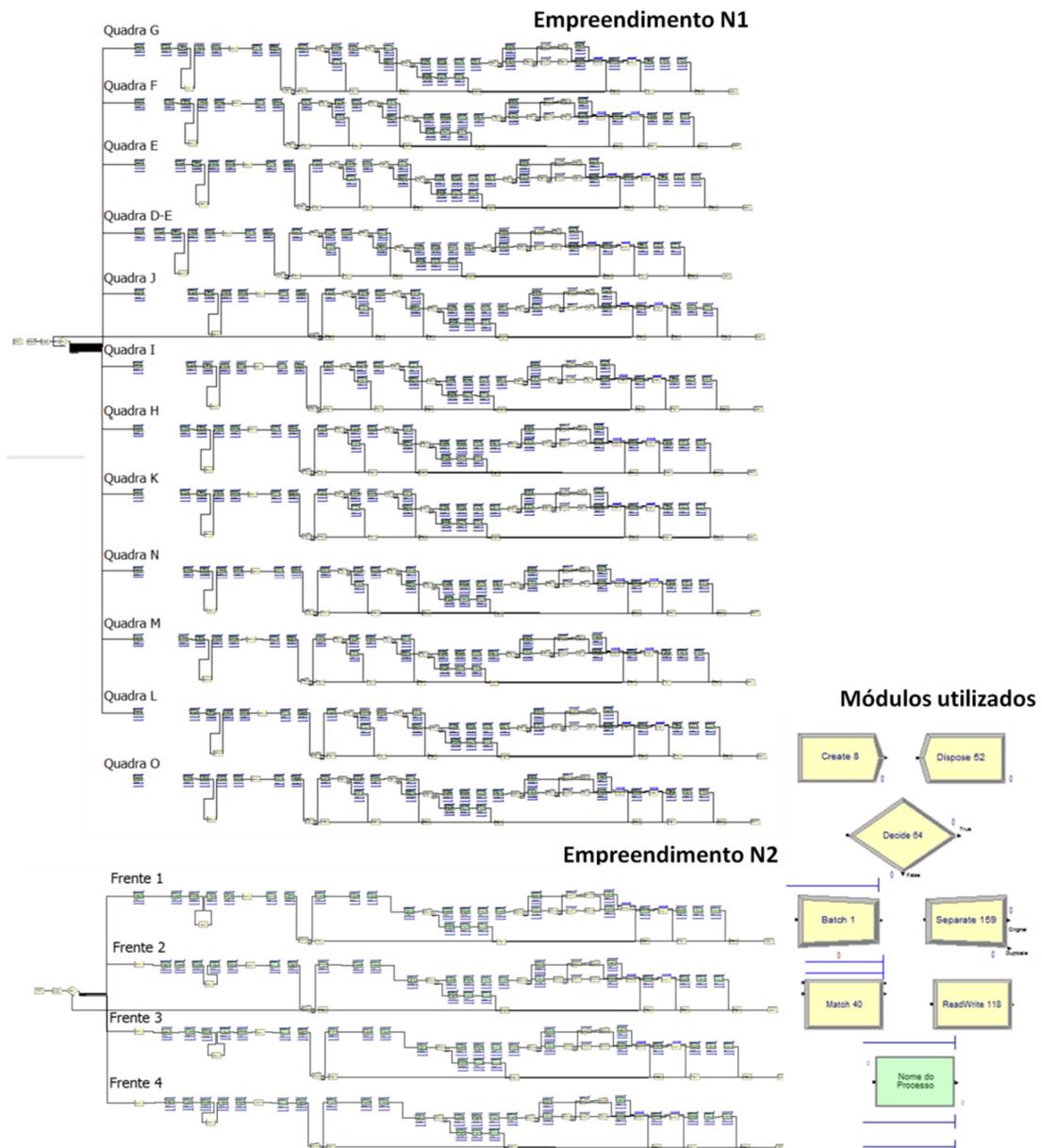
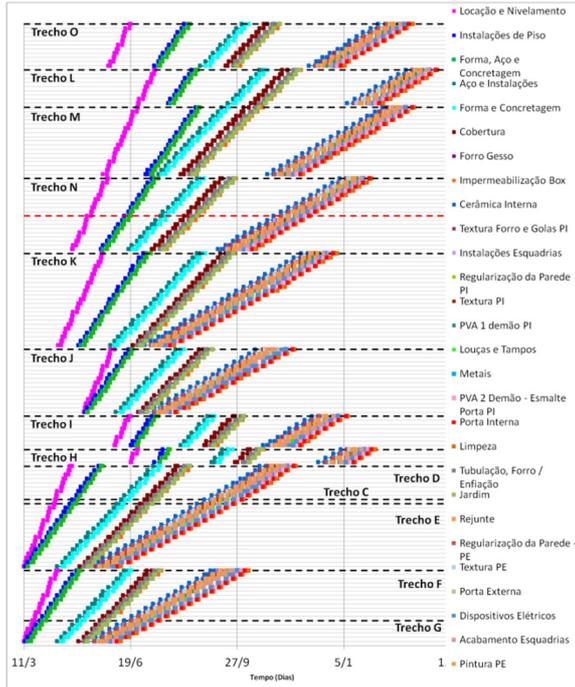
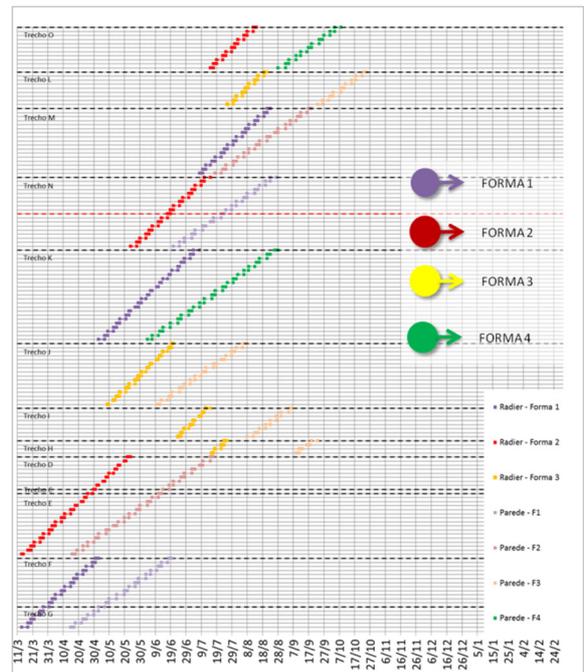


Figura 57: modelo de simulação apresentando o sequenciamento das atividades e os módulos utilizados: (a) modelo do N1 de acordo com as quadras; (b) modelo do N2 de acordo com frentes de trabalho

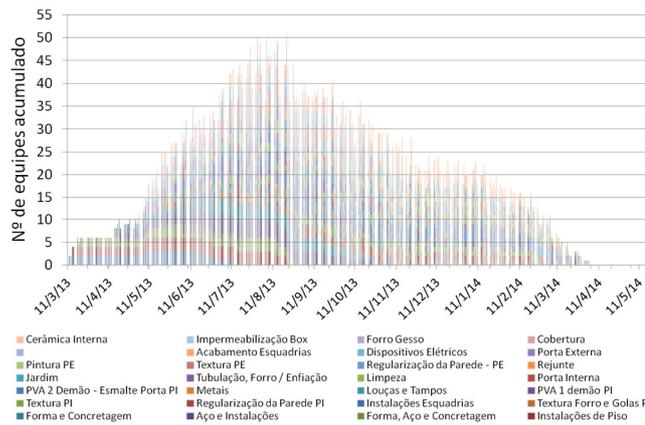
Para o apoio na tomada de decisão, além da utilização da modelagem 4D, também foi elaborada uma planilha eletrônica para gerar gráficos. Estes também foram alimentados com os dados de saída da simulação. A Figura 58 apresenta a visualização dos resultados do EE3 através da linha de balanço, gráfico de sincronia, histograma, gráfico de sequenciamento e gráfico de tempo em espera.



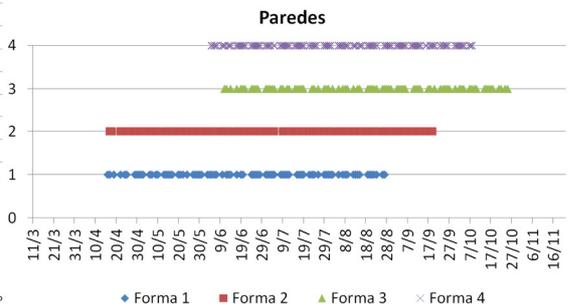
(a) gráfico da linha de balanço realizada através das médias



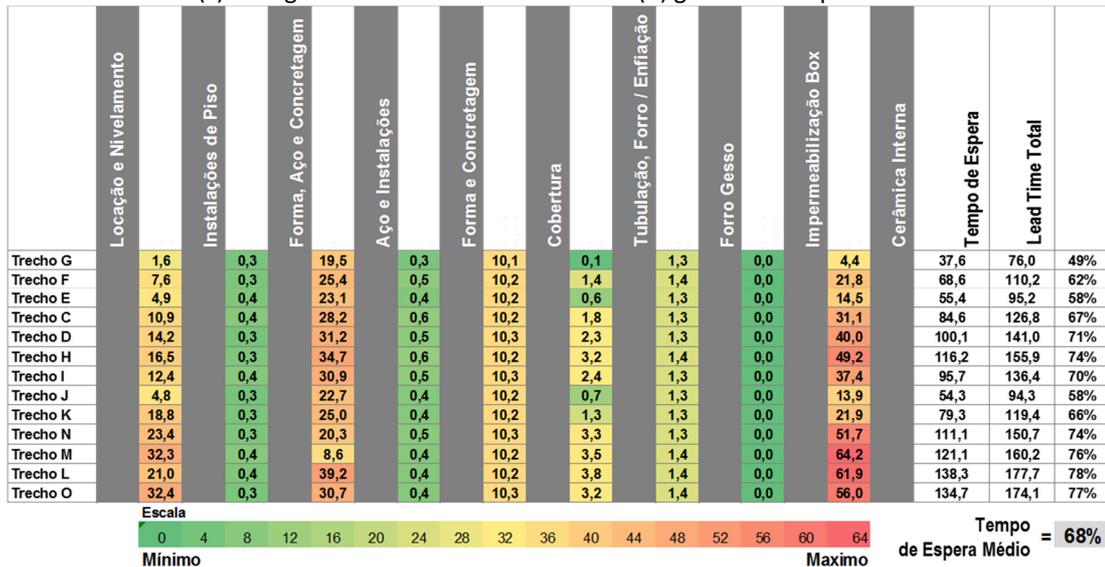
(b) gráfico de sincronia das equipes de radier e parede



(c) histograma



(d) gráfico de sequenciamento das atividades



(e) gráfico de tempo em espera

Figura 58: planilha eletrônica de visualização dos resultados da simulação no EE3

Assim como na modelagem 4D da unidade base, foi inserida no modelo 4D do empreendimento o modelo BIM com informações em IFC. Dessa forma, para cada empreendimento, foi inserida a implantação dos empreendimentos e depois a quantidade necessária de unidades base para compor todas as quadras. Em seguida, foram inseridas as atividades e durações de início e fim através do vínculo das células da planilha eletrônica e a aba de inserção das atividades do Synchro. O restante da vinculação entre elemento e atividade seguiu o mesmo processo descrito na modelagem do EE2, Figura 59 apresenta o modelo 4D do empreendimento N1 e suas informações de entrada.

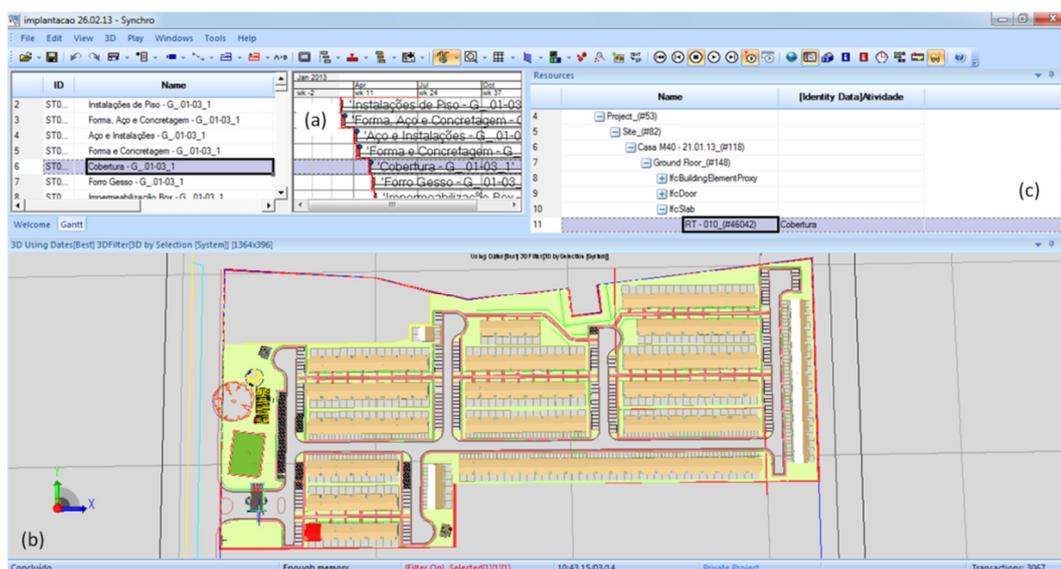


Figura 59: modelo 4D do empreendimento N1, as abas mostram: (a) o arquivo de datas de início; (b) o arquivo em BIM do empreendimento; e (c) a classificação dos elementos IFC, com a propriedade *Identity Data*

#### 5.4.2.5 Análise do Empreendimento N1

Logo na terceira reunião de elaboração do PSP, foram definidas duas alternativas de plano de ataque e sequenciamento do empreendimento N1. Estas foram esquematicamente desenhadas na implantação do empreendimento conforme a quantidade de frentes de trabalho, sendo que cada fôrma é representada por uma cor diferente, e o número representa o sequenciamento destas. Os dois primeiros cenários são apresentados na Figura 60, sendo que o cenário 1 apresenta três frentes de trabalho (três fôrmas em paralelo), e o cenário 2 apresenta quatro frentes de trabalho.



Figura 60: cenário 1 e 2 do empreendimento N1

Esta definição foi realizada pela equipe de produção, já que a mesma tinha dúvidas quanto às vantagens de utilizar mais de uma frente de trabalho em paralelo. A Tabela 1 apresenta a comparação dos dois primeiros cenários simulados, enquanto o cenário 1 tem a duração de 14 meses e três equipes, o cenário 2 tem a duração de 12 meses, mas com 4 equipes. Avaliando o número de concretagens por frente de trabalho e, conseqüentemente por fôrma, o cenário 2 apresenta uma média menor (37,25 casas) que o cenário 1 (49,66 casas), mas ainda não está dividida uniformemente, tendo picos de 42 concretagens para a frente 2 e apenas 34 concretagens para a frente 4. A consideração do número de concretagens por fôrma é importante devido à vida útil da mesma, mas também quanto à utilização da mesma no canteiro, ou seja, o ideal é que todas as formas utilizadas tenham praticamente o mesmo número de concretagens.

Cenário	Nº de concretagens por equipe				Início (dia 1)	Término	Média Término (dias)	Desvio Padrão Término (dias)	Duração (meses)
	1	2	3	4					
1	52	52	45	-	11/03/13	30/05/14	319,51	4,62	13
2	36	42	37	34	11/03/13	08/04/14	281,66	4,42	14

Tabela 1: comparação dos resultados dos cenários 1 e 2

A Figura 61 apresenta a defasagem entre as equipes de *radier* e parede de cada cenário através de histogramas. Dessa forma é possível observar que a equipe 1 do *radier* do cenário 1 tem uma

defasagem de 12 semanas da equipe 1 da parede, ou seja, cada casa da frente de trabalho 1 espera, entre as atividades de *radier* e parede, 12 semanas. Esta espera não é ideal para o empreendimento, pois acarreta em estoque de produto inacabado no canteiro, mas a equipe de produção do empreendimento utiliza esse recurso para não ocorrer quebras de continuidade de trabalho da atividade de concretagem de paredes.

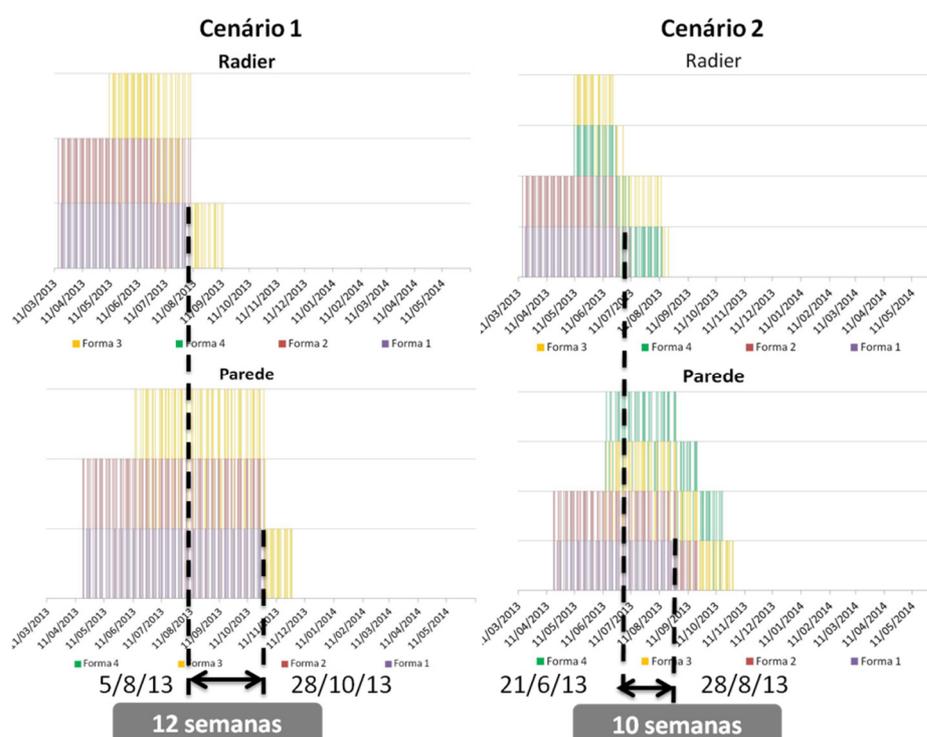


Figura 61: comparação de estoque de produto inacabado entre equipes de *radier* e parede

A quantidade de tempo que cada unidade de produção espera pela atividade seguinte pode ser melhor representado na Figura 62, na qual o tempo médio de espera por trecho ou quadra está representado pela duração entre duas atividades sub-sequentes. No cenário 1 a espera média total do empreendimento N1 é de 70%, enquanto no cenário 2 é de 68%.

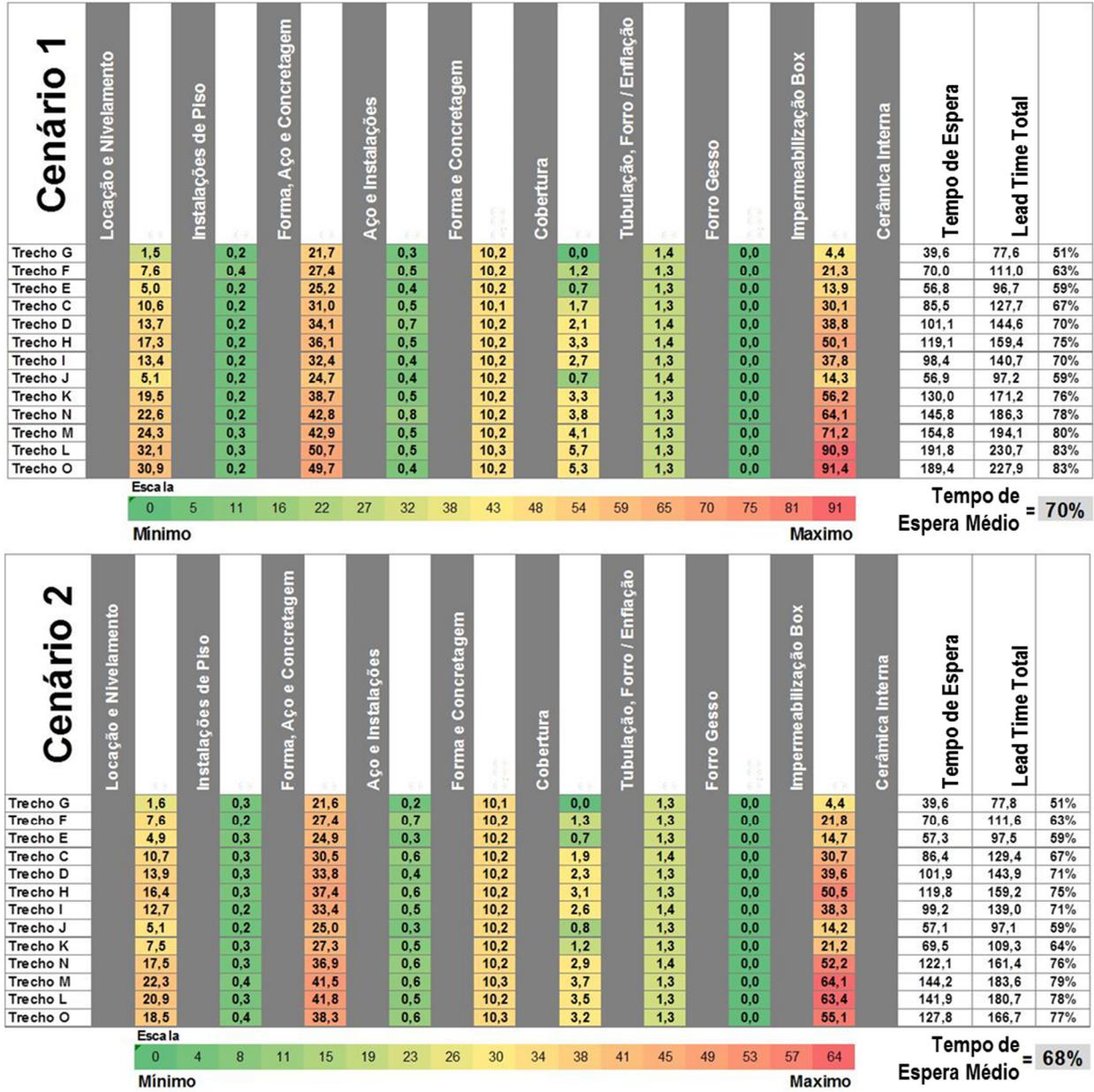


Figura 62: comparativo de tempo de espera entre cenários 1 e 2

É importante salientar que a escala de variação do cenário 1 é de 0 a 91 dias de espera e no cenário 2 é de 0 a 64 dias de espera e que as maiores esperas estão entre as atividades de: (a) forma, aço e concretagem do *radier* e aço e instalações das paredes; e (b) impermeabilização do box e cerâmica interna. Isso ocorre devido aos ritmos diferentes entre cada uma dessas atividades apresentadas na linha de balanço da Figura 63. Existem apenas duas esperas devido a questões técnicas: (a) a equipe de paredes deve esperar de 10 a 20 dias depois da concretagem do *radier*; e (b) a equipe de cobertura deve esperar de 7 a 15 dias depois da concretagem das paredes.

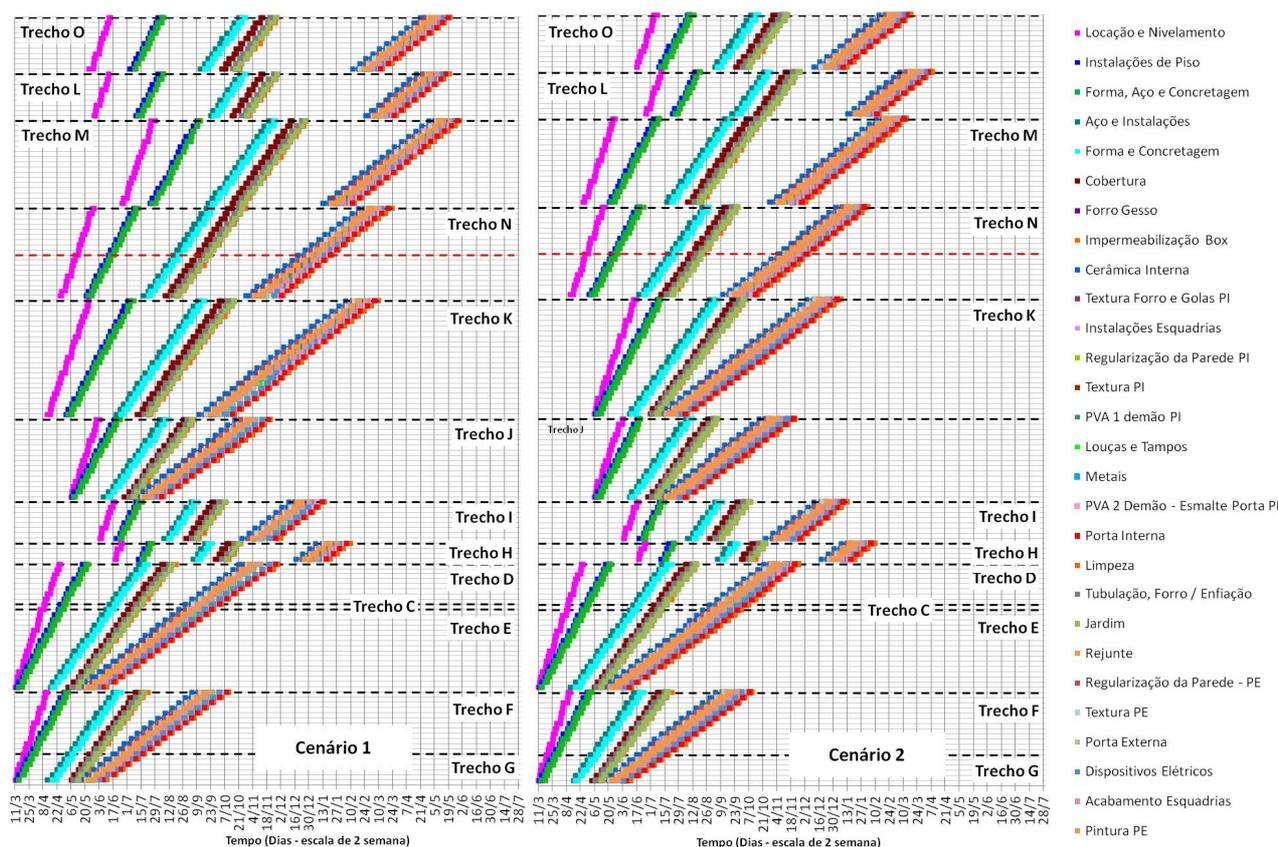


Figura 63: linhas de balanço dos cenários 1 e 2

Com essa análise de tempo de espera da unidade de produção entre atividades, foi possível avaliar o impacto de espera entre as atividades de *radier* e parede. Por esse motivo, a equipe de produção do empreendimento N1 solicitou a simulação dos cenários 1 e 2 com variações do tipo de espera entre estas atividades. Dessa forma, foram simulados dois novos cenários, com espera de 12 *radier* e 6 *radier*, o que nos cenários iniciais era um tempo de espera de 20 dias. O resumo destes resultados é apresentado na Tabela 2.

Cenário	Espera entre <i>radier</i> e paredes	Nº de concretagens por frente de trabalho				Início (dia 1)	Término	Média Término (dias)	Desvio Padrão Término (dias)	Duração (meses)	Tempo de Espera Médio
		1	2	3	4						
1	20 dias	52	52	45	-	11/03/13	30/05/14	319,51	4,62	14	70%
1B	12 <i>radier</i>	52	52	45	-	11/03/13	16/06/14	330,96	4,76	13	71%
1C	6 <i>radier</i>	52	52	45	-	11/03/13	16/05/14	309,58	5,55	13	68%
2	20 dias	36	42	37	34	11/03/13	08/04/14	281,66	4,42	12	68%
2C	6 <i>radier</i>	36	42	37	34	11/03/13	26/03/14	272,22	3,59	11	66%

Tabela 2: comparação dos resultados dos cenários 1 e 2 e variações

Em um dos cenários, foi considerada a espera de 12 *radiers* finalizados entre o fim do *radier* e início das paredes, denominado cenário B, e a espera de 6 *radiers*, denominado cenário C.

Método para integração da simulação de eventos discretos e modelagem 4D no projeto do sistema de produção de empreendimentos habitacionais de interesse social.

Como se pode observar na Tabela 2, a diferença entre o cenário 1 e 1B é muito pequena, sendo praticamente igual a espera por 12 *radiers* ou 20 dias. Mas a diferença entre os cenários 1 e 1C apresenta diferenças maiores e, dessa forma, foi adotado a espera de apenas 6 *radiers* nos seguintes cenários.

Ao final das análises de espera entre *radier* e paredes, a equipe de produção do empreendimento N1 propôs a possibilidade de utilizar três equipes para a atividade de *radier* e quatro equipes para a atividade de paredes. Isto se deve ao ciclo de execução mais rápido da atividade de *radier*. Esta nova disposição de equipes resultou no cenário 3, apresentado na Figura 64.

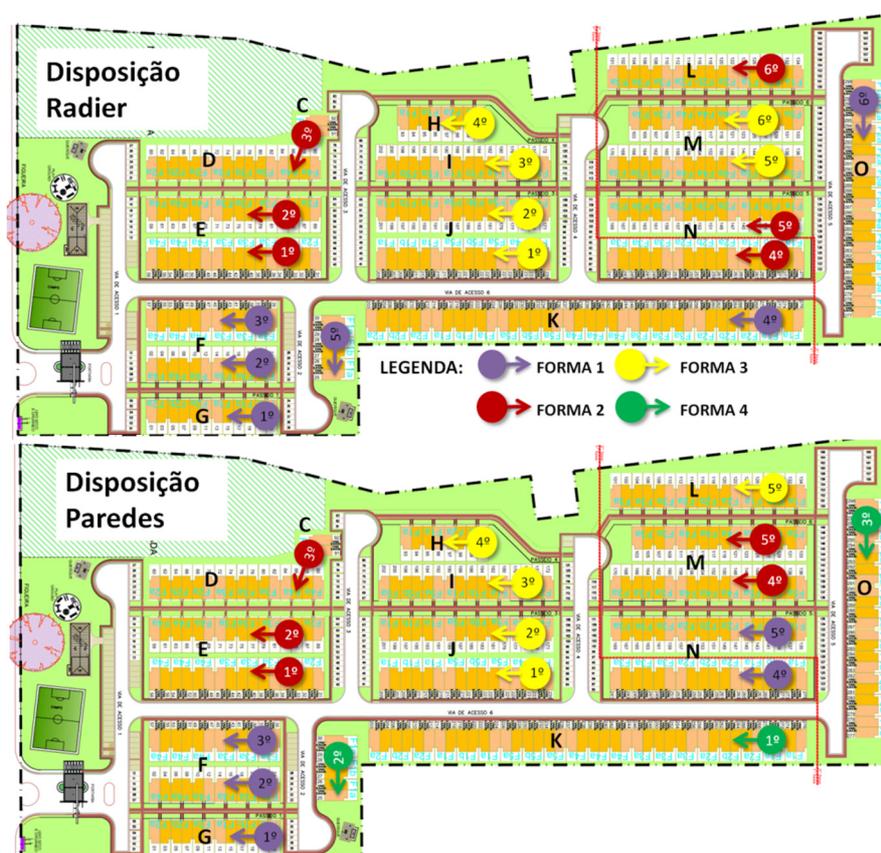


Figura 64: disposição das frentes de *radier* e paredes do cenário 3

Como pode ser observado na Figura 65 a equipe 2 de paredes tem uma quebra de continuidade de praticamente 2 meses devido à espera do início da equipe de *radier* na quadra M. Com o auxílio dos gráficos da Figura 65, foi possível posicionar as equipes de *radier* de forma a permitir a continuidade das equipes de parede. Dessa forma, foi elaborado o cenário 4, apresentado na Figura 66.

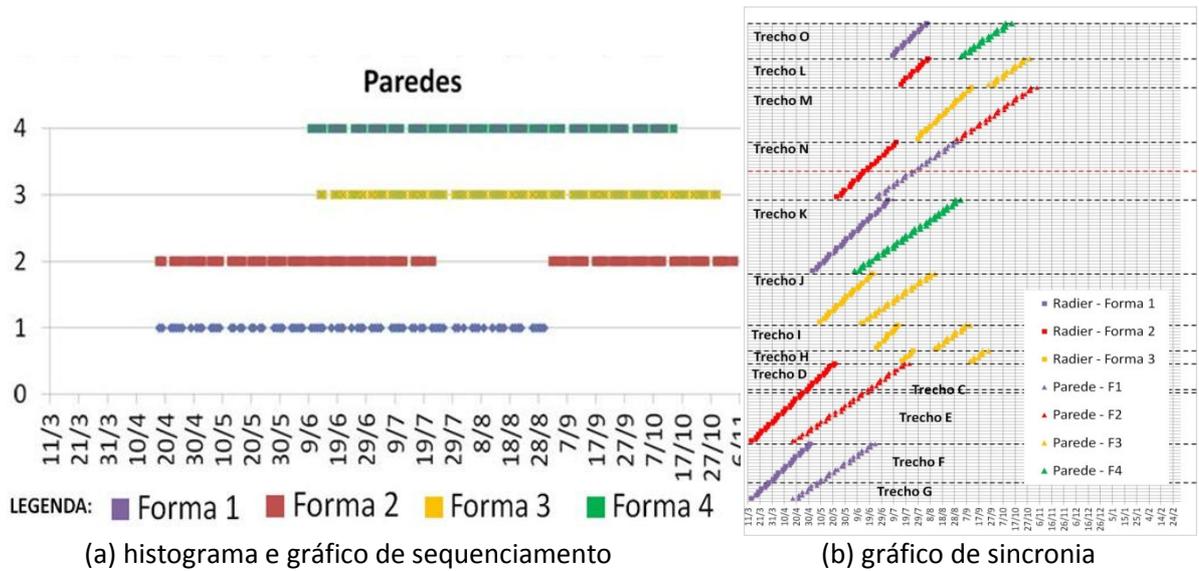


Figura 65: gráfico que apresentam a quebra de continuidade da equipe 2 de parede do cenário 3



Figura 66: disposição das frentes de radier e paredes do cenário 4

A Figura 67 apresenta a continuidade de todas as equipes no cenário 4 e a Tabela 3 apresenta a comparação entre o cenário 3 e 4. O cenário 4 apenas tem um ganho na espera de unidades de produção, se comparado com o cenário 3, mas se comparado aos cenários 1 e 2, o mesmo apresenta redução de até 2 meses no prazo e uma redução de 70% para 68% de tempo de espera.

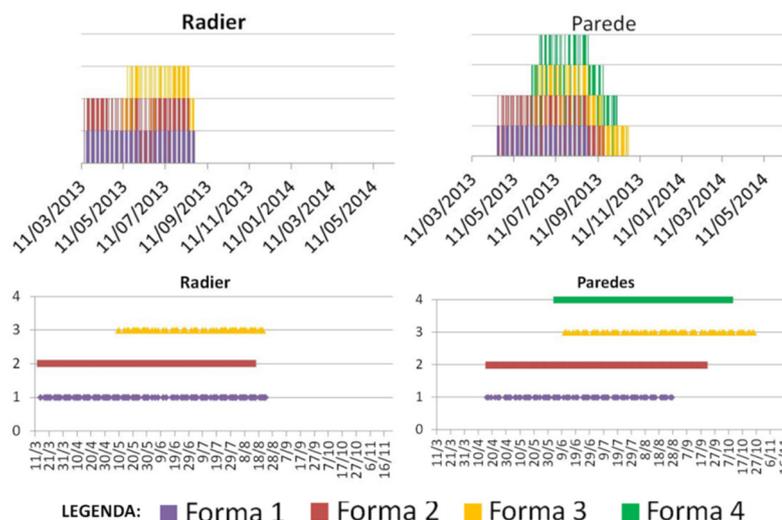


Figura 67: histograma e sequenciamento das atividades de *radier* e parede do cenário 4

Cenário	Nº de concretagens por frente de trabalho				Início (dia 1)	Término	Média Término (dias)	Desvio Padrão Término (dias)	Duração (meses)	Tempo de Espera Médio	
	Tipo	1	2	3							4
3	<i>Radier</i>	52	52	45	-	11/03/13	08/04/14	281,17	4,17	12	69%
	<i>Parede</i>	36	42	37	34						
4	<i>Radier</i>	58	54	37	-	11/03/13	07/04/14	280,02	4,63	12	68%
	<i>Parede</i>	36	42	37	34						

Tabela 3: comparação dos resultados dos cenários 3 e 4

Com a finalização das alternativas de cenários, foi possível determinar onde cada estoque de matéria prima das atividades críticas iria permanecer ao longo do tempo. Dessa forma, com o auxílio da modelagem 4D (Figura 68), foi possível planejar a localização dos estoques, ver Figura 69.



Figura 68: modelagem 4D do cenário 4

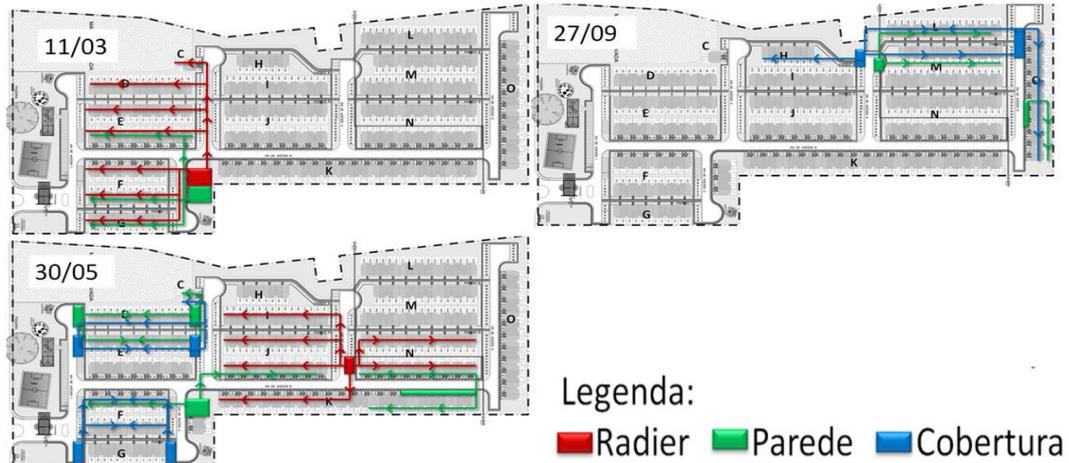


Figura 69: localização dos estoques no cenário 4

#### 5.4.2.6 Análise do Empreendimento N2

Assim como a discussão do empreendimento N1, também na segunda reunião de PSP do EE3, foram definidas duas alternativas de plano de ataque e sequenciamento do empreendimento N2 pela equipe de produção do empreendimento N2, apresentadas na Figura 70.

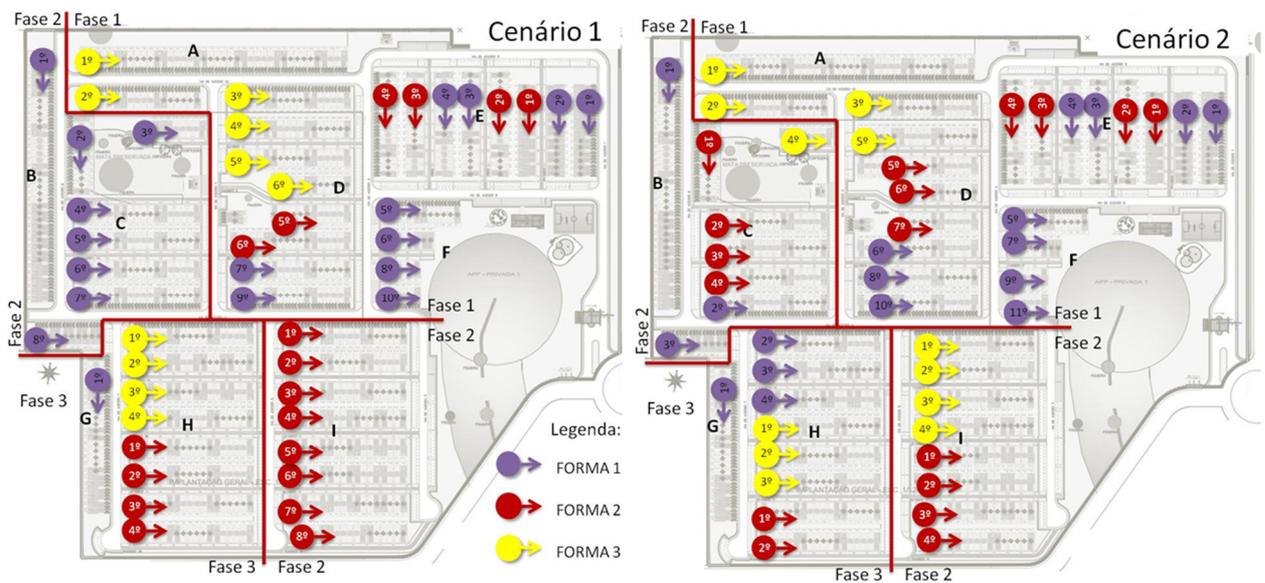


Figura 70: cenário 1 e 2 do empreendimento N2

Os cenários 1 e 2 apresentam três frentes de trabalho dispostas de formas diferentes, sendo que a Tabela 4 apresenta a comparação desses dois primeiros cenários. Podemos observar que no cenário 1 a duração é maior (35 meses) comparada ao cenário 2 (33 meses). Mesmo que o número total de concretagens dos dois cenários por frente de trabalho seja praticamente a mesma, a fase 1 termina dois meses antes no cenário 2 comparado com o cenário 1.

Cenário	Fase	Nº de concretagens por frente de trabalho			Início Média - Desvio (dias)	Término Média - Desvio (dias)	Duração (meses)	Tempo de Espera Médio
		1	2	3				
1	1	64	70	12	08/04/13 0 - 0	12/12/14 439,38 - 4,51	21	60,4%
	2	56	72	36	25/09/13 122,72 - 3,11	30/07/15 603,75 - 7,72	23	68,0%
	3	62	-	36	20/12/13 184,40 - 3,27	22/02/16 750,73 - 6,19	27	74,5%
	<b>Total</b>	<b>172</b>	<b>142</b>	<b>84</b>	<b>08/04/13</b>	<b>22/02/16</b>	<b>35</b>	<b>65,8%</b>
2	1	73	33	39	08/04/13 0 - 0	13/10/14 395,54 - 5,27	19	64,8%
	2	51	69	18	27/06/13 58,55 - 0,87	19/08/13 617,18 - 5,24	27	76,1%
	3	47	40	27	14/10/13 135,49 - 1,89	09/12/15 697,30 - 5,85	27	80,0%
	<b>Total</b>	<b>171</b>	<b>142</b>	<b>84</b>	<b>08/04/13</b>	<b>09/12/15</b>	<b>33</b>	<b>71,6%</b>

Tabela 4: comparação dos resultados dos cenários 1 e 2 do empreendimento N2

Entretanto, o tempo médio total de espera das unidades de produção no cenário 1 é menor (65,8%) comparada ao cenário 2 (71,6%), como pode ser observado na Tabela 4. Essa discrepância entre os dois cenários e entre cada fase, pode ser explicada pela duração média que cada trecho. Dessa forma, mesmo que o cenário 2 termine antes, cada fase do empreendimento fica em execução uma duração maior que as fases do cenário 1, indicando que o cenário 2 produz mais esperas que o cenário 1. A equipe de produção do empreendimento ainda sugeriu o sequenciamento de quatro frentes de trabalho nas fases 1 e 2, ver Figura 71. A terceira fase seria definida com o resultado da simulação deste, já que seria interessante colocar a frente de trabalho que terminasse antes as duas primeiras fases e que apresentasse menor tempo de espera.

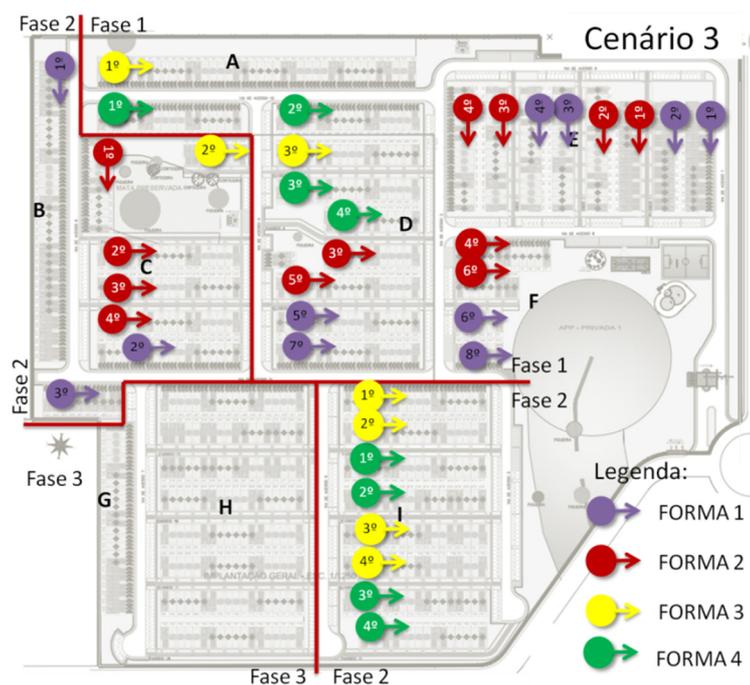


Figura 71: cenários 3 do empreendimento N2

A Tabela 5 apresenta as datas de entrada e saída de cada frente de trabalho nas fases 1 e 2. Com essa análise, a equipe de produção do empreendimento N2 decidiu continuar com a frente 1 na quadra G e inserir as frentes 3 e 4, com a mesma disposição da quadra I, na quadra H, ver Figura 73. Dessa forma, foram escolhidas as equipes que terminavam a sua atividade mais cedo e com um percentual de tempo de espera menor, ver Figura 72.

Frentes de Trabalho	Início Média - Desvio (dias)	Término Média - Desvio (dias)	Duração (meses)
1	08/4/2013 0 - 0	22/12/2014 445,87 - 5,39	21
2	06/05/2013 20 - 0	28/01/2015 472,82 - 5,07	21
3	06/05/2013 20 - 0	29/09/2014 385,47 - 3,63	17
4	06/05/2013 20 - 0	24/09/2014 382,20 - 3,97	17

Tabela 5: resultado do cenário 3 por formas

	Locação e Nivelamento	Instalações de Piso	Forma, Aço e Concretagem	Aço e Instalações	Forma e Concretagem	Tubulação, Forro / Enfiladação	Cobertura	Forro Gesso	Impermeabilização Box	Cerâmica Interna	Tempo de Espera	Lead Time Total									
Fase 1	Trecho E1	4,4	0,3	24,1	0,3	0,7	10,2	0,0	0,0	7,6	47,74	90,33	52,8%								
	Trecho E2	4,7	0,3	24,5	0,4	0,9	10,2	0,0	0,0	7,6	48,50	91,86	52,8%								
	Trecho E3	14,2	0,4	33,7	0,4	3,6	10,3	0,0	0,0	24,3	86,81	139,90	62,1%								
	Trecho E4	15,0	0,3	35,4	0,5	4,2	10,2	0,0	0,0	24,7	90,39	143,41	63,0%								
	Trecho A	6,0	0,3	26,0	0,4	1,5	10,2	0,0	0,0	10,0	54,47	98,84	55,1%								
	Trecho D1	13,1	0,3	33,6	0,5	3,9	10,2	0,0	0,0	23,1	84,67	136,66	62,0%								
	Trecho D2	16,3	0,3	36,7	0,5	4,1	10,2	0,0	0,0	29,1	97,06	151,51	64,1%								
	Trecho D3	27,7	0,3	48,2	0,5	7,9	10,3	0,0	0,0	46,6	141,49	202,38	69,9%								
	Trecho D4	26,3	0,3	46,8	0,4	6,8	10,2	0,0	0,0	45,1	136,01	198,24	68,6%								
	Trecho F1	29,9	0,2	50,6	0,5	8,3	10,2	0,0	0,0	50,8	150,61	217,06	69,4%								
Trecho F2	30,3	0,4	50,7	0,6	7,9	10,3	0,0	0,0	51,8	152,05	217,10	70,0%									
Trecho C1	2,4	0,2	22,9	0,3	0,3	10,2	0,0	0,0	4,7	40,98	82,08	49,9%									
Trecho C2	29,1	0,3	49,0	0,5	8,2	10,2	0,0	0,0	48,9	146,26	195,20	74,9%									
Trecho C3	47,8	0,3	66,3	0,8	13,3	10,2	0,0	0,0	79,6	218,29	290,36	75,2%									
Trecho C4	53,5	0,3	74,3	0,4	14,5	10,2	0,0	0,0	91,4	244,77	320,71	76,3%									
Trecho B	41,5	0,4	62,4	0,6	10,8	10,2	0,0	0,0	71,3	197,30	268,46	73,5%									
Trecho G1	55,5	0,3	77,7	0,5	14,3	10,2	0,0	0,0	95,9	254,38	331,08	76,8%									
Trecho I1	25,8	0,2	47,2	0,5	8,5	10,2	0,0	0,0	46,0	139,51	203,48	68,6%									
Trecho I2	27,2	0,3	47,2	0,7	7,7	10,3	0,0	0,0	47,4	140,87	203,72	69,1%									
Trecho I3	38,7	0,3	58,5	0,5	13,1	10,2	0,0	0,0	65,7	187,06	258,08	72,5%									
Trecho I4	38,2	0,3	59,8	0,6	11,2	10,3	0,0	0,0	67,1	187,48	256,53	73,1%									
Trecho G2	61,0	0,4	83,4	0,6	15,8	10,2	0,0	0,0	105,7	209,73	279,30	75,1%									
Trecho H1	51,3	0,2	70,6	0,6	16,2	10,2	0,0	0,0	85,6	262,53	340,15	77,2%									
Trecho H2	49,7	0,2	71,8	0,6	14,7	10,2	0,0	0,0	87,5	277,12	353,01	78,5%									
Trecho H3	63,3	0,4	82,9	0,5	19,9	10,2	0,0	0,0	105,5	291,52	365,87	79,7%									
Trecho H4	61,9	0,3	83,2	0,5	18,5	10,2	0,0	0,0	108,9	212,39	284,71	74,6%									
I = início	Escala											Fase 1 =	61,6%								
M = Médio	0	6,6	13	19,8	26	32,9	40	46,1	53	59,3	66	72,4	79	85,6	92	98,8	105	111,9	119	Fase 2 =	73,3%
F = Fim	Mínimo											Maximo	Fase 3 =	77,0%							
													Total =	67,9%							

Figura 72: tempo de espera - cenário 3B do empreendimento N2

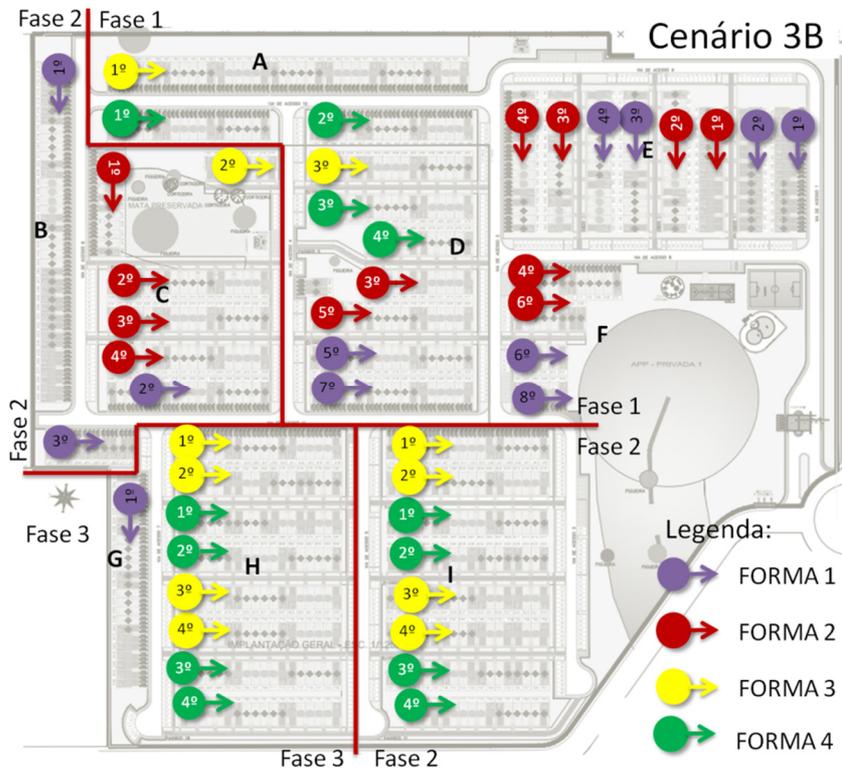


Figura 73: disposição final do cenário 3 do empreendimento N2

A Tabela 6 apresenta a duração final do cenário 3, a qual é menor que os cenários 1 (35 meses) e 2 (33 meses).

Cenário	Nº de concretagens por frente de trabalho				Início Média - Desvio (dias)	Término Média - Desvio (dias)	Duração (meses)	
	1	2	3	4				
3	Fase 1	56	54	29	33	08/04/2013 0 - 0	28/07/2014 337,31 - 4,74	16
	Fase 2	33	33	40	36	11/06/2013 46,85 - 1,1	29/01/2015 473,22 - 5,52	20
	Fase 3	-	-	36	36	10/09/2013 111,09 - 2,01	05/05/2015 541,60 - 5,12	20
	Total	89	87	105	105	08/04/2013	05/05/2015	26

Tabela 6: resultado do cenário 3 do empreendimento N2

### 5.4.3 Considerações sobre o Estudo Empírico 3

Neste terceiro estudo foi possível aplicar a utilização conjunta da modelagem 4D e de SED desde o início do estudo, explorando os ganhos que a modelagem de sistemas podem trazer as decisões do sistema de produção.

Como apresentado também nos dois primeiros estudos, a primeira etapa de elaboração do PSP no EE3 foi a definição do sistema. Essa definição é realizada através das ferramentas de diagrama de precedência e planilha de pré-dimensionamento dos recursos para a unidade base utilizadas por Schramm (2004). Essa composição de decisões formalizadas pelas ferramentas pode ser comparada a primeira etapa da modelagem de simulação apresentada por Law e McComas (1991), a qual se refere a coleta de dados e definição do modelo conceitual do sistema a ser modelado. Dessa forma com a definição do sistema através do diagrama de precedência e planilha de pré-dimensionamento da unidade base, é possível definir como será realizada a modelagem de SED.

Entretanto, esta primeira definição é determinística, ou seja, não considera a variabilidade do sistema de produção. Por esse motivo, no EE3 foi realizada também uma validação dessas ferramentas representativas do modelo conceitual através dos fluxos de trabalho modelados na SED e representados por um gráfico de histograma e o modelo 4D da unidade base. Essa validação externa permite uma maior confiança da equipe de produção nos pressupostos adotados no modelo de simulação.

Analisando o desenvolvimento da tomada de decisão dos empreendimentos N1 e N2, é possível observar que a utilização da modelagem 4D foi mais facilmente interpretada pela equipe de produção dos empreendimentos, mas sempre necessitavam de outros recursos para a tomada de decisão. Isso pode ser percebido pela própria descrição das decisões tomadas quando foi realizada a análise do empreendimento como um todo. Mesmo com a utilização da modelagem 4D para mostrar os dados de saída de cada cenário, quase sempre se fez necessária a utilização de gráfico para identificar precisamente o fluxo de trabalho das equipes ou datas de execução, já que a modelagem 4D não permite a identificação desses dados de forma direta.

O EE3 apresentou os benefícios discutidos por Schultz e Sullivan<sup>34</sup> (1972 *apud* WILLIAMS, 2002) e Williams (2002), os quais são: (a) confrontação, através do diagrama de precedência e planilha de pré-dimensionamento inicial obtida do cronograma inicial do empreendimento N1 e os resultados da simulação da unidade base; (b) explicação, através do detalhando de forma estruturada do modelo conceitual do sistema construtivo; (c) envolvimento, diálogo e aprendizado da equipe de produção dos empreendimentos com os resultados dos dois estudos, sempre analisando os resultados e propondo novas análises.

Durante a elaboração do estudo observou-se uma melhora na utilização conjunta da SED e 4D durante o processo de elaboração do PSP. Isso ocorreu devido a duração maior do EE3 (dezembro de 2012 a maio de 2013) comparado ao EE2 (agosto a setembro de 2012). Também houve uma melhora nas durações de modelagem. Enquanto no EE2 houve um esforço de 79 horas de modelagem o EE3 71,5 horas, sendo contabilizadas as horas: (a) da unidade base 29,5 horas; (b) do empreendimento N1, 19 horas; e (c) do empreendimento N2, 23 horas. O Quadro 19 apresenta o esforço de modelagem de forma detalhada.

Durante o EE 3, os envolvidos na tomada de decisão tinham interesse no comportamento das frentes de trabalho conforme os cenários simulados. Apenas as informações validadas da unidade base, foram incorporadas pela empresa. Os fluxos discutidos para cada equipe, não o foram.

---

<sup>34</sup> SCHULTZ, R. L.; SULLIVAN, E. M. Developments in simulation in social and administrative science. In: **Simulation in social and administrative science: overviews and case examples** (ed. HK Guetzkow). Prentice-Hall: Englewood Cliff, NJ. 1972.

Etapas	Duração
<b>Simulação da unidade base</b>	<b>12 horas</b>
✓ preparação das planilhas	4 horas
✓ sequência de execução das atividades	8 horas
<b>Simulação do empreendimento N1</b>	<b>10 horas</b>
✓ preparação das planilhas	4 horas
✓ replicação da sequência em quadras	6 horas
<b>Simulação do empreendimento N2</b>	<b>8 horas</b>
✓ preparação das planilhas	4 horas
✓ reutilização do modelo N1 em frentes de trabalho	4 horas
<b>BIM da unidade base</b>	<b>15 horas</b>
✓ arquitetônico ( <i>radier</i> , paredes, cobertura)	5 horas
✓ elétrico e hidráulico	10 horas
<b>4D da unidade base</b>	<b>2,5 horas</b>
✓ criação da propriedade <i>Identity Data</i>	2 horas
✓ conexão entre atividades e recursos	0,5 horas
<b>4D do empreendimento N1</b>	<b>9 horas</b>
✓ replicação das casas	4 horas
✓ conexão entre atividades e recursos	5 horas
<b>4D do empreendimento N2</b>	<b>15 horas</b>
✓ replicação das casas	8 horas
✓ conexão entre atividades e recursos	7 horas

Quadro 19: durações da modelagem SED, BIM e 4D por etapa no EE3

A Figura 74 apresenta de forma resumida como foram elaboradas as etapas de modelagem do sistema de produção do estudo empírico 3, existindo algumas diferenças com relação ao EE2. Existe uma melhora na utilização do modelo BIM, já que o mesmo já define as atividades por elementos antes de ser inserido do Syncho. Esta definição de propriedades no IFC permitiu a eliminação da reorganização dos elementos dentro do modelo 4D, que no EE2 demorou 8 horas para ser concluído.

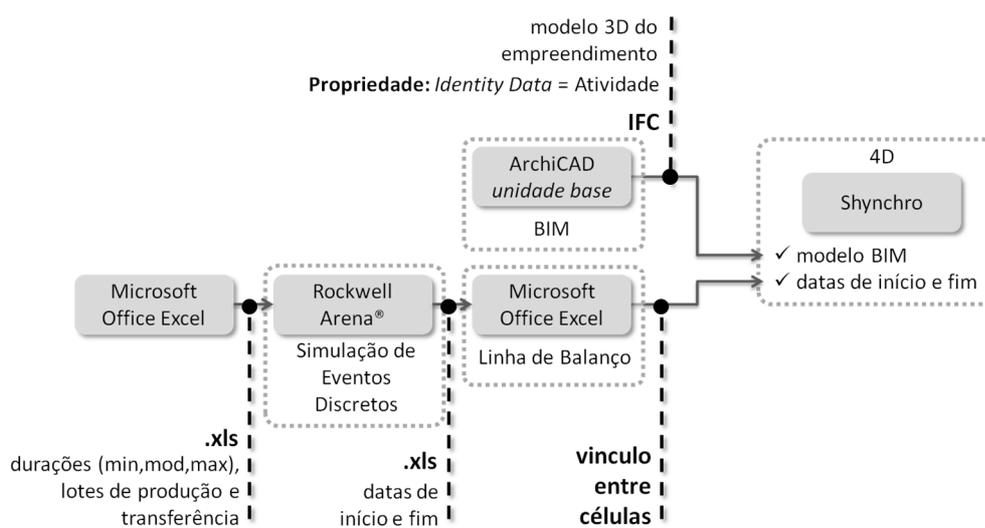


Figura 74: etapas de modelagem do EE3

## 5.5 MÉTODO PARA MODELAGEM E PROJETO DO SISTEMA DE PRODUÇÃO

O método final de modelagem e projeto do sistema de produção envolve com três diferentes tipos de modelos: o conceitual, o de simulação de eventos discretos e o modelo 4D. O **modelo conceitual** é composto por: diagrama de precedência e planilha de pré-dimensionamento da capacidade dos recursos, também utilizados nos trabalhos de Biotto (2012), Rodrigues (2006) e Schramm (2004 e 2009), e o modelo BIM. O detalhamento dos elementos construtivos no modelo BIM facilita a compreensão e entendimento do sistema de produção a ser estudado, auxiliando, assim, na formalização do modelo conceitual. Por esse motivo este deve ser modelado em paralelo com as outras definições do modelo conceitual, ou seja, o diagrama de precedência e planilha de pré-dimensionamento da capacidade dos recursos. Já o **modelo de simulação de eventos discretos** apresenta: planilhas eletrônicas de entrada e saída de dados e a lógica de programação do modelo. Por fim, o **modelo 4D** é constituído de um modelo BIM, com informações sobre as atividades em IFC, o plano de execução do empreendimento e equipamentos temporários de construção (andaimes, caminhões, etc.).

A Figura 75 apresenta o método final de modelagem e projeto do sistema de produção. O mesmo apresenta as etapas de projeto definidas por Schramm (2004) na parte superior, separadas pelas duas unidades de análise, a unidade base e empreendimento. Na parte inferior da Figura 75 são apresentadas as etapas de modelagem do sistema de produção. Todas as decisões tomadas com o projeto e modelagem do sistema de produção é realizada de forma iterativa, sendo representadas pelos fluxos de informações nos dois sentidos.

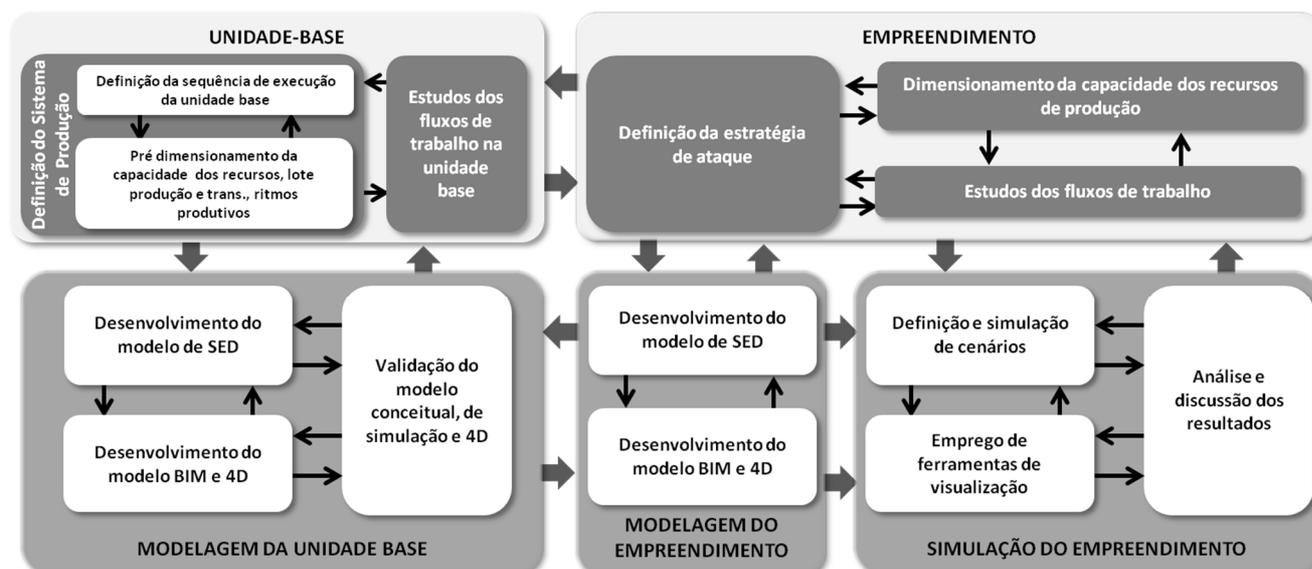


Figura 75: proposta final de método de modelagem e projeto do sistema de produção

A modelagem da unidade base compreende as atividades de desenvolvimento dos modelos de SED, BIM e 4D e a validação conjunta destas. Mas esse desenvolvimento dos modelos só pode iniciar após a definição do sistema de produção, o que compreende as duas primeiras etapas do projeto do sistema de produção. Logo ao final da modelagem, se faz necessária uma validação externa e conjunta dos três modelos: (a) conceitual, que é composto por documentos de representação do sistema de produção (diagrama de precedência, planilha de pré-dimensionamento da capacidade); (b) de SED; (c) e 4D. Nesta validação são avaliadas as etapas de execução representadas nesses diferentes modelos e estudado os fluxos de trabalho da unidade base através da simulação do modelo de SED e 4D – esta última representando os resultados da SED.

Já na modelagem do empreendimento ocorre o desenvolvimento dos modelos de SED e 4D para a totalidade do canteiro de obras. Nessa etapa é importante utilizar as considerações sobre as estratégias de execução do empreendimento e a repetição da unidade base. Dessa forma, se a unidade de repetição do empreendimento são casas, a lógica de programação da SED e modelo do produto da casa devem ser replicados na quantidade necessária para compor o canteiro de obras. As estratégias de execução podem interferir na repetição da unidade base em quadras do empreendimento ou em frentes de trabalho, como descrito do EE3.

Em seguida são definidas as alternativas de PSP para o sistema de produção, simuladas na SED, visualizadas em ferramentas de visualização. Dessa forma, são estudados os fluxos de trabalho, fluxos do produto, dimensionamento da capacidade e estratégias de execução do empreendimento. Conforme a comparação entre as alternativas, decisões são tomadas e novos

---

Método para integração da simulação de eventos discretos e modelagem 4D no projeto do sistema de produção de empreendimentos habitacionais de interesse social.

cenários podem ser simulados, assim como a modelagem do sistema de produção vai auxiliando as definições e confirmações de decisões do projeto do sistema de produção.

Já que este trabalho se propõe a modelar o sistema de produção através da SED e também utilizando BIM 4D, pode-se perceber que existe uma iteratividade entre estes processos de modelagem. Dessa forma, uma contribuição deste estudo refere-se a estruturar esse processo, definindo os pontos de validação dos modelos com o sistema real. Por esse motivo, o método final deve ser utilizado em conjunto com a estruturação das etapas de modelagem. A Figura 76 apresenta as etapas de simulação, definidas por Law e Kelton (1991), como caminho central de modelagem e as etapas do 4D, definida por (EASTMAN et al., 2011), de forma paralela. As duas modelagens são realizadas de forma iterativa, já que erros e incoerências de modelagem podem ocorrer no desenvolvimento dos dois modelos e acarretar modificações. Para construir este diagrama de utilização conjunta da SED e 4D foi necessário criar três novas etapas: (a) definição das atividades de cronograma; (b) modelo de simulação; e (c) visualização da simulação piloto com auxílio do 4D.

O acréscimo de definição das atividades de cronograma foi necessário, pois, diferentemente das etapas propostas por Eastman *et al.* (2011), que apresentam o plano da construção já consolidado no início da modelagem 4D, na utilização conjunta da SED e 4D essa definição se faz necessária e em conjunto com a definição do modelo conceitual. A etapa do modelo de simulação foi inserida para identificar quando o modelo está consolidado e pronto para ser validado, sendo realizado de forma conjunta com o modelo 4D. Já a etapa de visualizar simulações piloto com o auxílio do 4D foi inserida para consolidar a validação conjunta dos modelos de SED e 4D. O restante das etapas apresentam as mesmas características apresentadas por Law e Kelton (1991) e Eastman *et al.* (2011),.

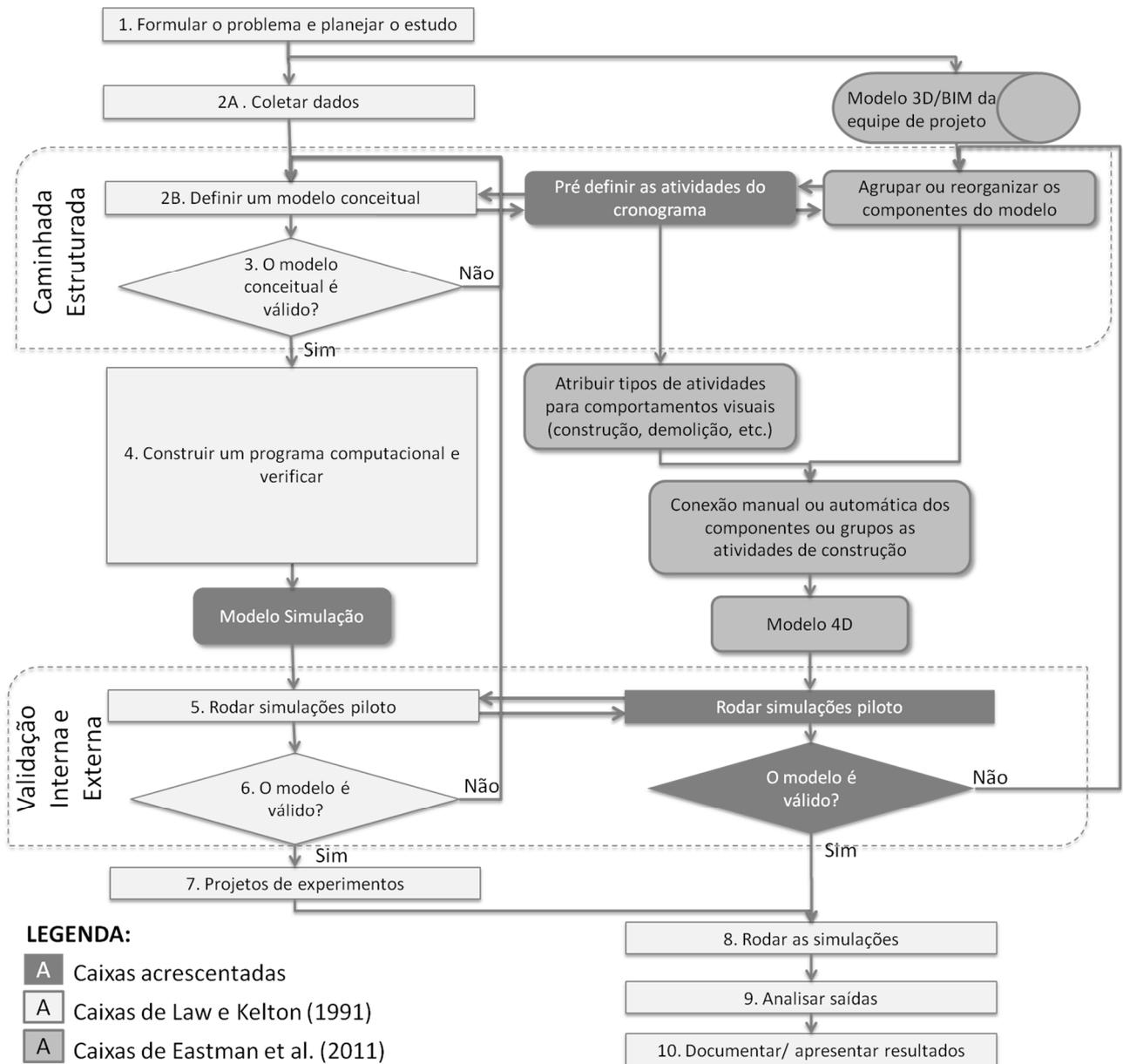


Figura 76: etapas de modelagem de sistemas de produção

A caminhada estruturada apenas foi utilizada no estudo empírico 1, no qual foi realizada uma separação de elementos BIM, de acordo com as atividades de construção, e, com as imagens desses grupos de elementos, foram coletados dados de durações e equipes, sendo também validada a sequência de atividades. Esta caminhada estruturada é descrita por Law e Kelton (1991) como uma forma de validação do modelo conceitual e durante o EE1, o modelo BIM auxiliou na formalização dessa validação.

Já a validação interna é realizada logo após a construção dos modelos de SED e 4D, com a participação apenas do modelador. Esta é iterativa, sempre observando a lógica do programa de simulação, através da animação do próprio Arena, relatórios de saída de dados, linha de balanço e visualização do modelo 4D. Este foi descrito em detalhe no EE1 e utilizado também Método para integração da simulação de eventos discretos e modelagem 4D no projeto do sistema de produção de empreendimentos habitacionais de interesse social.

nos estudos 2 e 3. Nesta validação interna não é necessária a verificação de toda a lógica do modelo de SED. Apenas com a visualização final do 4D ou da linha de balanço (com os dados de saída do modelo de SED) é possível observar alguma inconsistência na sequência de execução, por exemplo, e identificar erros ao longo do modelo de simulação ou modelo 4D.

Por fim, a validação externa é realizada logo após o fim da validação interna. Esta é realizada com a equipe de produção e planejamento do empreendimento em estudo e foi descrita em detalhe no EE3 para a unidade base do empreendimento. Com o modelo de simulação já validado internamente, é possível inserir as durações coletadas durante a concepção do modelo conceitual, simulá-lo e validar com a equipe através de imagens ou vídeos 4D, linha de balanço e gráficos de histograma.

### **5.5.1 Avaliação do Método Proposto**

Nesse item, os resultados desta pesquisa foram analisados por meio dos constructos de utilidade e facilidade de uso.

#### **5.5.1.1 Utilidade**

O constructo utilidade foi avaliado em relação à contribuição do emprego da modelagem de SED e 4D na melhoria da tomada de decisão do PSP. Dessa forma, este foi avaliado através do aumento da comunicação e utilização das informações na tomada de decisão.

Quanto ao **aumento da comunicação e entendimento das decisões entre os participantes** pode-se afirmar que o método foi útil, pois apresentou diferentes ferramentas de visualização (diagrama de precedência, plano de ataque, histograma, gráfico de número de concretagens, linha de balanço, gráfico de sequenciamento, gráfico de tempo em espera, gráfico de sincronia e modelo 4D), as quais representam o sistema de produção do empreendimento, de forma a obter um entendimento comum a todos participantes. Assim, a comunicação entre os mesmos pode ser facilitada, permitindo que estes compreendam as conexões existentes entre as decisões tomadas acerca do sistema produtivo.

Isto foi verificado no EE2, quando foi realizada a análise da atividade de contrapiso. Com as alternativas de lote de produção da atividade de contrapiso foi possível visualizar na linha de balanço o impacto do tempo em espera. Já durante o EE3 muitas foram as oportunidades de aumento da comunicação através das ferramentas de visualização utilizadas. Logo no início do estudo, o diagrama de precedência modificou o sequenciamento das atividades do sistema de

produção que já era muito utilizado pela empresa. Durante a análise dos empreendimentos N1 e N2, as comparações entre cenários era sempre realizada pelas ferramentas de visualização, como modelo 4D, gráficos de sincronia e linha de balanço.

Dessa forma, colaborando com a estruturação do PSP apresentado inicialmente por Schramm (2004), o Quadro 20 apresenta um resumo das decisões e ferramentas que as auxiliam, incorporando as representações gráficas utilizadas neste trabalho. Pode-se observar que muitas ferramentas foram utilizadas para apresentar e discutir cada cenário, sempre representando o resultado do modelo de SED. As ferramentas que foram acrescentadas em comparação ao trabalho de Schramm (2004) foram: apresentações sobre PSP e SED; 4D da unidade base e empreendimento; dados históricos de durações; e gráfico de tempo em espera.

Unidade de Análise	Etapa do PSP	Ferramenta Utilizada
Unidade base	Definição da Sequência de Execução e Pré Dimensionamento dos Recursos	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ apresentação sobre PSP</li> <li>✓ diagrama de precedência</li> <li>✓ planilha de pré-dimensionamento de recursos</li> </ul>
	Estudo de Fluxos de Trabalho	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ apresentação sobre SED</li> <li>✓ diagrama de precedência</li> <li>✓ planilha de pré-dimensionamento de recursos</li> <li>✓ histograma</li> <li>✓ 4D da unidade base</li> <li>✓ banco de dados históricos de durações de atividades da empresa estudada</li> </ul>
Empreendimento	Definição da Estratégia do Empreendimento, Estudos dos Fluxos de Trabalho, Dimensionamento da Capacidade dos Recursos e Projeto de Processos Críticos	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ plano de ataque do empreendimento</li> <li>✓ plano de ataque</li> <li>✓ histograma total</li> <li>✓ gráfico de nº de concretagens</li> <li>✓ linha de balanço</li> <li>✓ gráfico de sequenciamento</li> <li>✓ gráfico de tempo em espera</li> <li>✓ gráfico de sincronia</li> <li>✓ 4D do empreendimento</li> </ul>

Quadro 20: resumo das decisões, ferramentas e participantes da Modelagem e Projeto do Sistema de Produção

Quanto à **utilização das informações provenientes da modelagem do sistema de produção na tomada de decisão** foram avaliados as principais decisões tomadas e o número de informações para a tomada de decisão. As principais decisões tomadas no EE3 foram quanto a necessidade de frentes de trabalho considerando restrições de custo e prazo dos empreendimentos. Dessa forma foi possível observar através das diferentes ferramentas de visualização como cada uma dessas frentes paralelas se comportavam, compreendendo melhor

o sistema de produção. A Figura 77 apresenta o número de informações para a tomada de decisão através da quantificação do número de cenários simulados e registro de solicitação de novos cenários.

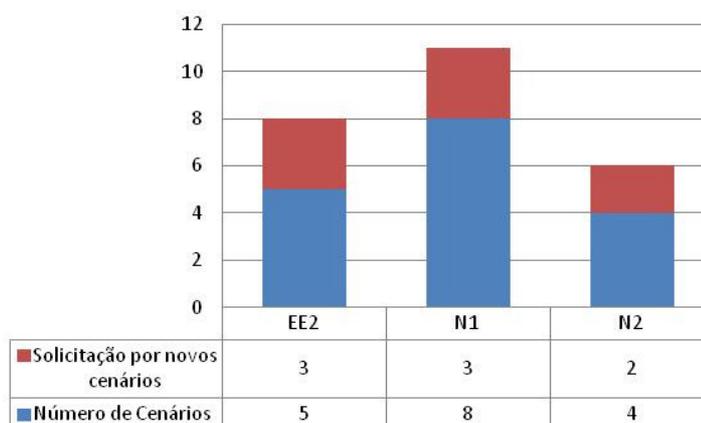


Figura 77: número de cenários simulados e solicitações por novos cenários

#### 5.5.1.2 Facilidade de Uso

O constructo facilidade de uso foi avaliado quanto à participação das pessoas no processo de modelagem do sistema de produção, à transparência das informações no processo e a eficiência do método de modelagem do sistema de produção.

Dessa forma, quanto à **integração dos participantes no processo de modelagem** foi possível observar que houve o envolvimento das equipes de produção do empreendimento nesse processo, a partir do momento em que todos debatiam conjuntamente as necessidades financeiras e logísticas que cada nova alternativa do sistema de produção iria impactar.

NoEE2, houve evidências de que isto ocorreu, já que participavam das reuniões o diretor, o engenheiro da obra ea empresa de consultoria de planejamento. A cada nova ideia de alternativa do sistema de produção, os participantes se manifestavam apontando possíveis consequências para o sistema produtivo a partir de seu ponto de vista.

No EE3, por sua vez, participaram das reuniões o gerente de planejamento, o coordenador da obra o engenheiro de obra e a engenheira de planejamento da empresa. Nestas reuniões os participantes debateram sobre as opções de estratégias de ataque, as restrições financeiras, a disponibilidade de mão de obra, e decidiram conjuntamente diversas questões referentes ao PSP, compreendendo a inter-relação das decisões que afetam a produção. Também é importante salientar que as ferramentas utilizadas para a definição do modelo conceitual e as implantações

para a construção do plano de ataque eram utilizadas diretamente pelo coordenador da obra e engenheiro, demonstrando a participação dos mesmos no processo de modelagem.

Quanto à **transparência das informações no processo**, foi identificada nas entrevistas realizadas no EE3 com a equipe de produção do empreendimento uma agilidade de interpretação dos dados, facilidade de trocar experiências através da comunicação das ferramentas e facilidade de explicar os pressupostos do sistema de produção. Houve um interesse dos participantes do EE3 em continuar o uso do PSP, da simulação e ferramentas de visualização. Entretanto foi apontado à dificuldade de implementação das inovações no processo gerencial da empresa, como a necessidade de treinamento da equipe, custos de aquisição e mudança nos processos gerenciais.

O registro do tempo despendido nas modelagens na Figura 78, para a avaliação do método quanto à **eficiência do método de modelagem**. Dessa forma, conforme o andamento e testes das diferentes ferramentas de modelagem 4D, os tempos de modelagem e etapas de modelagem foram reduzindo, tornando o método proposto mais fácil de ser utilizado.

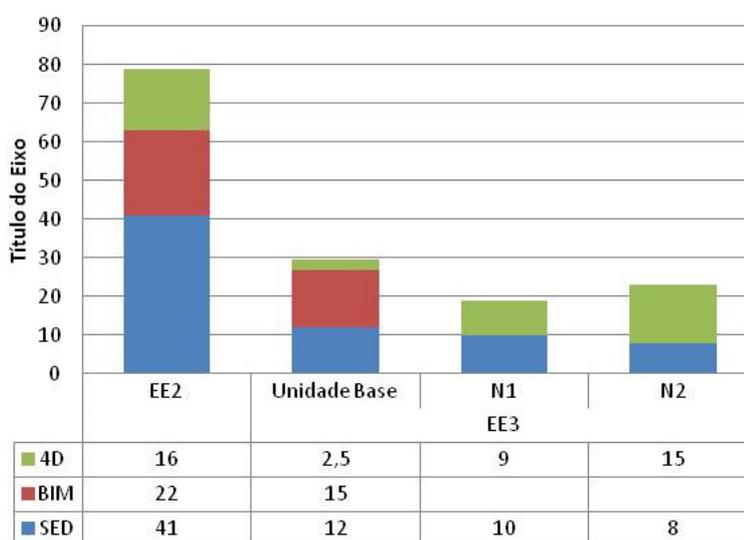


Figura 78: gráfico dos tempos de modelagem

## 6. CONCLUSÕES

Este trabalho teve o objetivo geral de propor um método para a elaboração do Projeto do Sistema de Produção em empreendimentos habitação de interesse social com o uso da modelagem de sistemas, através de simulação de eventos discretos e BIM 4D.

Com base em uma revisão de literatura nas áreas de projeto do sistema de produção e modelagem de sistemas de produção, o desenvolvimento deste trabalho ocorreu em três fases: exploratória, de desenvolvimento e de consolidação. Baseado no escopo de pesquisa, optou-se pela *design science research* como a estratégia de pesquisa deste trabalho, já que, entre outros motivos, a elaboração do PSP lida com a construção de um plano que tem como objetivo contribuir para a gestão do empreendimento estudado, ou seja, seu foco incide sobre um problema real e de relevância prática para a empresa.

A fase exploratória consistiu da análise e seleção dos *softwares* de simulação, BIM e 4D e de dois estudos exploratórios. O primeiro focado na avaliação da integração entre os *softwares* e o segundo focado no projeto de processos críticos, uma das etapas do PSP. A fase de desenvolvimento consistiu na elaboração do PSP para os empreendimentos da empresa N. Esta elaboração consistiu na avaliação do sistema de produção e elaboração das etapas do PSP com a utilização integrada das ferramentas de SED e modelagem 4D. A fim de avaliar os resultados da fase de desenvolvimento foram estabelecidos dois constructos para avaliação do processo: utilidade e facilidade de uso. Estes constructos, por sua vez, foram desdobrados em subconstructos, que foram avaliados a partir de evidências obtidas através de múltiplas fontes de evidência, ou variáveis, diretamente mensuráveis.

Por se tratar de uma pesquisa construtiva, dois tipos de contribuição eram esperados: a contribuição teórica e a contribuição prática relacionadas ao objetivo geral deste trabalho. A contribuição teórica deste trabalho ao avanço do conhecimento, diz respeito ao refinamento do modelo de elaboração do PSP na construção civil, uma atividade gerencial pouco explorada na prática do setor, como academicamente, tendo em vista o pequeno número de trabalhos já publicados. Ainda, mas não dissociada da primeira contribuição, houve a melhor compreensão acerca dos benefícios e dificuldades do emprego da simulação e sua aplicabilidade como uma ferramenta do PSP. De forma mais ampla, este trabalho procurou contribuir para um melhor entendimento acerca dos sistemas de produção da construção civil e para a consolidação do

PSP como um processo gerencial neste setor. Do ponto de vista prático, considera-se que este trabalho se constitui em uma contribuição não só para as empresas construtoras que participaram dos estudos, podendo ser adaptado ao contexto específico de outras empresas e empreendimento.

O primeiro objetivo específico consistiu em “identificar em quais decisões do PSP os modelos 4D podem auxiliar na visualização dos resultados da simulação computacional e na tomada de decisão”. De uma forma geral, a modelagem 4D auxiliou na: (a) validação dos modelos de SED; (b) como síntese dos resultados no EE2; e (c) na representação de frentes das trabalho do EE3 através do fluxo do produto. Entretanto, foi evidenciado ao longo dos estudos empíricos que apenas a modelagem 4D não representava a totalizada dos resultados da simulação e, conseqüentemente, outras ferramentas gráficas foram elaboradas para suprir essa necessidade.

Já o segundo objetivo específico consistiu em “definir procedimentos de desenvolvimento e utilização os modelos 4D e de simulação durante a elaboração do PSP”. Para este objetivo, foi elaborada uma segunda estruturação das etapas de modelagem. Esta etapa de modelagem seguiu a estruturação da modelagem de simulação de Law e Kelton (1991) a as etapas de modelagem 4D de Eastman *et al.* (2011). Dessa forma, foram estruturadas as etapas de modelagem de acordo com as validações necessárias para a utilização conjunta da SED e 4D durante a elaboração do PSP.

Com relação ao método, foram propostas duas etapas de elaboração. A primeira condiz com as etapas de elaboração do PSP proposta por Schramm (2009) e a segunda a modelagem do sistema de produção que compreende as modelagens BIM, 4D e de SED, assim como a simulação de novas alternativas de produção, análise e tomada de decisão. Dessa forma, o modelo proposto avança com relação ao apresentado por Schramm (2009), já que o mesmo trabalha com uma gama maior de ferramentas de visualização das informações do sistema de produção.

Já quanto à avaliação do método proposto, foram utilizados dois constructos principais, utilidade e facilidade de uso. Quanto à utilidade, foi discutido o papel de novas ferramentas para auxiliar o aumento da comunicação e entendimento das decisões, tais como: modelo BIM 4D da unidade base e empreendimento; dados históricos de durações; e gráfico de tempo em espera. Quanto ao constructo facilidade de uso, emergiram discussões quanto: à integração dos participantes, já que os envolvidos discutiam conjuntamente necessidades financeiras e de

logística de cada cenário; à transparência do processo de tomada de decisão; e à redução dos tempos de modelagem.

## 6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos estudos realizados, apresenta-se as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- a) avaliar e refinar o modelo proposto a partir da sua aplicação em outros tipos de empreendimentos e contextos, principalmente em empreendimento complexos sem a definição clara da unidade de repetição;
- b) implementar o método proposto nesta pesquisa em uma empresa construtora que já domine a tecnologia BIM ou 4D, para que o emprego da SED durante o PSP possa ser avaliado e refinado;
- c) avaliar como as decisões do PSP podem ser beneficiadas com deferentes níveis de detalhamento dos modelos de SED e BIM/4D.

## REFERÊNCIAS

- ABOURIZK, S. M.; HAGUE, S. An Overview of the COSYE Enviroment for Construction Simulation. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2009, Texas. **Proceedings...**Austin, USA: WSC, 2009. p. 2624-2634.
- ABOURIZK, S. M.; HALPIN, D. W.; LUTZ, J. D. State of the Art in Construction Simulation. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1992, Arlington. **Proceedings...** Arlington, VA: WSC, 1992
- ALVES, T. C. L. **Buffering Practices in HVAC Ductwork Supply Chains**. 2005. Dissertation (Doctor of Philosophy) - Civil and Environmental Engineering, Universidade of California, Berkeley.
- ALVES, T. C. L.; TOMMELEIN, I. D.; BALLARD, G. Simulation as a Tool for Production System. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL GROUP FOR LEAN CONSTRUCTION, 14, 2006, Chile. **Proceedings...** Santiago: IGLC, 2006. p. 341-353.
- ASKIN, R. G.; GOLDBERG, J. B. **Design and Analysis of Lean Production Systems**. New York: John Wiley & Sons, 2002.
- BACCARINI, D. The concept of project complexity a review. **International Journal of Project Management**, v. 14, n. 4, 1996. p. 201–204.
- BALLARD, G. The Last Planner. In: SPRING CONFERENCE OF THE NORTHERN CALIFORNIA CONSTRUCTION INSTITUTE, 6., 1994, USA. **Proceedings...** Monterey, CA: LCI, 1994. Disponível em: <[http://www.leanconstruction.dk/media/18187/The\\_Last\\_Planner\\_.pdf](http://www.leanconstruction.dk/media/18187/The_Last_Planner_.pdf)> Acessado em: 22 novembro 2014.
- BALLARD, G. Lean project delivery system. **White Paper 8 - International Group for Lean Construction**, 2000a.
- BALLARD, G. Phase Scheduling. **White Paper 7 - International Group for Lean Construction**, 2000b.
- BALLARD, G. et al. Production System Design: Work Structuring Revisited. **White Paper 11 - International Group for Lean Construction**, 2001a.
- BALLARD, G. et al. Production System Design in Construction. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL GROUP FOR LEAN CONSTRUCTION, 9. 2001, Singapore. **Proceedings...** Singapore: IGLC, 2001b.
- BALLARD, G.; HOWELL, G. What kind of production is construction? In: ANNUAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL GROUP FOR LEAN CONSTRUCTION, 6. 1998, Brazil. **Proceedings...** Guarujá, Brazil: IGLC, 1998.
- BASHFORD, H. H. et al. Implications of Even Flow Production Methodology for U.S. Housing Industry. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 129, n. 3, may/jun., 2003. p. 330-337.
- BELL, P. C. et al. Decision-makers' perceptions of the value and impact of visual interactive modelling. **Omega**, v. 27, n. 2, apr., 1999. p. 155–165.
- BERNARDES, M. M. E S. **Desenvolvimento de um Modelo de Planejamento e Controle da Produção para Micro e Pequenas Empresas de Construção**. 2001. Tese (Doutorado em

Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BIOTTO, C. N. **Método de Gestão da Produção na Construção Civil com Uso da Modelagem BIM 4D**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BRASIL. **PAC 2**. Disponível em: <<http://www.pac.gov.br/minha-casa-minha-vida>>.

CHANG, D. Y. **A Resource Based Simulation Language for Construction Process Planning**. 1986. Dissertação (Doctor of Philosophy) - Civil Engineering Department, University of Michigan, Ann Arbor.

COLLINS ENGLISH DICTIONARY. **Collins Dictionary**. London: William Collins, 2013.

EASTMAN, C. et al. **BIM Handbook: a guide to building information modeling**. New Jersey: John Wiley and Sons, 2011.

ELDER, M. D. **Visual Interactive Modelling: Some Guidelines for its Implementation and Some Aspects of its Potential Impact on Operational Research**. 1992. Dissertação (Doctor of Management Science) - Department of Management Science, University of Strathclyde, Glasgow.

FERREIRA, J. S. W. **Produzir casas ou construir cidades? Defasios para um novo Brasil urbano. Parâmetros de qualidade ara a implementação de projetos habitacionais e urbanos**. São Paulo: FUPAM, 2012.

FISCHER, M.; HAYMAKER, J.; LISTON, K. Benefits of 3D and 4D Models for Facility Managers and AEC Service Providers. In: ISSA, R. A.; FLOD, I.; O'BRIEN, W. J. (Ed.). **4D CAD and Visualization in Construction: developments and applications**. Gainesville. USA: A. A. Balkema Publishers, 2003.

FORRESTER, J. W. **Industrial Dynamics**. Cambridge, MA: MIT Press, 1961.

FUKAI, D. Beyond Sphereland: 4D-CAD in Construction Communications. In: ISSA, R. A.; FLOD, I.; O'BRIEN, W. J. (Ed.). **4D CAD and Visualization in Construction: developments and applications**. Gainesville. USA: A. A. Balkema Publishers, 2003.

GAITHER, N.; FRAZIER, G. **Administração da Produção e Operação**. 8. ed. São Paulo: Thomson, 2005.

GIDADO, K. I. Project complexity: The focal point of construction production planning. **Construction Management and Economics**, v. 14, n. 3, may, 1996. p. 213–225.

GONZÁLEZ, V.; ALARCÓN, L. F.; MOLENAAR, K. Automation in Construction Multiobjective design of Work-In-Process buffer for scheduling repetitive building projects. **Automation in Construction**, v. 18, n. 2, 2009. p. 95–108.

HAJJAR, D.; ABOURIZK, S. M. SIMPHONY: an Environment for Building Special Purpose Construction Simulation Tools. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1999, USA. **Proceedings...** Phoenix, USA: WSC, 1999. p. 1907-1914.

HALPIN, D. W. **An Investigation of the Use of Simulation Networks for Modeling Construction Operations**. 1973. Dissertação (Doctor of Philosophy) - University of Illinois, Urbana-Champaign, Illinois.

HALPIN, D. W. **MicroCYCLONE user's manual**. Disponível em: <<https://engineering.purdue.edu/CEM/People/Personal/Halpin/Sim/MicroCYCLONE/Index.html>>. Acessado em: 9 jul. 2013.

- HOFSTEDE, G. The Poverty of Management Control Philosophy. **Academy of Management Review**, v. 3, n. 3, 1978. p. 450–461.
- HOLMSTROM, J.; KETOKIVI, M.; HAMERI, A.-P. Bridging Practice and Theory : A Design Science Approach. **Decision Sciences**, v. 40, n. 1, 2009. p. 65–88.
- HOPP, W. J.; SPEARMAN, M. L. **Factory Physics: foundation of manufacturing management**. New York: McGraw Hill, 2000.
- HUANG, R.-Y.; GRIGORIADIS, A. M.; HALPIN, D. W. Simulation of Cable-stayed Bridges Using DISCO. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1994, USA. **Proceedings...** Orlando, Florida: WSC, 1994. p. 1130-1136.
- HURRION, R. D. Visual interactive modelling. **European Journal of Operational Research**, v. 23, n. 3, março, 1986. p. 281–287.
- IOANNOU, P. G.; KAMAT, V. R. Intelligent Preemption in Construction of a Manmade Island for an Airport. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2005, USA. **Proceedings...**Orlando, USA: WSC, 2005. p. 1515-1523.
- IOANNOU, P. G.; MARTINEZ, J. C. Animation of Complex Construction Simulation Models. In: CONGRESS ON COMPUTING IN CIVIL ENGINEERING, 3., 1996, USA. **Proceedings...** Anaheim, California: ASCE, 1996.
- JACOBSEN, P. et al. Philosophy Regarding the Design of Production Systems. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 20, n. 6, 2002. p. 405–415.
- JAHANGIRIAN, M. et al. Simulation in manufacturing and business: A review. **European Journal of Operational Research**, v. 203, n. 1, may, 2010.
- KAM, C. et al. The product model and Fourth Dimension project. **Journal of Information Technology in Construction**, v. 8, n. IFC - Product models for the AEC arena, 2003. p. 137–166.
- KAMAT, V. R. **Enabling 3D Visualization of Simulated Construction Operations**. 2000. Thesis (Master of Science In Civil Engineering) - Department of Civil and Environmental Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- KAMAT, V. R.; MARTINEZ, J. C. 3D Visualization of Simulated Construction Operations. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2000, USA. **Proceedings...** Orlando, Florida: WSC, 2000. p. 1933-1937.
- KAMAT, V. R.; MARTINEZ, J. C. Comparison of simulation-driven construction operations visualization and 4D CAD. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2002, USA. **Proceedings...**San Diego, USA: WSC, 2002. p. 1765-1770.
- KAMAT, V. R.; MARTINEZ, J. C. Practical 3D animation of multiply articulated construction equipment. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2004, USA. **Proceedings...** Washington, USA: WSC, 2004. p. 1229-1237.
- KAMAT, V. R.; MARTÍNEZ, J. C. Enabling smooth and scalable dynamic 3D visualization of discrete-event construction simulations. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2001, USA. **Proceedings...** Arlington, USA: WSC, 2001. p. 1528-1533.
- KANKAINEN, J.; SEPPANEN, O. A Line of balance Based Schedule Planning and Control System. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL GROUP FOR LEAN CONSTRUCTION, 11, USA. **Proceedings...** Virginia, USA: IGLC, 2003.

- KEMMER, S. L.; HEINECK, L. F. M.; ALVES, T. C. L. Using the Line of Balance for Production System Design. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL GROUP FOR LEAN CONSTRUCTION, 16, United Kingdom. **Proceedings...**Manchester, UK: IGLC, 2008.
- KENLEY, R. Project Micromanagement: practical site planning and management of work flow. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL GROUP FOR LEAN CONSTRUCTION, 12, Denmark. **Proceedings...** Copenhagen, Denmark: IGLC, 2004.
- KIVINIEMI, A. The Effects of Integrated BIM in the Processes and Business Models. In: KOCATÜRK, T.; MEDJDOUB, B. (Eds.). **Distributed Intelligence in Design**. Hoboken, New Jersey: Wiley-Blackwell, 2011.
- KNAPP, S.; CHARRON, R.; HOWELL, G. Phase planning today. **Revista Ingeniería de Construcción**, v. 22, n. 3, 2007. p. 157–162.
- KÖNIG, M. et al. Intelligent BIM-based Construction Scheduling Using Discrete Event Simulation. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2012, Germany. **Proceedings...** Berlin, Germany: WSC, 2012. p. 662-673.
- KOO, B.; FISCHER, M. **Feasibility Study of 4D CAD in Commercial Construction**. Stanford: CIFE, 1998.
- KOO, B.; FISCHER, M. Feasibility study of 4D CAD in commercial construction. **Journal of construction engineering and management**, v. 126, n. 4, jul.,2000. p. 251–260.
- KOSKELA, L. **Application of the new philosophy to construction**. Finland: CIFE, 1992.
- KOSKELA, L. **An exploration towards a production theory and its application to construction**. 2000. Dissertation (Doctor of Technology) – Technical Research Center of Finland, Espoo.
- KOSKELA, L.; BALLARD, G. What should we require from a production system in construction? In: CONSTRUCTION RESEARCH CONGRESS, 2004, Hawaii, USA. **Proceedings...** USA: ASCE, 2003.
- KOSKELA, L.; HOWELL, G. Reforming Project Management: the role of planning, execution and controlling. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL GROUP FOR LEAN CONSTRUCTION, 8, United Kingdom. **Proceedings...** Brighton, UK.: IGLC, 2000.
- KOSKELA, L.; HOWELL, G. The underlying theory of project management is obsolete. In: PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE RESEARCH CONFERENCE, 2002, USA. **Proceedings...** Seattle, USA: PMI, 2002. p. 293-302.
- LAW, A. M.; KELTON, W. D. **Simulation Modeling and Analysis**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1991.
- LAW, A. M.; KELTON, W. D. **Simulation Modeling and Analysis**. 3. ed. New York: McGraw Hill, 2000.
- LAW, A. M.; MCCOMAS, M. Secrets of Successful Simulation Studies. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1991, USA. **Proceedings...** Phoenix. USA: WSC, 1991. p. 21-27.
- LEAN ENTERPRISE INSTITUTE. **Lean Lexicon: a graphical glossary for Lean Thinkers**. 4. ed. Cambridge, MA: LEI, 2008.

- LEINONEN, J. et al. New construction management practice based. In: ISSA, R. A.; FLOD, I.; O'BRIEN, W. J. (Ed.). **4D CAD and Visualization in Construction: developments and applications**. Gainesville. USA: A. A. Balkema Publishers, 2003.
- LI, H. et al. Optimizing construction planning schedules by virtual prototyping enabled resource analysis. **Automation in Construction**, v. 18, n. 7, nov. 2009. p. 912–918.
- LIU, L. Y.; IOANNOU, P. G. Graphical Object-Oriented Discrete-Event Simulation System. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1992, USA. **Proceedings...** Arlington, VA: WSC, 1992. p. 1285-1291.
- LUKKA, K. The Constructive Research Approach. In: OJALA, L.; HILMOLA, O.-P. (Ed.). **Case study research in logistics**. Finland: Publications of the Turku School of Economics and Business Administration, Series B1, 2003. p. 83–101.
- MARCH, S. T.; SMITH, G. F. Design and natural science research on information technology. **Decision Support Systems**, v. 15, n. 4, dec., 1995. p. 251–266.
- MARTINEZ, J. C. **STROBOSCOPE: State and Resource Based Simulation of Construction Processes**. 1996. Dissertation (Doctor of Philosophy) - Department of Civil and Environmental Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, USA.
- MARTINEZ, J. C.; IOANNOU, P. G. General-purpose Systems for Effective Construction Simulation. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 125, 1999. p. 265–276.
- MELHADO, S. B. **Qualidade do projeto na construção de edifícios: aplicação ao caso das empresas de incorporação e construção**. 1994. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- MELHADO, S. B.; FABRICIO, M. M. Projetos da Produção e Projetos para Produção na Construção de Edifícios: discussão e síntese de conceitos. Em: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 7. 1998. **Anais...** Florianópolis, SC: ENTAC, 1998.
- MEREDITH, J. R.; SHAFER, S. M. **Administração da Produção para MBAs**. Porto Alegre: Bookman, 2002.
- MOHSEN, O. M. et al. Simulation of Modular Building construction. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2008, USA. **Proceedings...** Miami, USA: WSC, 2008. p. 2471-2478.
- PIDD, M. **Computer Simulation in Management Science**. 5. ed. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2004.
- CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS. **Cambridge Dictionaries Online**. Disponível em: <<http://dictionary.cambridge.org/us>>. Acessado em: 9 nov. 2013.
- PRICE, S.; JOHN, P. The Status of Models in Defence Systems Engineering. In: PIDD, M. (Ed.). **Systems Modelling: theory and practice**. Chichester: John Wiley & Sons, 2004.
- RECK, R. H. **Aplicação do índice de boas práticas de planejamento em empresas construtoras da região metropolitana de Porto Alegre**. 2010. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- RILEY, D. The Role of 4D Modeling in Trade Sequencing and Production Planning. In: ISSA, R. A.; FLOD, I.; O'BRIEN, W. J. (Ed.). **4D CAD and Visualization in Construction: developments and applications**. Gainesville. USA: A. A. Balkema Publishers, 2003.

ROBINSON, S. **Simulation: The Practice of Model**. Chichester: John Wiley and Sons, 2003.

RODRIGUES, A. A. **O Projeto do Sistema de Produção no Contexto de Obras Complexas**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do sul, Porto Alegre.

RODRIGUES, L. H.; MACKNESS, J. R. Teaching the meaning of manufacturing synchronisation using simple simulation models. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 18, n. 3, 1998. p. 246–259.

SAFFARO, F. A.; PAULA, E. C. P. Formulatin the work flow plan for horizontal projects - case study. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL GROUP FOR LEAN CONSTRUCTION, 10, 2002 Brazil. **Proceedings...** Gramado, Brazil: IGLC, 2002.

SAWHNEY, A. et al. Agent-based Modeling and Simulation in Construction. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2003, USA. **Proceedings...** New Orleans, USA: WSC, 2003. p. 1541-1547.

SCHERER, R.; ISMAIL, A. Process-base Simulation Library for construction Project Planning. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2011, USA. **Proceedings...** Arizona, USA: WSC, 2011. p. 3493-3504.

SCHRAMM, F. K. **O Projeto do sistema de Produção na Gestão de Empreendimentos Habitacionais de Interesse Social**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do sul, Porto Alegre.

SCHRAMM, F. K. **Projeto de Sistemas de Produção na Construção Civil Utilizando Simulação Computacional como Ferramenta de Apoio à Tomada de Decisão**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do sul, Porto Alegre.

SCHRAMM, F. K.; COSTA, D. B.; FORMOSO, C. T. O projeto do sistema de produção na gestão de empreendimentos habitacionais de interesse social. **Ambiente Construído**, v. 6, n. 2, 2006. p. 59–74.

SHI, J. J. Activity-Based Construction (ABC) Modeling and Simulation Method. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 125, n. 5, 1999. p. 354–360.

SHI, J. J.; ZENG, S. X.; TAM, C. M. Modeling and Simulation of Public Housing Construction in Hong Kong. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1998, USA. **Proceedings...** Washington, USA: WSC, 1998. p. 1305-1310.

SHI, J. J.; ZHANG, H. Iconic Animation of Construction Simulation. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1999, USA. **Proceedings...** Phoenix, USA: WSC, 1999. p. 992-997.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Operations Management**. 5 ed. Harlow, England: Prentice Hall, 2007.

SOUZA, A. L. R. DE; MELHADO, S. B. **O projeto e a qualidade das lajes de concreto armado de edifícios**. São Paulo: Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP/169, 1996.

SOUZA, A. L. R. DE; MELHADO, S. B. O “ projeto para produção ” como ferramenta de gestão da qualidade : aplicação às lajes de concreto armado de edifícios. **PINI Web**, set., 1998. Disponível em: <<http://piniweb.pini.com.br/construcao/noticias/o-projeto-para-producao-como-ferramenta-de-gestao-da-qualidade-85267-1.aspx>>. Acessado em: 22 novembro 2014.

- SRISUWANRAT, C.; IOANNOU, P. G.; TSIMHONI, O. Simulation and Optimization for Construction Repetitive Projects Using Promodel and Simrunner. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2008, USA. **Proceedings...** Miami, USA: WSC, 2008. p. 2402-2412.
- TOMMELEIN, I. D.; CARR, R. I.; ODEH, A. M. Knowledge-Based Assembly of Simulation Networks Construction Designs, Plans, and Methods. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1994, USA. **Proceedings...** Orlando, Florida:WSC, 1994. p. 1145-1152.
- TOMMELEIN, I.; RILEY, D. R.; HOWELL, G. Parade game:impact of work flow variability on trade performance. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 125, n. 5, 1999. p. 304–310.
- TSAO, C. C. Y. et al. Case study for work structuring: installation of metal door frames. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL GROUP FOR LEAN CONSTRUCTION, 8., 2000, United Kindom.**Proceedings...** Brighton, UK.: IGLC, 2000.
- TSAO, C. C. Y.; TOMMELEIN, I. D. Creating Work Structuring Transparency in Curtain Wall Design. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL GROUP FOR LEAN CONSTRUCTION, 12., 2004, Denmark. **Proceedings...** Copenhagen, Denmark: IGLC, 2004.
- U. S. GENERAL SERVICES ADMINISTRATION. **GSA Buildinf Information Modeling Guides Series 05: Energy Performance**. Washington, USA: GSA, 2012.
- VAISHNAVI, V. K.; KUECHLER, W. **Design Science Research Methods and Patter**. Florida, USA: Taylor & Francis Group, 2007.
- VANAKEN, J. E. Management Research Based on the Paradigm of the Design Sciences: The Quest for Field-Tested and Grounded Technological Rules. **Journal of Management Studies**, v. 41, n. 2, 2004. p. 219–246,.
- WAGNER, P. R.; FREITAS, C. M. D. S.; WAGNER, F. R. Um Novo Paradigma para Modelagem e Simulação Interativa Visual. Em: Simpósio Brasileiro de Computação Gráfica e Processamento de Imagens, 9., 1996, Brasil.**Anais...**Rio de Janeiro, Brasil: SBC, 1996. p. 87-94.
- WILLIAMS, T. M. **Modeling Complex Projects**. Chichester: John Wiley & Sons, 2002.
- WOMACK, J. P.; JONES, D. T.; ROOS, D. **The Machine that changed the world**. New York: Macmillan, 1990.
- WOOD, H.; GIDADO, K. Project Complexity in Construction. IN: INTERNATIONAL CONSTRUCTION CONFERENCE, 2010, Malaysia. **Proceedings...** Malaysia: RICS, 2010.
- YANG, I.; IOANNOU, P. G. Resource-Driven Scheduling for Repetitive Projects : a pull-system approach. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL GROUP FOR LEAN CONSTRUCTION, 9., 2001, Singapore.**Proceedings...** Singapore: IGLC, 2001.
- YIN, R. K. **Case Study Research: Design and Methods**. Thousand Oaks, California: SAGE Publications, 2003.
- ZHANG, Y. et al. 3D CAD Modeling and Visualization of the Tunnel Construction Process in a Distributed Simulation Enviroment. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2010, USA. **Proceedings...** Baltimore, USA: WSC, 2010. p. 3189-3200.

**APÊNDICE A:ROTEIRO DE ENTREVISTA SEMI-ESTRUTURADA**

## **Roteiro de Entrevista Semi-estruturada**

**Empresa:**

**Nome:**

**Cargo:**

**Data da entrevista:**

1. Na sua opinião, qual a importância do PSP para o processo de gestão do empreendimento?
2. Como as ferramentas elaboradas foram utilizadas na tomada de decisão? Percebeu-se benefícios?
3. Com relação ao uso da simulação, quais suas impressões quanto à sua utilidade para a tomada de decisão?
4. Quais os principais benefícios e dificuldades do uso da simulação no estudo realizado?
5. Você empregaria o PSP como uma atividade de gestão em empreendimentos futuros?
6. Você utilizaria a simulação para apoiar a tomada de decisão em outros empreendimentos futuros? Em que circunstâncias?