



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESIGN E TECNOLOGIA**  
**PGDESIGN**

**ESTUDO DO EMPREGO DA ESPUMA METÁLICA NO DESIGN**  
**AUTOMOTIVO**

Eduardo Cardoso



Porto Alegre

2009

C268e Cardoso, Eduardo

Estudo do emprego da espuma metálica no design automotivo / Eduardo Cardoso ; orientação de Branca Freitas de Oliveira. — Porto Alegre : UFRGS, Faculdade de Arquitetura, 2009.

xxii, 172 p. : il.

Dissertação (mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Faculdade de Arquitetura. Programa de Pós-graduação em Design e Tecnologia. Porto Alegre, RS, 2009.

CDU: 741.6:629.11  
681.32:629.11.011.1  
624.014

#### DESCRITORES

Design gráfico : Veículos rodoviários  
741.6:629.11

Simulação computacional : Chassi  
681.32:629.11.011.1

Estruturas de metal  
624.014

Bibliotecária Responsável

Elenice Avila da Silva - CRB-10/880

Eduardo Cardoso

**ESTUDO DO EMPREGO DA ESPUMA METÁLICA NO DESIGN  
AUTOMOTIVO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Design e Tecnologia - PgDesign da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Design e Tecnologia, modalidade Acadêmica, na área de Design Virtual.

Orientador: Branca Freitas de Oliveira,  
Dra.

Porto Alegre

2009

Eduardo Cardoso

**ESTUDO DO EMPREGO DA ESPUMA METÁLICA NO DESIGN  
AUTOMOTIVO**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Design e Tecnologia na modalidade Acadêmica e aprovada em sua forma final pela Orientadora e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Design e Tecnologia - PgDesign da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

---

**Profa. Branca Freitas de Oliveira, Dra.**

Orientadora PgDesign/UFRGS

---

**Prof. Wilson Kindlein Junior, Dr.**

Coordenador PgDesign/UFRGS

**Banca Examinadora:**

Professora Underléa Miotto Bruscato, Dra. em Arquitetura na área de Comunicação Visual em Arquitetura e Design pela Universidade Politécnica da Catalunha. Professora na graduação - Unisinos e na pós-graduação - Unilasalle (Avaliadora Externo).

Professor Fábio Gonçalves Teixeira, Dr. em Engenharia Mecânica com ênfase em computação gráfica e modelagem geométrica / UFRGS. Professor na graduação e pós-graduação UFRGS (PgDesign/UFRGS).

Professor José Luís Farinatti Aymone, Dr em Engenharia Civil / UFRGS. Professor na graduação e pós-graduação UFRGS (PgDesign/UFRGS).

À minha esposa amada , Mariana, por sua  
paciência e incentivo. Aos meus  
maravilhosos pais, Jaime e Zélia,  
irmãos e sobrinhos queridos.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pelo dom da vida, da saúde e da sabedoria para enfrentar todos os desafios que sempre temos pela frente.

À professora Branca Freitas de Oliveira, por sua valiosa orientação e constante dedicação ao longo deste trabalho, ensinado-se realmente o que é educar.

A toda equipe do VID – Virtual Design, pelo constante apoio e incentivo.

Aos bolsistas de pesquisa Renato e Matheus que participaram na execução das simulações aqui apresentadas, assim como a Smarttech – SP.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, pela oportunidade concedida.

Ao Programa de Pós-Graduação em Design e Tecnologia, sua coordenação, funcionários e professores pelas constantes contribuições e ensino de qualidade.

Aos membros da Banca Examinadora, professores Underléa Miotto Bruscato, Fábio Gonçalves Teixeira e José Luis Farinatti Aymone.

Ao Departamento de Design e Expressão Gráfica da Faculdade de Arquitetura desta Universidade, pela oportunidade de atuar como professor substituto do Curso de Graduação em Design e pelo apoio na participação em eventos internos e externos durante o desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade Estadual de Minas Gerais – Redemat e ao professor desta Instituição Róber Botelho, pelas informações cedidas sobre o Estudo de Caso: Sabiá 5.

Aos meus colegas e amigos que me acompanharam nesta jornada e fizeram dela um momento especial.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

E, finalmente, novamente, a toda minha família que tanto amo.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	XXI
<b>ABSTRACT</b> .....	XXII
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	22
1.1 Tema .....	23
1.2 Delimitação do Tema .....	23
1.3 Problema .....	23
1.4 Objetivos .....	24
1.4.2 Objetivos Específicos .....	24
1.5 Hipótese da Pesquisa .....	25
1.6 Justificativa .....	25
1.7 Estrutura da Dissertação .....	27
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	28
2.1 Introdução ao Design .....	28
2.2 Aspectos Gerais para a Aplicação da Seleção de Materiais .....	29
2.3 Seleção de Materiais em Design Automotivo .....	31
2.4 Eficiência e Sustentabilidade Ambiental .....	35
2.5 Evolução Histórica dos Meios de Transporte .....	38
2.5.1 A Indústria Automobilística no Brasil .....	42
2.5.2 Estrutura e Design Automotivo: Chassi .....	45
2.5.2.1 Chassi de um veículo de competição .....	39
2.5.2.2 Requisitos Estruturais do Chassi de um Automóvel .....	50
2.5.2.3 Habitáculo Automotivo .....	51
2.6 Aplicações para Materiais Metálicos Celulares e Espumas Metálicas .....	53
2.6.1 Introdução .....	53
2.6.2 Histórico .....	53
2.6.3 Considerações Gerais sobre Metais Celulares .....	55
2.6.4 Processos de Fabricação de Metais Celulares .....	58
2.6.4.1 Produção de Espumas Metálicas por Injeção de Gases – <i>HYDRO/ALCAN</i> .....	59
2.6.4.2 Produção de Espumas Metálicas com Agentes Efervescentes (dilatadores) – <i>ALPORAS</i> .....	60
2.6.4.3 Produção de Espumas Metálicas com Gás-Sólido – <i>GASAR</i> .....	60

2.6.4.3 Produção de Espumas Metálicas por Cristalização – <i>FOAMINAL / ALULIGHT</i> .....	62
2.6.4.4 Produção de Espumas de Lingotes contendo Agentes Efervescentes (dilatadores) – <i>FORMGRIP / FOAMCAST</i> .....	63
2.7 Aplicações para Materiais Metálicos Celulares no Setor Industrial .....	63
2.7.1 Setor Automotivo .....	63
2.7.2 Absorção de Energia em caso de Impacto .....	67
2.7.3 Setor de Construção Civil .....	71
2.7.4 Setor de Transportes: Espacial, Aéreo, Naval e Ferroviário .....	73
2.7.5 Setor da Indústria Esportiva .....	74
2.7.6 Setor da Indústria Biomédica .....	74
2.7.7 Embalagens .....	75
2.7.8 Demais Setores .....	75
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	78
<b>4 DESENVOLVIMENTO</b> .....	79
4.1 Coleta de Dados: Seleção e Propriedades dos Materiais no Software CES Edupack .....	79
4.2 Métodos de Modelagem e Ferramentas Computacionais .....	86
4.2.1 Tecnologia Cad .....	87
4.2.2 Ambiente de Realidade Virtual e Simulação .....	90
4.2.3 Tecnologia CAE – O Método Dos Elementos Finitos – <i>ABAQUS/CAE</i> ....	91
4.2.4 Tecnologia CAE na Indústria Automotiva .....	95
4.2.4.1 Jipe Stark (TAC) – Veículo Nacional de Base Tecnológica .....	96
4.3 Estudo de Caso: Sabiá 5 .....	101
4.4 Simulação do Estudo de Caso: Sabiá 5 .....	108
4.5 Análise das Simulações do Estudo de Caso: Sabiá 5 .....	111
4.5.1 Simulações Estáticas de peso próprio da estrutura com aplicação de diferentes materiais .....	111
4.5.2 Simulações Estáticas de deslocamento .....	115
4.5.3 Simulações dinâmicas de deslocamento .....	131
4.5.3.1 Freqüências Naturais e Modos de Vibração .....	143
4.5.4 Teste de impacto - Crash test .....	146
4.5.4.1 Segurança veicular .....	146
4.5.4.2 A dinâmica das colisões veiculares .....	147



4.5.4.3 Crash test Virtual .....	150
4.5.4.4 Reparabilidade veicular .....	157
4.6 Estudo de Viabilidade do Emprego de Espumas Metálicas no Design Automotivo.....	158
4.6.1 Aspectos Mercadológicos (Modelo do Valor).....	160
4.6.2 Aspectos Técnicos (Modelo Técnico).....	161
4.6.3 Aspectos Financeiros (Modelo de Custo).....	162
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	164
5.1 Oportunidades, Desafios e Sugestões para Trabalhos Futuros.....	166
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	168
<b>7 ANEXOS</b> .....	173

## LISTA DE SÍMBOLOS

MEF - Método de Elementos Finitos

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UEMG – Universidade Estadual de Minas Gerais

SEPEX - Seminário de Ensino Pesquisa e Extensão

Redemat – Rede Temática em Engenharia de Materiais

Anfavea – Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores

ABAL - Associação Brasileira do Alumínio

GM – General Motors

ASF – Audi Space Frame

CO<sub>2</sub> - Dióxido de carbono – Gás carbônico

CH<sub>4</sub> - Metano

CFC'S – Clorofluorcarboneto

3D – Tridimensional

Geia - Grupo Executivo da Indústria Automobilística

IPI – Imposto sobre Produtos Industrializados

ICMS – Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços

PIS – Programa de Integração Social

Cofins - Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social

IFAM - Instituto Fraunhofer de Manufatura e Engenharia aplicada à Pesquisa de Materiais

CES - Cambridge Engineering Selector ®

CAD - Computer Aided Design - Projeto Assistido por Computador

CAM - Manufatura Auxiliada pela Computação

CAE - *Computer aided Engineering* - Engenharia Auxiliada por Computador

M.I.T. - *Massachussets Institute of Technology*

2D – Bidimensional

CIM - *Computer Integrated Manufacturing* – Fabricação Integrada por Computador

CNC – *Computer Numeric Control* - Controle Numérico Computadorizado

CAI - Inspeção Auxiliada por Computador

VRML - Virtual Reality Modelling Language

FIESC - Federação das Indústrias do Estado de Santa Catarina

TAC - Tecnologia Automotiva Catarinense  
PRPV - Plástico reforçado com fibras de vidro  
VPD - Desenvolvimento Virtual de Produtos  
UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá  
E – Módulo de Young  
 $\mu$  - Coeficiente de Poisson  
 $\varepsilon$  - Deformação  
 $\sigma$  - Tensão  
T – Período de tempo – ciclo  
M - Matriz de massa  
C - Matriz de amortecimento  
K - Matriz de rigidez  
 $\rho V$  - Densidade por volume  
F – Força  
t – Tempo  
HIC - *Head Injury Critereon*  
EURONCAP - European New Car Assessment Programme  
PN – Plano de Negócios  
Pi – Métrica de Performance  
Cm - Material - Matéria-prima  
Ct - Capital  
Tl - Tempo necessário para produção  
PCe - Custo de Energia consumida para produção  
ACs - Espaço para produção  
Ci - Informação em Pesquisa e Desenvolvimento  
 $C_{L\text{Gross}}$  – Teto bruto por unidade produzida  
n - Taxa de produção  
f - Refugo

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Corvette Z06 da GM .....	32
Figura 02: Tipos de Aplicação do alumínio no Audi TT .....	34
Figura 03: Comparativo entre Redução de peso e Penetração no Mercado .....	36
Figura 04: Indústria Automobilística Brasileira em Grandes Números .....	43
Figura 05: Crescimento da Produção de Autoveículos no Brasil .....	43
Figura 06: Chassi -longarinas paralelas de aço .....	45
Figura 07: Estrutura do chassi tipo skate – GM .....	46
Figura 08: Estrutura Monobloco – Hyundai Accent .....	46
Figura 09: Automóvel Lancia Lambda .....	47
Figura 10: Estrutura tipo Spaceframe – Audi A8 .....	48
Figura 11: Estrutura em compósito (fibra de carbono) – Porsche Carrera Gt .....	48
Figura 12: Chassis misto Fibra de carbono e honey comb Nissan P35 1993 .....	48
Figura 13: Mercedes Benz T80 – Longarinas longitudinais com estruturas transversais .....	49
Figura 14: Maserati 250 Estrutura tubular com armações transversais que davam forma à carroceria .....	49
Figura 15: Mitsubishi Pajero Evolution IV 2007 – Moderno chassi tubular .....	50
Figura 16: O mais clássico e famoso chassis tubular: Maserati Bird Cage .....	50
Figura 17: Analogia entre uma Espuma de Zinco e uma fatia de Pão e seus vazios internos .....	54
Figura 18: Metal Celular: Espuma de alumínio com célula aberta (DUOCEL®)...	55
Figura 19: Estrutura da espuma na Terra (esquerda) e no espaço (direita) .....	56
Figura 20: Esquema do Processo GASAR. ....	61
Figura 21: Espuma produzida pelo processo GASAR – vista de quão alongados são os seus poros .....	61
Figura 22: Painéis Sanduíche de Espuma Metálica de alumínio .....	62
Figura 23: Maiores campos de aplicação da Espuma Metálica com função estrutural no setor automotivo .....	64
Figura 24: Aplicação de Espuma Metálicas no Design Automotivo .....	65
Figura 25: Veículo Conceito para o Design Automotivo de baixo peso .....	66
Figura 26: Painel Estrutural após expansão da Espuma em seu interior – mostrando sua manufatura e modelagem tridimensional .....	66

Figura 27: Braço do veículo feito com painéis sanduíche de espuma de alumínio - Teupen GmbH .....	67
Figura 28: Curva tensão-deformação para Espumas Metálicas .....	68
Figura 29: Amostra de corpo em espuma metálica após comprimido .....	68
Figura 30: Seções de tubos após impacto parcial, com e sem espuma metálica em seu interior .....	69
Figura 31: Desenho ilustrativo da localização dos crash boxes .....	70
Figura 32: Sistema veicular COMBINO.....	71
Figura 33: Absorvedor da energia de impacto para o sistema veicular COMBINO.....	71
Figura 34: Gráficos fornecidos por CYMAT sobre as propriedades do material.....	71
Figura 35: a – b - Aplicação de Painéis Externos em Espuma Metálica .....	72
Figura 36: Chapas em Espuma Metálica .....	73
Figura 37: Implante ósseo de mandíbula em espuma metálica .....	74
Figura 38: Objeto embalado envolto em uma camada de Espuma Metálica .....	75
Figura 39: Aplicações da Espuma Metálica em Decoração (Luminárias, biombo e tampo de mesa .....	76
Figura 40: a, b, c, d - Aplicações da Espuma Metálica em Decoração .....	76
Figura 41: Seleção do Grupo de Materiais no Software CES Edupack .....	80
Figura 42: Módulo de Elasticidade x Densidade .....	82
Figura 43: Densidade x Preço.....	83
Figura 44: Preço x Módulo de Elasticidade .....	83
Figura 45: Densidade x Resistência à Compressão .....	84
Figura 46: Resistência à Compressão x Módulo de Elasticidade .....	84
Figura 47: Resistência à Compressão x Preço .....	85
Figura 48: Vistas laterais e em perspectiva do Modelo gerado em Autocad .....	89
Figura 49: Simulação de impacto frontal – deformações .....	93
Figura 50: Desenho do off-road Stark 4WD .....	96
Figura 51: Desenho do off-road Stark 4WD .....	97
Figura 52: Planejamento da montagem dos componentes do veículo .....	98
Figura 53: Modelagem da estrutura do veículo e modelo 3D do chassi para simulação .....	99
Figura 54: Simulações da estrutura do veículo .....	100

Figura 55: Stark 4WD .....	100
Figura 56: O Sabiá I detentor do Prix d'Honneur du Design 10a Shel Éco-Marathon – 1994 .....	102
Figura 57: A Equipe Sabiá II na 11a Shell Éco-Marathon – 1995 .....	102
Figura 58: A Equipe Sabiá 2000, no Circuito em Nogaro, ganhadora da 16a Shell Éco-Marathon – 2000 .....	102
Figura 59: A Equipe Sabiá IV conquistou a marca de 480,0km/l .....	102
Figura 60: A - Fachada do prédio da Sede da Prefeitura Municipal de Belo Horizonte e detalhe do mesmo prédio . A outra vertente de estilo, o New Edge, representado pelo Ford Focus. Em ambos, a presença de vincos é evidente / B - 19a Shell Éco-Marathon – 2002 .....	103
Figura 61: Vistas superior e lateral do projeto Sabiá 5 .....	104
Figura 62: Projeto do Assento da Piloto – Análise Antropométrica .....	105
Figura 63: Proposta do Sabiá 5 para a 20a Shell Éco-Marathon .....	106
Figura 64: Distribuição de materiais na carroceria do veículo .....	107
Figura 65: Equipe do Sabiá 5 .....	107
Figura 66: Geometria do Estudo de Caso importada no ABAQUS CAE .....	109
Figura 67: Preenchimento das propriedades dos materiais no ABAQUS CAE .....	109
Figura 68: Criação da Malha – 25.729 elementos tetraédricos lineares – Aço 1020 .....	109
Figura 69: Aplicação das diferentes cargas - Aço 1020 .....	110
Figura 70: Visualização das tensões de von mises (MPa) – aço 1020 .....	111
Figura 71: Visualização da deformação (mm) – aço 1020 .....	112
Figura 72: Visualização das tensões de von mises (MPa) – alumínio AA 8011 .....	112
Figura 73: Visualização da deformação (mm) – alumínio AA 8011 .....	113
Figura 74: Visualização das tensões de von mises (MPa) – espuma metálica 1.0 ..	114
Figura 75: Visualização da deformação (mm) – espuma metálica 1.0 .....	114
Figura 76: Gráfico da relação constitutiva do material e da relação utilizada nas simulações .....	115
Figura 77: Visualização do deslocamento no menu condições de contorno .....	116
Figura 78: Visualizações das condições de contorno e do carregamento do peso próprio por body force .....	116
Figura 79: Visualizações da malha com 30.000 elementos para o modelo em	

espuma metálica 9mm espessura .....	117
Figura 80: Visualização das tensões de von mises (MPa) - deslocamento traseiro de -30mm modelo em espuma metálica 9mm espessura .....	117
Figura 81: Visualização das tensões de von mises (MPa) - deslocamento dianteiro esquerdo de -30mm – modelo em espuma metálica 9mm espessura .....	118
Figura 82: Visualização das deformações (mm) - deslocamento traseiro -30mm – Espuma Metálica 9mm espessura .....	118
Figura 83: Visualização das deformações (mm) - deslocamento dianteiro esquerdo -30mm – Espuma Metálica 9mm espessura .....	119
Figura 84: Visualização das tensões de von mises (MPa) - deslocamento traseiro -30mm – Alumínio 9mm espessura .....	119
Figura 85: Visualização das tensões de von mises (MPa) - deslocamento dianteiro esquerdo -30mm – Alumínio 9mm espessura .....	119
Figura 86: Visualização das tensões de von mises (MPa) - deslocamento traseiro de -30mm – modelo em espuma metálica 15mm espessura .....	120
Figura 87: Visualização das tensões de Von Misses (MPa) – deslocamento dianteiro esquerdo de -30mm – modelo em espuma metálica 15mm espessura .....	121
Figura 88: Visualização da deformação (mm) - deslocamento traseiro -30mm – modelo em espuma metálica 15mm espessura .....	122
Figura 89: Visualização da deformação (mm) - deslocamento dianteiro esquerdo -30mm – modelo em espuma metálica 15mm espessura .....	122
Figura 90: Visualização das tensões de von misses (MPa) - deslocamento traseiro -30mm – modelo em espuma metálica 20mm espessura .....	123
Figura 91: Visualização das tensões de von misses (MPa) - deslocamento dianteiro esquerdo -30mm – modelo em espuma metálica 20mm espessura .....	123
Figura 92: Visualização das tensões de von misses (MPa) - deslocamento dianteiro esquerdo -30mm – modelo em espuma metálica 20mm espessura e barra traseira em alumínio com 16mm diâmetro .....	124
Figura 93: Ampliação: tensões de von misses (MPa) - deslocamento dianteiro esquerdo -30mm – modelo em espuma metálica 20mm de espessura e barra traseira em alumínio 16mm diâmetro .....	124

Figura 94: Visualização das tensões de von misses (MPa) - deslocamento dianteiro esquerdo -30mm – modelo em espuma metálica com laterais de 20mm espessura e barra traseira 32mm diâmetro .....	125
Figura 95: Ampliação: tensões de Von Misses (MPa) - deslocamento dianteiro esquerdo -30mm – Laterais em espuma metálica 20mm espessura e barra traseira em Alumínio 32mm diâmetro .....	125
Figura 96: Visualização das tensões de von misses (MPa) - deslocamento traseiro -30mm – modelo com laterais (1mm) e barras (32mm) em alumínio ....	126
Figura 97: Visualização das tensões de von misses (MPa) - deslocamento traseiro -30mm – Preenchimento do painel sanduíche em espuma metálica – 12mm .....	126
Figura 98: Visualização da deformação (mm) - deslocamento traseiro -30mm – modelo com laterais e barras em alumínio e preenchimento do painel sanduíche em espuma metálica .....	127
Figura 99: Visualização das tensões de von misses (MPa) - deslocamento dianteiro esquerdo -30mm – modelo com laterais (1mm) e barras (32mm) em alumínio .....	127
Figura 100: Visualização das tensões de von misses (MPa) - deslocamento dianteiro esquerdo -30mm – modelo com preenchimento do painel sanduíche em espuma metálica – 12mm .....	128
Figura 101: Ampliação das tensões de Von Misses (MPa) - deslocamento dianteiro esquerdo -30mm – Estrutura em Alumínio e Espuma Metálica (preenchimento) .....	129
Figura 102: Visualização da deformação (mm) - deslocamento dianteiro esquerdo -30mm – modelo com laterais e barras em alumínio .....	129
Figura 103: Visualização da deformação (mm) - deslocamento dianteiro esquerdo -30mm – modelo com preenchimento do painel sanduíche em espuma metálica – 12mm .....	129
Figura 104: Visualização do deslocamento simulando irregularidade da pista ao qual foi submetido o modelo .....	130
Figura 105: Visualização das tensões de von mises (MPa) - deslocamento traseiro -30mm barras 32mm e laterais 1mm em alumínio e preenchimento em espuma metálica – 12mm .....	133
Figura 106: Visualização das tensões de von mises (MPa) - deslocamento	



traseiro -30mm preenchimento de 12mm em espuma metálica – 12mm .....	133
Figura 107: Visualização da deformação (mm) - deslocamento traseiro -30mm barras 32mm e laterais 1mm em alumínio e preenchimento em espuma metálica – 12mm .....	134
Figura 108: Visualização da deformação (mm) - deslocamento dianteiro esquerdo -30mm e da posição original da geometria - modelo 14mm todo em espuma metálica .....	134
Figura 109: Visualização das tensões (MPa) - deslocamento dianteiro esquerdo - 30mm modelo 14mm todo em espuma metálica .....	135
Figura 110: Visualização das tensões de von mises (MPa) - deslocamento traseiro -30mm modelo todo em espuma metálica .....	135
Figura 111: Visualização da deformação (mm) - deslocamento traseiro -30mm modelo todo em espuma metálica .....	136
Figura 112: Visualização das tensões de von mises (MPa) - deslocamento traseiro -30mm modelo 14mm todo em alumínio .....	136
Figura 113: Visualização da deformação (mm) - deslocamento traseiro -30mm modelo 14mm todo alumínio .....	137
Figura 114: Visualização das tensões de von mises (MPa) - deslocamento traseiro -30mm modelo 14mm todo em aço .....	137
Figura 115: Visualização da deformação (mm) - deslocamento traseiro -30mm modelo 14mm todo em aço .....	138
Figura 116: Visualização das tensões de von mises (MPa) - deslocamento traseiro -30mm - modelo sanduíche com laterais em alumínio 2mm e preenchimento em espuma metálica .....	138
Figura 117: Visualização da deformação (mm) - deslocamento traseiro -30mm modelo sanduíche com laterais em alumínio 2mm e preenchimento em espuma metálica .....	139
Figura 118: Visualização das tensões de von mises (MPa) - deslocamento traseiro -30mm - modelo sanduíche com laterais em alumínio 3mm e preenchimento em espuma metálica .....	140
Figura 119: Visualização da deformação (mm) - deslocamento traseiro -30mm modelo sanduíche com laterais em alumínio 3mm e preenchimento em espuma metálica .....	140

Figura 120: Visualização das tensões de von mises (MPa) - deslocamento traseiro -30mm - modelo sanduíche com laterais em alumínio 2mm e preenchimento em espuma metálica .....	140
Figura 121: Visualização da deformação (mm) - deslocamento traseiro -30mm modelo sanduíche com laterais em alumínio 2mm e preenchimento em espuma metálica .....	141
Figura 122: Modos de vibração para o modelo de 25mm de espessura em espuma metálica .....	141
Figura 123: Absorvedores de energia nos revestimentos de porta .....	145
Figura 124 : Absorvedores de energia utilizados em para-choques dianteiros pela Volvo – 1960 .....	147
Figura 125: Impacto contra a superfície de um painel de instrumentos de acordo com as normas europeias e norte-americanas .....	148
Figura 126: Painel de instrumentos revestido com material para absorver energia do impacto .....	149
Figura 127 : Percentagem das partes do corpo lesionadas em acidentes de trânsito	149
Figura 128: Alguns ensaios de impacto de veículos mais comuns e seus procedimentos .....	149
Figura 129: Ensaio de crash test real a 64km/h que conferiu ao Mercedes-Benz Classe C a graduação de 5 estrelas em ensaio no EuroNCAP – 2001 – 2002 .....	150
Figura 130: Composição de materiais para a lateral do modelo para o ensaio de crash test .....	151
Figura 131: Visualização das tensões de Von mises para o ensaio de crash test. Modelo com laterais e barras em alumínio e preenchimento em espuma metálica .....	152
Figura 132: Visualização da deformação plástica equivalente para o ensaio de crash test. Modelo com laterais e barras em alumínio e preenchimento em espuma metálica .....	152
Figura 133: Visualização das tensões de Von mises para o ensaio de crash test . Modelo todo em espuma metálica .....	152
Figura 134: Visualização da deformação plástica equivalente para o ensaio de crash test. Modelo todo em espuma metálica .....	153
Figura 135: Visualização das tensões de Von mises para o ensaio de crash test.	

Modelo todo em alumínio .....	153
Figura 136: Visualização da deformação plástica equivalente para o ensaio de crash test. Modelo todo em alumínio .....	153
Figura 137: Comparativo da distribuição da deformação plástica no sistema para o modelo em seus três tipos de composição de materiais .....	154
Figura 138: Comparativo da energia cinética no sistema para o modelo em seus três tipos de composição de materiais .....	155
Figura 139: Comparativo da dissipação plástica no sistema para o modelo em seus três tipos de composição de materiais .....	156
Figura 140: Exemplos de modos de dissipação da energia de impacto frontal na estrutura do veículo – crash Box .....	156
Figura 141: Longarinas dianteiras antes e após a deformação - otimização da absorção de energia do impacto .....	156
Figura 142: Relação entre os Modelos de Custo, Técnico e de Valor .....	159

## LISTA DE QUADROS

Quadro 01: Economia com a redução de Peso em Veículos de Transporte .....	37
Quadro 02: Exemplo da Saída de Dados de um Consulta no Software CES	
Edupack .....	81
Quadro 03: Fatores para a análise e seleção de materiais .....	81
Quadro 04: Saída de dados da espuma metálica selecionada para a aplicação na	
Simulação .....	86
Quadro 05: Quadro comparativo - estrutura de 6mm de espessura e barras de	
16mm de diâmetro .....	115
Quadro 06 – Quadro comparativo entre os diferentes modelos submetidos a teste	
Estático .....	130
Quadro 07: Quadro comparativo entre os diferentes modelos maciços submetidos	
ao teste Dinâmico .....	139
Quadro 08: Quadro comparativo entre os diferentes modelos submetidos ao teste	
Dinâmico .....	142
Quadro 09: Modos de vibração do modelo em suas diferentes composições de	
materiais e geometrias submetidas ao teste dinâmico de frequências	
naturais .....	144

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01: Peso dos materiais em um automóvel .....	32
Gráfico 02: Utilização do Alumínio na Indústria Mundial .....	37
Gráfico 03: Aumento de 76% na Produção de Autoveículos: de 2000 a 2007 .....	44
Gráfico 04: Exportações por Continente de Destino – Unidades .....	45
Gráfico 05: Aplicação dos metais celulares de acordo com o seu grau de abertura	
necessária do vazio e sua aplicação .....	58

## RESUMO

Os automóveis têm afetado profundamente não somente o desenvolvimento econômico e as transformações dos meios produtivos, mas também os modos de vida da sociedade, o meio ambiente e a configuração dos espaços urbanos. Destacam-se, hoje, como um dos maiores conjuntos de atividades de negócio no mundo, guiando o desenvolvimento e o lançamento de novos produtos, processos e materiais no mercado, servindo como referência para outros setores. Novos conceitos, materiais e métodos de produção surgem a cada dia, aumentando o desempenho destes veículos, reduzindo o seu tempo de desenvolvimento, simulação, produção e lançamento no mercado. Neste novo cenário solicitações cada vez mais complexas precisam ser atendidas, integrando performance, segurança, economia, praticidade, tecnologia e desenvolvimento sustentável, entre outros. Assim, é necessário inovar com a pesquisa em design, metodologia de projeto, materiais e tecnologias para projeto e produção de veículos. Na busca de novos materiais as espumas metálicas vêm se mostrando fortes aliadas na construção de estruturas cada vez mais leves e resistentes, gerando economia com manutenção de desempenho e atualmente ainda existe carência de estudos computacionais tratando da caracterização e aplicações para estes materiais.

Este trabalho visa a contribuição, tanto na área acadêmica quanto industrial, relacionando o design automotivo, a seleção de materiais e a simulação computacional através de software para modelagem e análise do comportamento estrutural pelo método dos elementos finitos com emprego da espuma metálica no modelo do Estudo de Caso do chassi do veículo Sabiá 5 – UEMG.

De acordo com as simulações realizadas nas análises estáticas e dinâmicas, entre elas os testes de modos de vibração e crash test virtual, pode-se afirmar que a alternativa que melhor atendeu às solicitações foi a predominantemente constituída em espuma metálica, não ocorrendo plastificação na simulação dinâmica de deslocamento e havendo redução de peso. Demonstrou ainda, melhores condições no crash test frontal, absorvendo o máximo de energia cinética possível, para que esta não seja assimilada internamente ao veículo vindo a atingir os ocupantes. Observa-se ainda que a aplicação e simulação da espuma metálica é bastante complexa, principalmente em virtude da caracterização de sua relação constitutiva e da geometria do modelo, porém os resultados apresentados validam a metodologia empregada e explicitam as potencialidades das ferramentas computacionais empregadas no design virtual de produtos.

Palavras-chave: Design automotivo, espuma metálica, método elementos finitos, simulação virtual.

## ABSTRACT

Automobiles have affected profoundly not only the economic development and the transformation of the means of production, but also society's lifestyles, the environment and urban spaces. They stand out as one of the biggest business activities in the world, guiding the development and launch of new products, processes and materials, and serving as a reference for other sectors. New production concepts, materials and methods are created every day, improving the performance of these vehicles and reducing the time needed for development, simulation, production and launch. In this new setting more complex requests have to be met, integrating performance, safety, economy, practicality, technology and sustainable development, among others. In this regard, it is necessary to innovate with design research, project methodology, and materials and technologies for projecting and producing vehicles. In search of new materials metal foams are demonstrating to help construction of lighter and stronger structures, saving money and keeping the performance. Nowadays there is still lack of computational studies covering the characterization and application of these materials.

This work aims to contribute, both to the academic and industrial fields, relating automotive design, materials selection and computer simulation. This last activity is performed through modeling and structural behavior analysis software, which uses the finite element method. The computer simulation then uses the metal foam in the study case model for the chassis of the vehicle Sabiá 5 – UEMG.

According to the simulations performed in the statistical and dynamic analyses, which included modes of vibration and virtual crash tests, it can be stated that the alternative which best met the requests was the one composed mainly by a metal foam, in which there was weight reduction and no plasticization in the dynamic displacement simulation. This alternative also demonstrated better conditions in the front crash test, absorbing the most kinetic energy possible, so that it doesn't reach the interior of the vehicle and hit the passengers. It is also observed that the application and simulation of the metal foam is very complex, mainly because of the characterization of its constitutive relation and the geometry of the model. However, the results presented validate the used methodology and show the potentiality of the computer tools used in virtual product design.

Key-words: Automotive design automotivo, metallic foams, finite element method, virtual simulation.

## 1 INTRODUÇÃO

Automóveis e veículos de transporte de todos os tipos tornaram-se símbolos de mobilidade e liberdade. São essenciais em nossa vida diária e, segundo Larica (2003), não é surpresa que a fabricação destes produtos se constitua no maior conjunto de atividades de negócio no mundo hoje. Novos conceitos, materiais e métodos de produção surgem a cada dia, aumentando o desempenho destes veículos, reduzindo o seu tempo de desenvolvimento, simulação, produção e lançamento dos mesmos no mercado mundial. Os consumidores estão cada vez mais exigentes e desejam mais opções de escolha tanto na aparência, quanto na performance, na praticidade, preço e uso de seus veículos. Neste novo cenário, os fabricantes de veículos precisam atender a solicitações cada vez mais complexas integrando, então, estilo, economia, performance, praticidade, tecnologia e, principalmente, nos dias de hoje, preservação da natureza através do desenvolvimento sustentável. Assim sendo, para criar um produto e/ou sistema em condições de competir com os já existentes, é necessário inovar com a pesquisa em design, metodologia de desenvolvimento de projeto de produto, novos materiais e processos de fabricação, entre outros.

O design automotivo é um segmento muito importante do design, que propõe-se a desenvolver produtos e sistemas voltados para a mobilidade de seus usuários. Deve trabalhar em conjunto com outras áreas de conhecimento para permitir maior conforto, segurança, performance, praticidade e, assim, contemplar não só as necessidades de seus usuários, mas também seus anseios. O design automotivo deve, principalmente, trabalhar baseado nos atuais conceitos de sustentabilidade para criar novas soluções e aperfeiçoar os veículos e sistemas já existentes para que causem menor impacto ao ambiente natural, como, por exemplo, pela diminuição do consumo de combustível.

Nesta busca por inovação deve-se seguir uma metodologia para que a mesma seja eficiente. Ao pesquisar por novas soluções, o primeiro passo é analisar as alternativas já existentes, como estruturam-se, quais as já criadas até o momento e que analogia podemos fazer, por exemplo, com demais áreas de conhecimento para criação de novas alternativas.

## **1.1 Tema**

Segundo Condotta (2004), o setor automotivo, ao longo de muitos anos, tem guiado o desenvolvimento e o lançamento de novos produtos e materiais no mercado, servindo como referência para outros setores. Trata-se de um setor de intensa renovação tecnológica, em que a pesquisa e o desenvolvimento estão fortemente associados ao sucesso deste mercado. Para Medina e Naveiro (2000), o automóvel é o objeto técnico mais conhecido do século XX, mas não para muitos de seus usuários que o adquirem visando conforto e facilidade de deslocamento aliado ao bom desempenho. O automóvel diferenciou-se das carruagens do século XIX, não somente pelo seu motor à combustão interna, mas pela aplicação de novos materiais.

Assim, esta dissertação visa o estudo e caracterização das espumas metálicas, como alternativa de novo material para aplicação no design automotivo através de simulação computacional pelo Método de Elementos Finitos (MEF).

## **1.2 Delimitação do Tema**

A ênfase do trabalho está dirigida ao estudo da aplicação de espuma metálica no design de veículos urbanos compactos, mais especificamente no estudo de caso: chassi do veículo Sabiá 5, com o propósito de estudar o comportamento mecânico e possíveis alternativas de projeto e inovação com a aplicação deste material no design automotivo.

## **1.3 Problema**

Como reduzir o peso e o impacto de veículos urbanos compactos a partir do emprego da espuma metálica no design automotivo sem prejuízo à segurança e resistência mecânica dos mesmos?

Algumas variáveis deste problema são:

- Caracterização das propriedades físicas e mecânicas e aplicação da Espuma Metálica como material estrutural do chassi de veículo.
- Morfologia do Veículo Sabia 5 (Estudo de Caso).
- Validação da metodologia a ser aplicada.



- Viabilidade da Aplicação da Espuma Metálica.

## **1.4 Objetivos**

Visando o aperfeiçoamento e contribuição tanto na área acadêmica quanto industrial (aplicação do conhecimento acadêmico na indústria e conseqüente contribuição para a sociedade), esse trabalho pretende relacionar três áreas distintas do conhecimento, porém extremamente complementares: design industrial voltado ao setor automotivo, engenharia de materiais e/ou seleção de materiais e a simulação computacional através de *software* para análise do comportamento estrutural pelo método dos elementos finitos. Estas três áreas relacionadas apresentam-se como ferramentas para tomada de decisão de projeto e otimização de sistemas e/ou produtos.

O presente trabalho propõe-se a estudar, caracterizar e simular em ambiente computacional a aplicação de um novo material, no caso a espuma metálica, no design automotivo, mais especificamente em veículos compactos, como possível alternativa para redução do peso e impacto dos mesmos para demanda individual nos centros urbanos.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

Avançar os conhecimentos relativos à caracterização e análise de estruturas compostas por espumas metálicas com o desenvolvimento e aplicação de metodologia de desenvolvimento de produto através da utilização de *softwares* para seleção de materiais, modelagem tridimensional e simulação computacional através de análise pelo método dos elementos finitos. A metodologia é desenvolvida através de um estudo de caso de design automotivo, onde utiliza-se o chassi do veículo Sabiá 5.

Analisar o comportamento das espumas metálicas em comparação com outros materiais sólidos frequentemente utilizados, tais como aço e alumínio.

Propor a estruturação de um modelo para analisar a viabilidade de uso do novo material através de ferramentas, da área da administração de empresas, como modelos de planos de negócios.

Evidenciar a importância de projetos multidisciplinares através da interação e contribuição entre as diferentes equipes das referidas universidades através da troca de resultados das pesquisas desenvolvidas (UFRGS – UEMG), propiciando o crescimento e auxílio mútuo através de posterior troca de resultados finais das simulações e

conclusões estabelecidas através da comparação entre a simulação proposta neste projeto com a realizada com materiais tradicionais.

Despertar o interesse por novos materiais, sua caracterização e aplicações, além de ressaltar as responsabilidades e possibilidades de atuação dos designers no desenvolvimento de produtos com redução do impacto ambiental pela interação com outras áreas de conhecimento e apresentação das possíveis aplicações para estes materiais.

Fornecer material para consulta em bibliografia nacional através de publicações em periódicos e participações em congressos sobre o tema abordado, tais como:

- Apresentação de Artigo em Seminário: SEPEX - Seminário de Ensino Pesquisa e Extensão, com título: Caracterização, Processos de Fabricação e Aplicação de Metais Celulares e Espumas Metálicas – julho de 2008 – UFRGS – Porto Alegre – RS.

- Apresentação de Artigo em Congresso: P&D Design – 8º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design, com título: Caracterização a Aplicação de Metais Celulares e Espuma Metálicas no Design Automotivo, outubro de 2008 – São Paulo – SP.

- Artigo aceito para apresentação no 4º Workshop Design e Seleção de Materiais, com título: Estudo do emprego da Espuma Metálica no Design de Veículos Urbanos Compactos – Estudo De Caso Sabiá 5 – UEMG – 2009 – Redemat - Universidade Estadual de Minas Gerais – Ouro Preto – MG.

### **1.5 Hipótese da Pesquisa**

A aplicação da espuma metálica no design automotivo, mais especificamente, para veículos urbanos compactos pode ser validada como alternativa para a redução do peso e impacto causado pelo grande número de veículos individuais em circulação nos centros urbanos.

### **1.6 Justificativa**

O desenvolvimento e a pesquisa de novos materiais, mais sofisticados e especializados, a um custo mais acessível e dentro de uma cultura de preservação da natureza e maior qualidade de vida, onde o desenvolvimento seja um processo integrado

que considera o impacto no ambiente natural, desde a obtenção da matéria-prima, o processamento, a utilização e o descarte de um produto, demanda uma maior integração interdisciplinar entre os pesquisadores de diferentes áreas de conhecimento, além de uma comunicação efetiva com o mercado.

Apesar do enorme progresso realizado nos últimos anos através de pesquisas nas mais diversas áreas de conhecimento que tangenciam o design, ainda permanecem grandes desafios tecnológicos. É preciso pesquisar, conhecer, caracterizar e validar através da simulação computacional, por exemplo, a aplicação de materiais ainda mais sofisticados e especializados e, ao mesmo tempo, com possíveis aplicações no mercado que possibilitem a redução de seu custo e/ou de impacto ambiental, assim como propõe-se neste trabalho, com a utilização de espumas metálicas a sua aplicação no design Automotivo, uma vez que os automóveis tornaram-se símbolos de mobilidade e liberdade, tornando-se essenciais no dia-a-dia moderno. Assim, não é surpresa que este mercado seja hoje o maior conjunto de atividades de negócio do mundo e que, ao mesmo tempo, a expectativa mais frustrada do usuário é encontrar um caminho livre para trafegar, tanto nos centros urbanos quanto nas principais rodovias, e seu intenso movimento gera um desafio a ser solucionado por pesquisadores de diversas áreas, entre eles os designers.

Ainda, segundo Larica (2003), a taxa média de ocupação dos carros nas grandes cidades é de 1,4 usuário por veículo. E, ao considerar-se o baixo número de ocupantes por veículo, tem-se que reconhecer que o ônus da utilização do automóvel para o deslocamento individual é muito maior do que o bônus que proporciona, demandando pesquisas em busca de novas alternativas, o que justifica a pesquisa de novos materiais, processos e sistemas que possam auxiliar na busca pela solução deste desafio.

Na busca de novos materiais, as espumas metálicas vêm se mostrando fortes aliadas na construção de estruturas cada vez mais leves e resistentes, gerando economia e bom desempenho. Para Banhart (2000), atualmente, ainda existe carência de estudos computacionais e de bibliografia nacional publicada tratando da caracterização e aplicações estruturais para estes materiais, assim reafirmando a importância deste trabalho.

Ainda, a simulação computacional como ferramenta para o desenvolvimento de produto tem a capacidade de dar vida às idéias com o máximo de velocidade e confiabilidade fundamentais para a competitividade das empresas, proporcionando redução nos investimentos em testes e protótipos, melhoria na qualidade e

confiabilidade dos resultados com dados correlacionados com a realidade e, ainda, diminuição do tempo gasto com alterações do produto. Segundo ARBOR (2008), as simulações e protótipos virtuais podem ser até 95% mais econômicos que os modelos físicos.

### **1.7 Estrutura da Dissertação**

Em primeiro lugar, é importante ressaltar que este trabalho, mesmo inserido em uma estrutura de ensino do Design e Tecnologia, é também voltado para outras áreas de conhecimento como a Engenharia de Materiais, Engenharia Ambiental, entre outras. É essencial que engenheiros e designers, entre outras áreas de conhecimento, estejam cada vez mais atuando juntos para maior compreensão dos problemas e soluções a serem propostas. Assim sendo, este trabalho foi estruturado de maneira a permitir uma visão atual da caracterização e aplicação de espumas metálicas no design automotivo através de um estudo de caso.

Para tanto, este trabalho apresenta-se como descrito a seguir:

No Capítulo 1 pode-se verificar a Estrutura da Pesquisa assim como Introdução, Justificativa e Objetivos do trabalho.

No Capítulo 2, apresenta-se ao longo da Revisão Bibliográfica uma pesquisa com Conceitos Gerais sobre o Design, Design Automotivo e sua Evolução Histórica, A Indústria Automobilística no Brasil, Seleção de Materiais, Eficiência e Sustentabilidade Ambiental. Apresenta-se ainda uma visão mais completa sobre as Aplicações para Materiais Metálicos Celulares, conceitos gerais sobre Espumas Metálicas, seus Processos de Fabricação e Aplicação Industrial, principalmente no setor Automotivo.

No Capítulo 3, é apresentada a Metodologia de Trabalho: tipo e forma de pesquisa, o Objeto do Estudo de Caso, o Método para Coleta de Informações sobre o Material a ser aplicado, Modelagem e Simulação Computacional do modelo.

O Capítulo 4 dedica-se à Análise e Discussão das Informações Geradas pela Simulação Computacional, Considerações Finais bem como possibilidades para novas pesquisas e trabalhos futuros.

O Capítulo 5 compreende os elementos pós-textuais, tais como referências bibliográficas e os anexos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Introdução ao Design

Para Denis (2000), a palavra designer foi empregada pela primeira vez no século 17 pelo *Oxford English Dictionary*. Ainda do dicionário, design remete a plano, propósito e/ou projeto; concepção de um projeto ou modelo, planejamento; Segundo o dicionário Aurélio, (1999) ainda é produto de planejamento, ou seja, concepção, plano ou intenção de criar ou fazer alguma coisa. Poderia então ser definido como um esforço criativo relacionado à configuração, concepção, elaboração e especificação de algo, normalmente orientado por uma intenção ou objetivo, e/ou para a solução de um problema, ou seja, criação com intenção. Para Denis (2000), pensar então, que o design e o designer sejam produtos exclusivos de uma ou outra escola, do movimento modernista ou até mesmo do século XX, são posições que não suportam o confronto com as fontes históricas disponíveis. Denis (2000) defende ainda, que, historicamente, a passagem de um processo de fabricação em que um mesmo indivíduo concebe e executa o produto, para um outro, no qual existe uma separação nítida entre projetar e fabricar constitui um dos marcos fundamentais para a caracterização do design. Para ele, a conceituação tradicional expressa que a diferença entre design e artesanato reside justamente no fato de que o designer se limita a projetar o objeto a ser fabricado por outro profissional ou por meios mecânicos.

Design, de acordo com Löbach (2001), é uma idéia, projeto ou um plano para a solução de um problema determinado. É a concretização de uma idéia em forma de projeto ou modelo, mediante a construção e configuração, resultando em um produto industrial passível de produção em série. Ainda para Löbach (2001), Design Industrial é definido como um processo de adaptação dos produtos de uso, fabricados industrialmente, às necessidades físicas e psíquicas dos usuários ou grupos de usuários.

Para Bonsiepe (1992), design é a atividade projetual, responsável pelas características estruturais, estético-formais e funcionais de um produto para fabricação em série. Consiste no domínio no qual se estrutura a interação entre usuário e produto, para facilitar ações efetivas. Segundo Bonsiepe (1999), todo design é design de interfaces, no sentido de que o designer, em geral, não vai produzir a forma para que o produto funcione, mas sim a interação do produto com o usuário. Entende-se interface com o usuário como o mecanismo por meio do qual se estabelece uma comunicação

entre um dispositivo e o ser humano. Evidenciando assim a importância do desenvolvimento e emprego de metodologia para o design de produto:

“Segundo Platchek, os designers, nos dias de hoje, devem possuir uma visão global dos processos de desenvolvimento, pois a velocidade e a dinâmica que se impõem a eles pelo mercado, clientes, concorrentes ou pela indústria, exige uma flexibilidade muito grande e salienta a necessidade de dominar as várias formas de buscar e atingir o sucesso de um produto em um espaço de tempo mais curto possível. Tem-se várias metodologias de desenvolvimento de produto como ferramentas essenciais diante de um mercado tão competitivo e restrito e são fundamentais no processo de design, traçando diretrizes orientadas para o desenvolvimento de produtos e caracterizam-se por estudos de princípios e procedimentos fortemente orientados. Bomfim afirma que uma metodologia é necessária devido à complexidade crescente das variáveis envolvidas em um projeto e que métodos são ferramentas utilizadas no desenvolvimento de um produto e dependem sempre da capacidade técnica e criativa de quem os utiliza”.

(Marques, 2008)

Ainda, segundo Gomes (2003), é no design que todas as qualidades desejadas são planejadas, concebidas, especificadas e determinadas para o objeto, amarradas à sua natureza tecnológica e aos demais processos que fazem parte de sua produção. O design possibilita a concepção, a inovação, o desenvolvimento tecnológico e a elaboração de objetos que, dentro de um enfoque sistêmico, possibilite reunir integrar e harmonizar diversos fatores relativos à sua metodologia projetual.

## **2.2 Aspectos Gerais para a Aplicação da Seleção de Materiais**

Segundo Klein et al. (2006), durante milhares de anos os materiais naturais (madeira, pedras, ossos e peles de animais, etc) eram os únicos conhecidos e disponíveis e atendiam de forma rudimentar as necessidades do ser humano. Mais adiante, cerca de 5 mil anos a.c., o homem passou a fazer os primeiros utensílios domésticos com argila e, logo depois, passou a produzir os primeiros utensílios a partir de metais e ligas, desenvolvendo o arado, a carroça, as embarcações à vela. No início da era cristã o homem conhecia sete metais: cobre, prata, chumbo, estanho, ferro, mercúrio e ouro. Até meados do século XIX, o conhecimento existente acerca dos materiais era essencialmente empírico. A partir de então, passos maiores começaram a ser dados, permitindo estudos mais sistemáticos e, desta forma, rumando ao domínio dos materiais e de seus processos de fabricação e transformação, dando origem à Ciência dos Materiais e, posteriormente, à Engenharia de Materiais. Conforme Ljungberg (2007), estima-se que mais de 100.000 tipos de diferentes materiais compõem o cenário do

mercado industrial moderno, incluindo todas as variantes na composição dos materiais, nas misturas, em tratamento térmicos, etc, classificados em cinco grandes grupos: os metais, as cerâmicas, os polímeros, os materiais naturais e os compósitos.

Para Ashby (1999), os materiais são o que poderíamos chamar de recheio do design e os processos são o que dá a forma a esta matéria-prima do design. Assim, o profissional de design precisa selecionar, da melhor forma possível, os materiais e processos de fabricação mais adequados para concretizar seu projeto, sem deixar de lado que a materialização de uma idéia está diretamente ligada às potencialidades do material e às limitações dos processos de execução.

A partir disto, a inovação em design pode assim estar relacionada ao uso de um novo material, na combinação criativa da forma do produto possibilitada pelo novo material, com o(s) processo(s) produtivo(s) de um novo material ou ainda com a combinação de um novo material, seus diferentes processos produtivos e a possibilidade da criação de novas formas a partir dos mesmos. Estas, não só de produção, mas também de concepção de projeto. Neste caso, para Larica (2003), a inovação advém da combinação inteligente de variáveis, qualidades, possibilidades, tais como: forma, propriedades físicas e mecânicas (durabilidade, resistência, etc), cor, textura, estilo, ergonomia, conforto, facilidade de execução e uso, disponibilidade do material, vida útil, segurança, multiplicidade de uso, valor e valor agregado, reaproveitamento de material, reciclabilidade, tecnologia, etc.

Para Banhart (2001), as discussões mais recentes mostram que as aplicações mais promissoras são aquelas que fazem uso das várias propriedades do material, que demonstra-se ideal quando possui várias propriedades interessantes exploráveis ao mesmo tempo. Se somente o peso é tido como propriedade interessante em um novo material, existem outros já disponíveis e talvez até mais acessíveis. Se, porém, baixo peso é combinado à boa absorção da energia de impacto, bom isolamento acústico ou térmico e/ou resistência ao fogo, a competitividade deste material será significativamente maior. Portanto, cada nova possibilidade de aplicação deve ser bem avaliada e identificadas às propriedades essenciais necessárias. Cada novo material deve ter suas características definidas e comparadas com as de materiais já estabelecidos no mercado para que então outros critérios como custo e processos possam ser considerados para definir a solução preferível.

Para Ashby (1999), o design é o processo de traduzir uma idéia nova ou uma necessidade de mercado numa informação detalhada de que um produto pode ser

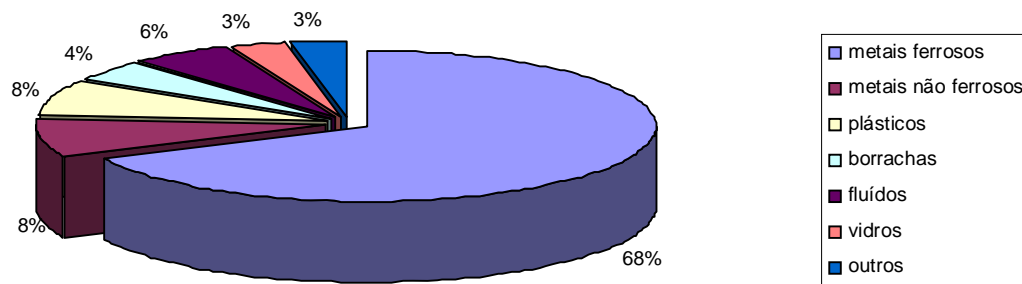
manufaturado. Cada um de seus estágios requer decisões sobre os materiais de que o produto deve ser feito e o processo de fazê-lo. Normalmente, a escolha de material é ditada pelo projeto, mas, às vezes, ocorre de outra maneira: o produto novo, ou a evolução do existente foram sugeridos ou se fizeram possíveis pelo material novo. A escolha do material não pode ser realizada independente da escolha do processo pelo qual o material é formado, unido, finalizado e de outra maneira tratado. Os custos entram tanto na escolha do material e na maneira como o material é processado. Em quase todas as aplicações desde automóveis a aviões, a forma, a textura, a sensação, a cor, a estética do produto e a satisfação dada às pessoas que o compram ou usam são importantes. Os problemas de design não têm uma única ou “correta” solução, embora algumas soluções são claramente melhores que outras. Então a primeira atitude que o designer necessita é ter a mente aberta para considerar todas as possibilidades.

### **2.3 Seleção de Materiais em Design Automotivo**

O universo dos meios de transporte, entre eles o automóvel, oferece um grande campo para pesquisa e aplicação de novos materiais, principalmente por seu volume de produção e comercialização. Segundo a Anfavea (2006), só o Brasil, teve mais de 36.000.000 de automóveis em produção acumulada desde 1957 e tem hoje capacidade instalada para produzir 3,5 milhões de veículos por ano.

A competição entre os fornecedores de matéria-prima para indústria automotiva foi acentuada com a chegada dos novos materiais, tais como os plásticos e compósitos, que entraram em concorrência com os materiais tradicionais existentes, estimulando o desenvolvimento de propriedades e possibilidades de novas aplicações. A cada novo lançamento de um veículo no mercado, o percentual de materiais tradicionais, tais como chapas e perfilados metálicos galvanizados, peças em ligas metálicas ferrosas (aço carbono, ferros fundidos, etc), peças em ligas metálicas não-ferrosas (ligas de alumínio, magnésio, cobre, etc), elastômeros, borrachas, vidros e tecidos, vêm sendo alterados (Gráfico 01). Estes materiais, que compõem o peso total do veículo, vêm sendo substituídos por materiais mais leves, com multiplicidade de uso e com um maior ciclo de vida, por exemplo.





**Gráfico 01: Peso dos materiais em um automóvel**

Fonte: Anfavea (2006).

Para Larica (2003), os materiais metálicos utilizados na fabricação de veículos são: chapas e perfilados tratados superficialmente e peças em ligas metálicas ferrosas e não-ferrosas. A estrutura do veículo, seus componentes mecânicos principais (motor, transmissão e suspensão) e o seu conjunto de vidros são as partes mais influentes na determinação de seu peso próprio. Segundo Boletim Alcoa – 10ª edição (2008), a BMW Série 7 já tem travessas da suspensão em alumínio, por exemplo. O Corvette Z06 (Figura 01) da GM tem seu chassi (estrutura do teto e perfil do chassi) em alumínio extrudado pela Alcoa para aumentar a performance do carro, que somado a outras aplicações possibilitou quebrar a barreira de 0 a 100km/h em 3,7 segundos. Uma solução realmente nova, tanto para a Alcoa quanto para a GM.



**Figura 01: Corvette Z06 da GM.**

Fonte: Alcoa (2008).

No começo do século XX, a tensão máxima aceitável para um bom tipo de aço era de 9kg/mm<sup>2</sup>. Em 1960 se alcançava de 16 a 18kg/mm<sup>2</sup>. Hoje, segundo Boletim Alcoa – 10<sup>o</sup> edição (2008), já se alcança 27kg/mm<sup>2</sup>, comprovando o desenvolvimento obtido com estes que são os mais antigos materiais usados para criar leveza e resistência ao mesmo tempo. A disponibilidade de aços de alta performance foi determinante para este avanço. Estes estão substituindo os aços tradicionais em aplicações que exigem redução de peso. Outras ligas metálicas também tem avançado bastante, como as de alumínio, magnésio e titânio, que competem com os materiais compósitos.

De acordo com ABAL (2008), os automóveis modernos são fonte de oportunidade para teste e aplicação de novos materiais e novas tecnologias de engenharia. Assim como o Corvette C06, o Audi A8, tem a estrutura de seu monobloco em alumínio (*ASF – Audi Space Frame*), também desenvolvido em conjunto com a Alcoa. Em 1984, a companhia alemã apresentou a primeira carroceria totalmente em alumínio e, em 1991, criou o protótipo Audi Avus, o primeiro carro com este conceito. Mas foi o A8 o primeiro veículo com *space frame* em alumínio produzido pela Audi em grande escala, em 1994. O veículo representou um marco na história da Audi e desde então é referência na aplicação do metal. Mais de 100 mil unidades do primeiro modelo foram produzidas com toda a estrutura em alumínio, numa colaboração com a Alcoa.

Segundo ABAL (2008), a primeira versão do A8 tem 14% em peças fundidas, 22% em perfis extrudados e 64% de chapas (porta, peças internas, painéis de alumínio estampados). Com essas aplicações, a fabricante conseguiu desenhar um carro que pesa cerca de 250 kg a menos do que um similar em aço. Comparada com o primeiro modelo, a carroceria da nova versão envolve uma drástica redução do número de componentes, obtida por meio de um grande número de elementos multifuncionais produzidos por injeção.

Todas essas tecnologias e, principalmente, o desenvolvimento delas resultam num custo em média 30% superior à fabricação de carros em aço, segundo Luis Bouças em entrevista à ABAL (2008). No entanto, uma vez que os vários elementos que compõem a carroceria *space frame* são independentes, cada um deles pode ser desenhado e construído de maneira diferente, com tecnologia de produção e materiais distintos. Esses fatores permitem um alto grau de especialização e um nível notável de otimização dos componentes em relação as suas funções, com uma redução drástica do número de componentes, o que reduz o peso do veículo em até 40% e aumenta da flexibilidade da estrutura, como visto a seguir:

“O uso conjugado de chapas, perfis (extrudados) e fundidos, todos distribuídos em pontos adequados, melhora a absorção de impacto no caso de colisão. A deformação do alumínio absorve melhor o impacto e é mais resistente à deformação que o aço. Isto acontece porque as estruturas de alumínio oferecem excelente performance, já que, em geral, perfis tubulares, que colapsam na direção lateral, formam dobras, produzindo excelente resposta às colisões frontais, e garantindo mais de 50% de economia de peso para a mesma quantia de energia dissipada. Por ser muito mais leve que o aço, o alumínio possibilita a produção de uma estrutura mais reforçada que garante melhor proteção nas colisões dianteiras e laterais. Além de mais leve e seguro, o material torna o veículo mais resistente, eficiente e econômico.”

ABAL (2008)

Já o novo Audi TT (Figura 02). tem 69% de alumínio em sua estrutura – sendo 22% de alumínio fundido, 16% de perfis extrudados, 31% de chapas de alumínio –, 31% de chapas de aço, usadas na parte traseira, nas portas e na tampa do porta-mala do veículo. Segundo ABAL (2008), entre o Audi A8 e o Audi TT, aumentou-se o número de perfis e de componentes fundidos, principalmente para aumento da segurança. Mas a última palavra em tecnologia ASF é o novo Audi R8, com carroceria 100% em alumínio e peso de 210 kg.



**Figura 02: Tipos de Aplicação do alumínio no Audi TT.**

Fonte: ABAL (2008).

## 2.4 Eficiência e Sustentabilidade Ambiental

Segundo Marques (2008), fundamental para o crescimento de qualquer setor da atividade humana, o desenvolvimento sustentável alia três grandes objetivos: econômicos, sociais e ambientais. Nos objetivos econômicos, a prioridade está na criação de iniciativas que garantam o crescimento do setor, agregando valor e eficiência nos processos e constante inovação. Nos objetivos ambientais, a indústria deve estruturar o seu progresso também no cuidado com o meio ambiente, contribuindo para a garantia da manutenção do eco-sistema, do clima, da biodiversidade, utilizando para isso sua capacidade técnica e intelectual. Por fim, são objetivos sociais, para garantir o desenvolvimento sustentável na indústria, a inclusão social, o trabalho pela igualdade de condições de progresso social, a manutenção da identidade cultural e o desenvolvimento institucional.

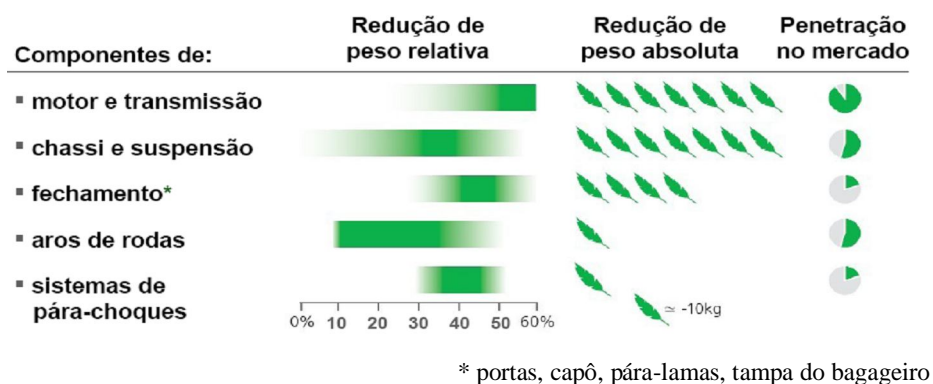
Para Larica (2003), existem milhões de veículos em circulação no trânsito das grandes cidades do planeta. A produção e uso diário destes veículos provoca um enorme impacto ambiental devido à extração exaustiva de minérios e combustíveis fósseis, associado à emissão em volumes crescentes de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CFC'S e outros gases que provocam o aquecimento global e redução da espessura da camada de ozônio, sendo assim muito importante toda e qualquer chance de redução destes impactos ambientais. O designer tem a possibilidade de influenciar o comportamento do homem e regular os anseios da sociedade de consumo nestas mudanças através de soluções criativas no projeto de produtos e sistemas, no uso de materiais, no aumento da vida útil dos produtos e no planejamento do ciclo de vida dos produtos e materiais aplicados. O designer deve ter consciência deste “poder” e assim assumir sua responsabilidade criativa, reformulando conceitos e padrões, projetando para o desenvolvimento sustentável tanto na extração da matéria-prima, processo produtivo (entre eles consumo de energia para o processo e geração de resíduos), quanto no uso efetivo do produto e no seu descarte e possível novo uso (ciclo de vida), atendendo à demanda de seus usuários da melhor forma possível, mas sem exageros e/ou desperdícios. Ou seja, atender às necessidades da geração presente sem comprometer as futuras gerações.

Segundo ABAL (2008), o uso do alumínio reduz o peso dos veículos, que, mais leves, consomem menos combustível e, conseqüentemente, emitem menos poluentes. Estudos demonstram que as principais vantagens do alumínio para a indústria

automotiva são: segurança, economia, dirigibilidade, reciclagem, durabilidade e leveza. O mesmo potencial tem-se com o emprego de espumas metélicas em alumínio. Com o crescimento do mercado, haverá ganho de escala, o que tornará cada vez mais viável a introdução de componentes com outros materiais, como os metais celulares, principalmente em peças de segurança passiva.

Em analogia com o alumínio, material leve e que proporciona ganhos semelhantes a outros materiais leves como a espuma metálica, a aplicação do alumínio permite reduzir em mais de 400 kg o peso de um automóvel de tamanho médio, reduz cerca de 700 kg o peso da carroceria de um ônibus ou de um caminhão de porte médio e em até 3 toneladas o peso de um caminhão tanque - ABAL (2008).

Cada 10% de redução de peso nos veículos representa um aumento de 5 a 10% em eficiência de combustível, e reduzindo o peso dos veículos em 100 kg, é possível reduzir a emissão de CO<sub>2</sub>, durante suas vidas úteis, em 2,3 toneladas para automóveis, 5,2 toneladas para ônibus urbanos e 6,3 toneladas para caminhonetes. Esta redução pode ser comparada com a penetração no mercado do material utilizado conforme a figura 03.



**Figura 03: Comparativo entre Redução de peso e Penetração no Mercado.**

Fonte: ABAL (2008).

Também utilizando o Alumínio como material análogo as espumas metálicas, por sua redução de peso, segundo ABAL (2008), um veículo compacto pesa em média 1250 kg e consome em média 13,3 km/litro de gasolina com bloco de motor em ferro fundido (peso de 31kg). Com o mesmo bloco de motor em Alumínio tem-se uma redução efetiva de peso de 18kg. Desta forma reduz suas emissões em 150kg de CO<sub>2</sub> após 100mil km rodados por veículo e 328kg de CO<sub>2</sub> após 200 mil km rodados por veículo.

Segundo Ashby (2002), o valor economizado com aplicação de materiais mais leves no design de transportes pode chegar de US\$ 0,50 a 1,50 por quilo em um veículo familiar a US\$ 10.000,00 em um veículo espacial, conforme a Quadro 01.

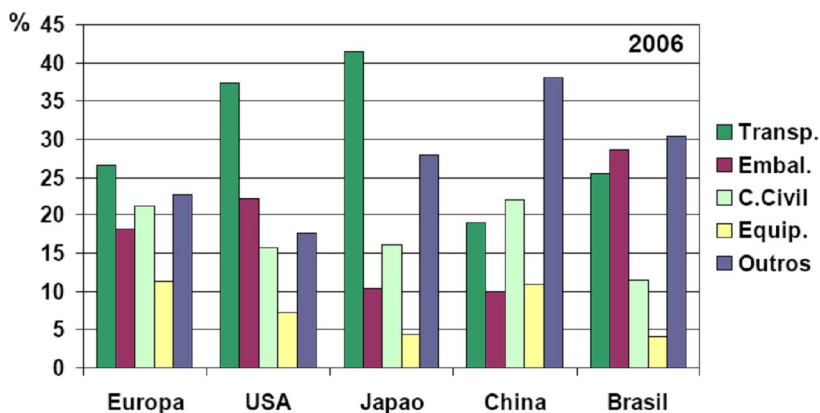
Sistema de Transporte	US\$ (\$/kg)
Veículo Familiar (economia de combustível)	0,50 – 1,50
Caminhão (vida útil)	5,00 – 10,00
Avião Civil (vida útil)	100,00 – 500,00
Avião Militar (Performance e vida útil)	500,00 – 2.000,00
Veículo Espacial (vida útil)	1.000,00 – 10.000,00
Bicicleta (Performance)	1,00 – 1.000,00

**Quadro 01: Economia com a redução de Peso em Veículos de Transporte.**

Fonte: Ashby (2002).

Estes dados, acima citados, são referências de componentes em alumínio maciço. Se desta forma já se comprovam as grandes vantagens da redução do peso nestas peças, com a fabricação das mesmas com metais celulares, os ganhos potencialmente serão ainda maiores.

Segundo a ABAL (2008), o setor automotivo e de transportes é o maior consumidor de alumínio no mundo e o segundo maior consumidor do metal no Brasil. Com base no gráfico 02, podemos analisar e concluir a importância da indústria de metais leves no Brasil, a potencial demanda do mercado quanto a estes materiais e como outros países mais desenvolvidos, tecnologicamente, como o Japão e Estados Unidos da América, aplicam estes materiais principalmente na indústria automotiva.



**Gráfico 02: Utilização do Alumínio na Indústria Mundial.**

Fontes: ABAL (2008).

“A cada ano, milhões de carros em todo o mundo chegam ao fim da vida útil ou batem e ficam imprestáveis. (...) Só na Europa, são nada menos de 12 milhões de carros inúteis por ano. Na Itália (que tem o tamanho aproximado do Rio Grande do Sul), 1,3 milhão unidades, contra cerca de 1,7 milhão de novos carros que chegam às ruas. O problema avolumou-se a ponto, recentemente, de as montadoras se verem obrigadas a assumi-lo pelo reaproveitamento máximo, e programado, dos materiais que compõem os carros – em outras palavras, reciclagem. A idéia é simples: se tudo que vai no carro for programado para ser reaproveitado, não haverá mais lixo. E, de quebra, é possível economizar matéria-prima e energia.”

Botelho, R. (2003)

Conforme o texto citado acima e visto nos quadro 01 e Gráfico 02 apresentados anteriormente, hoje existem duas grandes vertentes para aplicação de novos materiais no design de transportes, entre eles o automotivo e que levam em conta a eficiência e o desenvolvimento sustentável. Primeiro, a utilização de materiais mais leves do que os convencionais, reciclados, recicláveis e quando possível, de fontes renováveis. A segunda vertente está no desenvolvimento de pesquisas e conceitos de veículos que propiciem uma desmontagem mais eficiente, bem como o ganho no seu processo de fabricação e de reciclagem, como, por exemplo, na fabricação de peças em seu formato 3D (tridimensional) final como podem ser feitas as chapas em espumas metálicas. Este tipo de material ganhou muito espaço no mercado atual, inclusive no meio automotivo, que visa reduzir perdas nos processos produtivos e maximizar ganhos.

## **2.5 Evolução Histórica dos Meios de Transporte**

Segundo Faria e Louzeiro (2003), na Antigüidade, o homem sempre procurou criar instrumentos que atendessem as suas necessidades de sobrevivência, bem-estar e de conforto: habitação, indumentária, recipientes, instrumentos e armas, bem como o transporte. Os meios de transporte podiam ser classificados em aquáticos e terrestres.

O primeiro vestígio de transporte aparece no Mesolítico Escandinavo, com um tipo de canoa. No Neolítico, as provas referem-se apenas aos transportes aquáticos. A Idade do Cobre apresenta além de barcos maiores, alguns tipos de transportes terrestres. De início o homem utilizou troncos, cabaças e peles cozidas e infladas para flutuar ou sustentar-se sobre as águas: o material varia entre troncos de árvore, bambu, junco, cascas de árvore, cortiça e couro, entre outros. Surgiram embarcações ligadas ao tipo de atividade econômica, ao material disponível e à predileção da cultura. No entanto, para Faria e Louzeiro (2003), o meio de locomoção mais antigo e rudimentar é o próprio ato

de caminhar. Utilizando sua própria força motriz (corpo), o homem vencia longas distâncias carregando seus bens e artefatos sobre os ombros ou arrastando-os. A princípio, o homem se locomovia a pé e descalço. No entanto, sua capacidade inventiva o levou a criar artefatos para proteção dos pés. Com a domesticação dos animais, tais como cão, cavalo, rena, burro, camelo, boi, búfalo, elefante, lhama, etc, o transporte terrestre cresceu pois o homem percebeu que poderia usar a força animal para sua locomoção e o transporte de carga. Os *travois*<sup>1</sup> foram outro tipo de transporte terrestre encontrado entre os índios da América do Norte e no Velho Mundo, da China à Escandinávia e às Ilhas Britânicas, puxados por cães ou por cavalos e na traseira duas vigas ou traves entre as varas para embarcar a carga.

O grande avanço para os transportes terrestres aconteceu com a invenção da roda na Mesopotâmia, antes de 3000 a.c. De início sólida, pesada e rudimentar, a roda foi aplicada em carros tracionados por animais de grande porte. Os novos meios de transporte, criados à medida que se aperfeiçoava a roda, permitiam melhor locomoção do homem e os antigos caminhos eram transformados em verdadeiras estradas para permitir o deslocamento mais rápido.

Segundo Modernell (1989), o historiador grego Heródoto (484 - 425 a.C.) menciona em seus escritos que os caminhos de pedras mais antigos de que se têm notícia, há mais ou menos 3.000 a.C., foram assentados pelo rei egípcio Quéops, por onde se transportaram os imensos blocos destinados à construção das pirâmides. Desta mesma época, foram encontrados na tumba da Rainha da cidade de Ur um conjunto de quatro rodas ligadas por eixo do tipo que necessitavam de estradas. Entre os povos antigos, pelo menos dois realmente construíram estradas procurando unir todo o seu império: os persas e os romanos.

Conforme Faria e Louzeiro (2003), os romanos foram os grandes peritos em construção de estradas. À medida que iam estendendo suas conquistas, iam construindo estradas. Possuíam uma rede de 80.000 km de estradas para o ocidente na Gália, na Espanha e até na Inglaterra e para o oriente construíram estradas na Grécia e na atual Iugoslávia. Era uma extensa rede viária, no total, com mais de 350.000 km de estradas sem pavimentação. Daí o velho ditado: todos os caminhos levam a Roma. Ainda existem alguns trechos destas quase como um monumento.

---

<sup>1</sup> Criado na pré-história, o *travois* é um dos dispositivos de arrasto extremamente primitivo. É composto por duas varas longitudinais, presas por travessas, formando uma armação em forma de "H" ou "A" sobre a qual a carga é colocada. As varas são presas ao dorso de um animal, por exemplo, um cavalo ou um cão.



A partir do momento que se criaram os elementos básicos do sistema viário – os veículos e as estradas, surgiu o trânsito e seus problemas. Foi na Grécia Antiga que aconteceram os mais intensos congestionamentos. Na antigüidade, em Atenas, a largura das ruas era insuficiente e alargá-las seria inútil, uma vez que o volume de tráfego tenderia a crescer. Assim, desde a antigüidade, já estava claro o impacto de privilegiar-se o veículo individual.

No império Romano, havia preocupação em resolver os problemas de trânsito. Foi onde surgiram sinalizações, marcos quilométricos, indicadores de sentido e as primeiras regulamentações de tráfego.

Para Faria (2003), no primeiro século a.c., o congestionamento em Roma fez com que um dos primeiros atos de Júlio Cezar foi banir o tráfego de rodas do centro da cidade, durante o dia e permitir a circulação de veículos oficiais e os pertencentes aos patrícios.

Durante a Idade Média, cada comunidade cuidava da própria subsistência, não havendo utilidade em transportar mercadorias. Os feudos eram autônomos e não cuidavam das estradas. Dentro do feudo estas eram cuidadas pelos camponeses.

No fim do século XVII a “rede viária” da Europa se resumia em trilhas abandonadas. Os mercadores carregavam suas mercadorias em burrinhos e os nobres viajavam a cavalo. Conforme os estados nacionais iam se formando e o comércio se desenvolvendo, possuir boas estradas tornou-se uma necessidade para todos os países.

De acordo com Larica (2003), durante séculos, até o final do século XIX, as viagens terrestres eram feitas a pé, a cavalo ou em veículos de tração animal. Os centros urbanos tinham áreas limitadas e com população muito concentrada para que não fosse preciso grandes deslocamentos. A partir de 1890, o uso de uma frota crescente de veículos com tração animal começou a mudar o desenho de cidades como Londres, expandindo a ocupação dos centros urbanos. A invenção do bonde no final do século XIX foi o impulso maior para o crescimento urbano, estendendo o raio de ocupação urbana para 20km. A eletrificação dos sistemas tornou-os mais rápidos, limpos e atraentes. Com o desenvolvimento dos transportes automotivos e aéreos as ferrovias, muito desenvolvidas no início do século XX, perderam força. Os trilhos não alcançam todos os destinos e nem estavam onde está o movimento, mas é inegável a capacidade de transporte deste sistema. Com a invenção do automóvel o raio de ocupação das áreas urbanas aumentou para 40km. Com o aumento do uso de automóveis como meio de transporte individual, os usuários passaram a ser passageiros de rodovias em vez de

ferrovias e o adensamento do tráfego de veículos provocou enormes pressões no sistema viário.

“De 40% a 50% das áreas de um centro comercial urbano importante tem que ser destinadas a ruas, passeios e estacionamentos. O aumento do congestionamento vem diminuindo gradativamente a velocidade média de deslocamento nas grandes cidades e rodovias de acesso. ...Saturação das ruas, acidentes de trânsito, ruídos excessivos, poluição e muitos outros, são problemas diretos e indiretos causados pela exacerbação do uso do automóvel. O automóvel é símbolo de status, todo mundo quer usar e dirigir o seu próprio carro. Todo motorista torce pela implementação de um meio de transporte alternativo, para que o sujeito do carro da frente no congestionamento passe a usá-lo e deixe a rodovia mais livre só para ele.”

Larica, (2003).

Segundo Ribeiro (2006), no começo do século XX os automóveis eram basicamente conjuntos de maquinaria rudimentar unidos sem qualquer preocupação estética, nos quais os passageiros viajavam sem conforto, expostos à poeira e às intempéries do tempo. Atualmente, os automóveis mudaram tão radicalmente quanto o seu impacto na sociedade. O desenho dos automóveis é resultado de complexas e múltiplas influências: desde as tendências da moda até ao progresso tecnológico, que aumentaram a eficiência e reduziram o tamanho dos veículos; dos primitivos processos de fabricação até à aerodinâmica, do rigor da legislação, sem esquecer do controle de custos até a satisfação dos anseios e desejos a cada nova geração de consumidores de automóveis. O automóvel moderno é resultado de um processo evolutivo, no qual seu antecessor era a carruagem, o carro puxado a cavalos, onde foi inserido um motor a vapor. Foram numerosas as influências que condicionaram a forma do automóvel. Ele é o resultado de progressos e retrocessos, tendências e limitações desenvolvidas por técnicos, artistas e legisladores.

O ano de 1908 foi marcado pelo primeiro carro produzido em verdadeiras linhas de montagem do mundo, o modelo T da Ford, o Tin Lizzie, se tornando um marco na história do século XX. O Ford T foi produzido durante dezenove anos, tendo sido fabricados 15.007.003 automóveis desse modelo entre outubro de 1908 e maio de 1927.

E o número de carros deve continuar aumentando. Segundo Larica (2003), estima-se em 700 milhões o total de carros no mundo e este valor tende a dobrar em 25 anos. As conseqüências deste aumento são: aumento da poluição, degradação da

qualidade de vida nas cidades, consumo excessivo de energia, utilização de áreas urbanas cada vez maiores para circulação e estacionamento de carros.

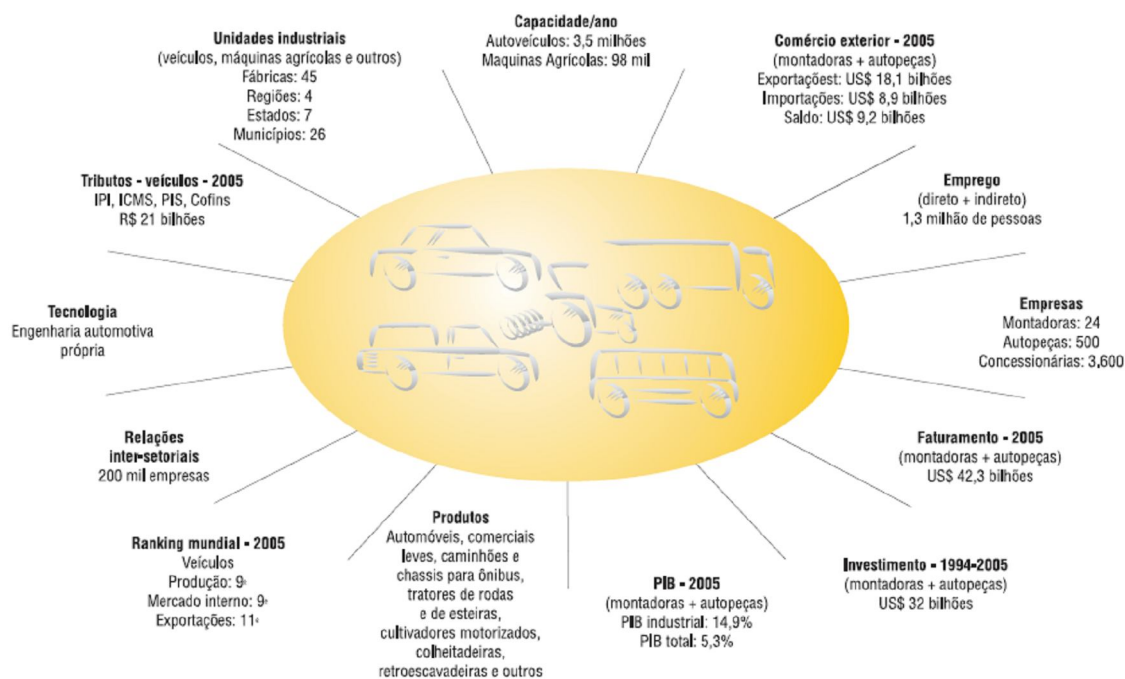
### **2.5.1 A Indústria Automobilística no Brasil**

“Quando, em 16 de agosto de 1956, o então presidente da República Juscelino Kubitschek de Oliveira formalizou a criação do Geia, Grupo Executivo da Indústria Automobilística, com o objetivo de estimular a fabricação local e não somente a montagem de veículos no Brasil, certamente não teria como imaginar o vulto que aquela sua iniciativa acabaria adquirindo.”

(Anfavea, 2006)

Hoje, passados 50 anos, o setor automotivo instalado no País apresenta números de fato impressionantes: são 24 diferentes montadoras abastecidas por mais de quinhentas empresas de autopeças. Trata-se de um complexo industrial com capacidade instalada para produzir 3,5 milhões de veículos e 98 mil máquinas agrícolas/ ano - produtos que são comercializados por uma rede de 3,6 mil concessionários, espalhados por todo o território nacional. Em seu conjunto, é agora, um setor que responde direta ou indiretamente pelo emprego de 1,3 milhão de pessoas. É um setor que faturou em 2005 US\$ 42,3 bilhões – incluindo autopeças -, US\$ 18,1 bilhões dos quais vieram de exportações, gerando um saldo de comércio exterior da ordem de US\$ 9,2 bilhões.

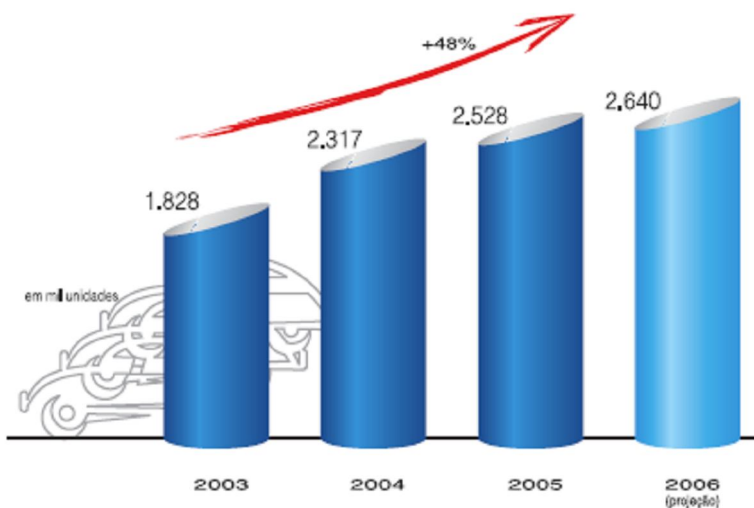
O Brasil conta, atualmente, com 45 diferentes plantas industriais, distribuídas por sete estados e 26 municípios. São fábricas que produzem todo tipo de veículos, de automóveis e comerciais leves a caminhões, ônibus, tratores e colheitadeiras. Veículos cuja produção e comercialização recolheram R\$ 21 bilhões aos cofres públicos, só no ano de 2005, com a cobrança de IPI, ICMS, PIS e Cofins. (Figura 04).



**Figura 04: Indústria Automobilística Brasileira em Grandes Números.**

Fonte: Anfavea, 2006.

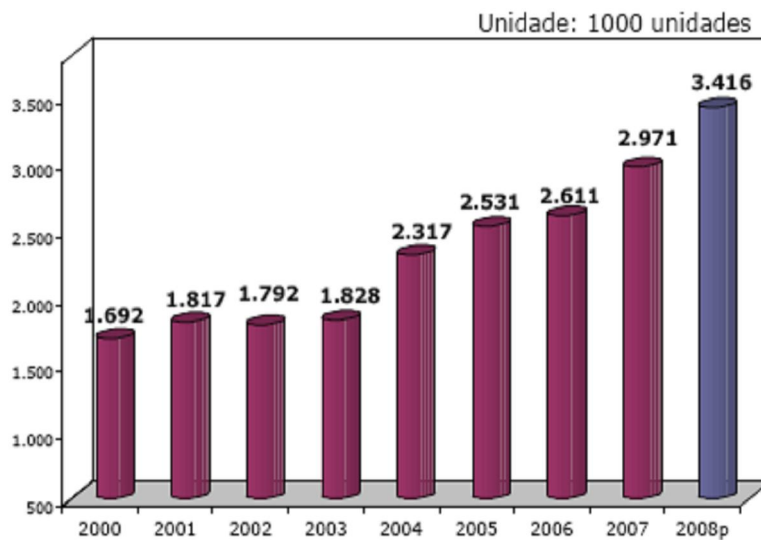
Desde 1957 - quando a primeira fábrica da nova fase entrou em operação - até dezembro de 2005, foram produzidos no Brasil 36,1 milhões de automóveis, 6,8 milhões de comerciais leves, 2,8 milhões de caminhões e 613 mil ônibus, totalizando 46,4 milhões veículos (Figura 05).



**Figura 05: Crescimento da Produção de Autoveículos no Brasil.**

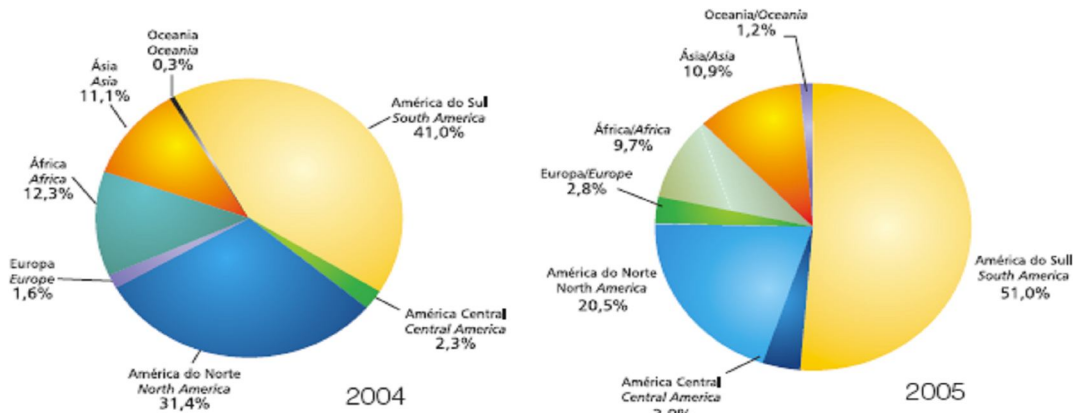
Fonte: Anfavea, 2006.

A produção de veículos no País explodiu nos últimos quatro anos, impulsionada pela demanda aquecida e exportações. De acordo com a Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores - Anfavea (2008), só nos seis primeiros meses de 2008 o Brasil produziu 1,69 milhão de unidades, ou 93,9% de toda a produção do ano de 2003 inteiro (Gráfico 03).



**Gráfico 03: Aumento de 76% na Produção de Autoveículos: de 2000 a 2007. (p) – previsão.**  
Fonte: Anfavea (2008).

Segundo a Anfavea (2008), a produção de automóveis no País no primeiro semestre deste ano, ultrapassou a França e atingiu o sexto lugar no ranking dos maiores produtores, atrás somente de Coreia do Sul (2,08 milhão), Alemanha (3,31 milhões), EUA (4,89 milhões), China (5,2 milhões) e Japão (6,06 milhões). Segundo estimativas da Anfavea, o investimento das montadoras em expansão da capacidade deve ser de US\$ 5 bilhões. Até 2010, juntando o setor de autopeças, os recursos aplicados em produção devem chegar a US\$ 20 bilhões, projetou a entidade. Bem apoiada em tais números, a indústria automotiva instalada no Brasil entra agora numa nova fase ainda mais ambiciosa. Além de exportar veículos e componentes para todos os continentes, passa a incluir também serviços de engenharia em sua pauta de exportações (Gráfico 04). Vale dizer que não chega a dez, em todo o mundo, o número dos países com tal capacitação tecnológica.



**Gráfico 04: Exportações por Continente de Destino – Unidades.**  
 Fonte: Anfavea (2006).

### 2.5.2 Estrutura e Design Automotivo: Chassi

Segundo Gonçalves e Ferreira (2005), na história do automóvel, a sua estrutura tem sofrido um grande número de alterações, principalmente devido ao desenvolvimento tecnológico, mudanças organizacionais, etc. Dentre estas alterações destacam-se o desenvolvimento de novas tecnologias e de novos materiais com preocupação com o ambiente natural segurança, custo, desempenho, etc.

O chassi é o suporte do veículo. É sobre ele que se montam a carroçaria, o motor, a ele se prendem as rodas, sendo a própria estrutura do veículo mais utilizada em automóveis por volta de 1900, onde consistia na montagem de um corpo separado da estrutura rígida que suporte o motor, transmissão e eixos. Esta estrutura ainda hoje é válida e atual. Em geral, é constituído por duas longarinas de aço, paralelas, com um "X" ou travessas, no meio. O "X" ou barra melhora a resistência à torção. É importante que o chassi resista bem à torção, para impedir que a carroçaria também se torça: isto levaria a movimentos das portas, podendo até abri-las (Figura 06).



**Figura 06: Chassi -longarinas paralelas de aço.**  
 Fonte: wikipedia (2008).

Para Gonçalves e Ferreira (2005), chassi tem o mesmo significado que suporte, estrutura. Sempre que se monta uma máquina, ou um instrumento, o suporte sobre o qual é montado o conjunto recebe o nome de chassi. Os esforços que o chassi sofre, quando o veículo está andando, são violentos e, por isso, ele deve ter um formato que seja resistente. O chassi não deve deformar-se (torcer) nem permitir que a carroçaria se deforme (Figura 07).



**Figura 07: Estrutura do chassi tipo skate – GM.**  
Fonte: Gonçalves e Ferreira (2005).

No entanto o automóvel aumentou a sua complexidade e as exigências de redução de peso tornaram este tipo de estrutura menos viável. Para a maioria dos pequenos veículos de passageiros foi adotada uma construção monobloco nos anos 60. O chassi continua sendo utilizado em veículos maiores ou de trabalho de peso.

A estrutura monobloco (Figura 08) é um tipo particular de estrutura *spaceframe* que foi desenvolvida no período pós-guerra. O Ford CÔnsul introduziu uma evolução na estrutura monobloco denominada *unibody*. Neste sistema, painéis separados continuam a ser utilizados, mas aparafusados ou rebitados a uma casca estrutural, de modo a contribuir para uma integridade estrutural global do veículo. Este tipo de técnica de construção é dominante na indústria automotiva, com cerca de 95% de utilização.



**Figura 08: Estrutura Monobloco – Hyundai Accent.**  
Fonte: Gonçalves e Ferreira (2005).

Segundo Gonçalves e Ferreira (2005), nos veículos com estrutura do tipo monobloco, todo o conjunto trabalha, onde utiliza a casca do objeto como suporte para a maioria das cargas aplicadas na estrutura. Assim, esforços são suportados, simultaneamente, pelo chassi e pela cobertura. Esse sistema encontra, hoje, larga aplicação, inclusive em diversas marcas de caminhões, como o Mercedes Bens monobloco 0-400. Alguns modelos de veículos não possuem um chassi propriamente dito. A própria carroçaria une-se ao plano do assoalho formando um único conjunto. Por isto, essas estruturas são chamadas de monoblocos. A primeira aplicação deste tipo de estrutura na indústria automotiva foi em 1923 no Lancia Lambda (Figura 09). A Citroën produziu o primeiro veículo em série com estrutura monobloco em 1934, o inovador Tractio Avant. Carroceria é toda a cobertura que proporciona aos ocupantes, a proteção adequada contra sol, chuva, vento, poeira, etc. Pode ser construída separadamente e presa ao chassi, ou pode, como citado anteriormente, formar com o assoalho um conjunto monobloco.



**Figura 09: Automóvel Lancia Lambda.**

Fonte: wikipedia (2008).

A vantagem disto sente-se imediatamente no peso, pois uma carroceria monobloco é bem mais leve. Este sistema é utilizado de pequenos a grandes veículos.

Segundo Gonçalves e Ferreira (2005), a estrutura *Spaceframe*, originalmente desenvolvida para carros de elevada performance, como o Maseratti no final dos anos 50, tem os painéis exteriores da estrutura *spaceframe* ligados à estrutura metálica extrudida, oferecendo flexibilidade em termos de produção e montagem. Os *spaceframes* (Figura 10) atuais podem ser construídos a partir de alumínio ou extrusões



de aço podendo tirar partido da tecnologia através de painéis compósitos e colagens através de adesivos estruturais.



**Figura 10: Estrutura tipo Spaceframe – Audi A8.**

Fonte: Gonçalves e Ferreira (2005).

Para Gonçalves e Ferreira (2005), a primeira estrutura em compósito surgiu em 1981 no McLaren MP4-1. Embora a fibra de carbono possua elevada qualidade estrutural esta não é muito utilizada devido ao seu custo elevado e tempo de produção. Mesmo que os custos do material fossem reduzidos, haveria outros problemas como o demorado processo de fabricação (Figuras 11 e 12).



**Figura 11: Estrutura em compósito (fibra de carbono) – Porsche Carrera GT.**

Fonte: Gonçalves e Ferreira (2005).

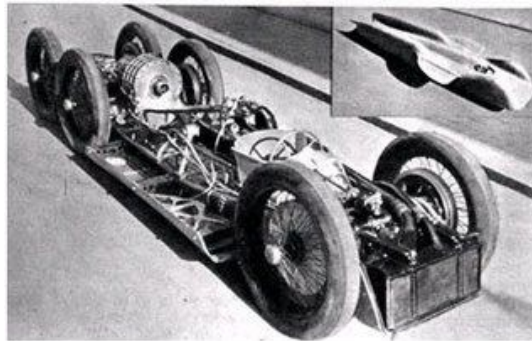


**Figura 12: Chassi misto fibra de carbono e *honey comb* Nissan P35 1993.**

Fonte: wikipedia (2008).

### 2.5.2.1 Chassi de um veículo de competição

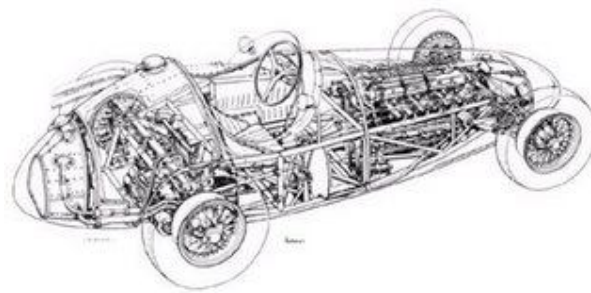
Uma das funções do chassi de um carro de competição (Figura 13) é ligar os componentes do carro e servir como habitáculo para o piloto. Ele deve ser leve, mas forte e rígido. Os primeiros chassis, tanto os utilizados nos carros de turismo quanto os dos carros de competição, consistiam em duas longarinas ligadas por travessas. Tem-se como bom exemplo os carros da Auto Union com duas travessas longitudinais, ao contrário do que era comum, com perfil circular, unidas por elementos transversais. Muitas vezes, os tubos de grande diâmetro, serviam de reservatório de óleo.



**Figura 13: Mercedes Benz T80 – Longarinas longitudinais com estruturas transversais.**

Fonte: wikipedia (2008).

Depois dos chassis de longarinas, vieram os multitubulares, muito leves, em que os tubos transversais tomavam a forma da carroçaria, servindo de suporte para elementos de chapa ultraleve (Figura 14).



**Figura 14: Maserati 250 Estrutura tubular com armações transversais davam forma à carroçaria.**

Fonte: wikipedia (2008).

A técnica evoluiu e vieram as estruturas multitubulares espaciais, herdadas da aviação, um aperfeiçoamento do tipo anterior, no qual os elementos trabalham em tração e compressão, nunca em torção. A diminuição de peso obtida foi notável (Figuras 15 e 16).



**Figura 15: Mitsubishi Pajero Evolution IV 2007 – Chassi tubular.**  
Fonte: wikipedia (2008).



**Figura 16: O mais clássico e famoso chassi tubular: Maserati Bird Cage.**  
Fonte: wikipedia (2008).

Até hoje a opção pela estrutura tubular é estudada ao seu limite, pois permite uma relação interessante entre rigidez/torção aplicável a competições específicas. A Mitsubishi, que competia no Dakar com seu “Pajero” elaborado a partir de uma célula rígida como uma estrutura monobloco onde eram fixadas treliças tubulares dianteira e traseira para a fixação de motor e componentes, optou pela montagem do protótipo daquela competição em cima de uma estrutura literalmente tubular, visto que os valores de torção seriam melhor aproveitados por esta, na competição que atravessa diversos terrenos irregulares e acidentados.

### **2.5.2.2 Requisitos Estruturais do Chassi de um Automóvel**

Segundo Gonçalves e Ferreira (2005), a estrutura de um automóvel tem certos requisitos a serem satisfeitos. A estrutura deve fornecer:

- Ligações para os componentes do compartimento do motor;
- Espaço e proteção para as rodas da frente;
- Ligações para o subsistema de direção;
- Espaço e ligações para a bateria e subsistema do pára-choque;
- Suporte para o motor, suspensão frontal, sistema de direção e radiador;
- Proteção em caso de embate frontal

Valores para otimizar a estrutura são de deformação dinâmica máxima de 650mm e desaceleração máxima de 40 g's.

Estes requisitos são importantes, entre outros fatores, para a segurança do piloto. O primeiro acidente fatal com automóvel ocorreu em 1889 em Nova Iorque e foi responsável pelos primeiros estudos desenvolvidos na área de segurança automotiva. Durante o século XX este tema adquiriu maior importância, tornando-se um dos objetivos determinantes na pesquisa e concepção de novos veículos. Para Gonçalves (2005), no passado, a obtenção de um pico de desaceleração baixo em caso de impacto era conseguido através do aumento do espaço destinado à absorção de energia, resultando em um aumento de massa do veículo. No entanto, com a otimização dos automóveis e redução de peso, associado à diminuição de consumo de energia, diminuiu esta área de absorção de energia do impacto. Assim, durante décadas desenvolveram-se estruturas de automóvel *crashworthy*<sup>2</sup>, para evitar acidentes, como ABS e sistemas ativos de proteção do usuário, como *airbag*. Esta estrutura tem o objetivo de maximizar a absorção de energia em caso de impacto mantendo o espaço do usuário, incluindo o espaço necessário para o devido funcionamento do sistema. Sendo a estrutura o principal elemento estrutural do automóvel, esta, em caso de acidente desempenha uma função crucial.

### 2.5.2.3 Habitáculo Automotivo

Segundo Ribeiro (2006), a cabine é a parte da estrutura de um veículo destinada basicamente à direção e ao alojamento dos passageiros. O termo é de origem aeronáutica, definido como o espaço restrito, reservado ao piloto de avião. No campo automobilístico, o sentido da palavra é mais amplo estendendo-se a todo o espaço

---

<sup>2</sup> Crashworthy – Sistema de absorção de energia de impacto com objetivo de manter o espaço dos ocupantes, incluindo o espaço necessário para que os sistemas de proteção possam atuar corretamente.

habitável do veículo. Nome dado também à estrutura do habitáculo: sob esse aspecto, a cabine compreende não só o espaço interno, mas também a gaiola metálica a ele circunscrita. A estrutura da cabine é parte integrante da carroceria. Antes do sistema monobloco construía-se a cabine separadamente, para depois montá-la sobre o chassi. Por motivos de segurança, a cabine deve ser rígida e indeformável, circundada por uma estrutura de formação progressiva, para amortecer os choques externos. É indispensável resguardar o interior da cabine contra choques, para garantir a proteção dos passageiros. De nada adiantará a indeformabilidade do habitáculo se a estrutura interna não for dotada de capacidade de deformação progressiva, para garantir a absorção dos choques.

Para Ribeiro (2006), o automóvel deixou de ser apenas um meio de transporte, passa a ser uma extensão da casa ou do trabalho, principalmente se avaliarmos o fato de que as pessoas passam grande parte do dia dentro do veículo. Deste modo, as questões relacionadas a “habitabilidade” estão sendo tratadas como aspectos importantes no desenvolvimento de veículos. Segundo Larica (2003), é preciso pensar em um projeto que considere o conforto, a segurança e a ergonomia, além da aplicação de materiais que sejam adequados ao caráter da habitabilidade evocando uma síntese mais homogênea de diversas características do “estar” em um veículo: o espaço interno livre; o conforto dos bancos; a praticidade dos controles; o isolamento acústico; entre outros fatores.

Segundo Ribeiro (2006), na construção de um veículo, vários fatores são considerados pelos projetistas para dar maior conforto ao motorista e aos passageiros. No caso do motorista, os problemas são mais complexos, pois além da máxima comodidade, torna-se também necessária à praticidade dos comandos. O projeto veicular deve transmitir ao automobilista confiabilidade, garantindo que o veículo e seus componentes comportem-se de acordo com as especificações do seu funcionamento. Os fatores que mais influem no conforto de um carro são: as vibrações, os solavancos, o alto nível de ruído, os ângulos assumidos pelas várias partes do corpo, e a climatização. As irregularidades das ruas e estradas produzem vibrações geradas sobre as suspensões do veículo, essas vibrações transmitem-se necessariamente à carroceria, diminuindo o conforto. Outras perturbações, que são provenientes das peças mecânicas, também incomodam os viajantes do veículo. O motorista percebe também, as vibrações da direção e de outros comandos.

Atualmente, o uso de materiais esponjosos de densidade variável consegue resultados eficientes no amortecimento de oscilações. A climatização e o nível de ruído

da cabine também são fatores importantes para o conforto. Esses problemas podem ser solucionados usando-se materiais anti-ruído e anti-vibração.

## **2.6 Aplicações para Materiais Metálicos Celulares e Espumas Metálicas**

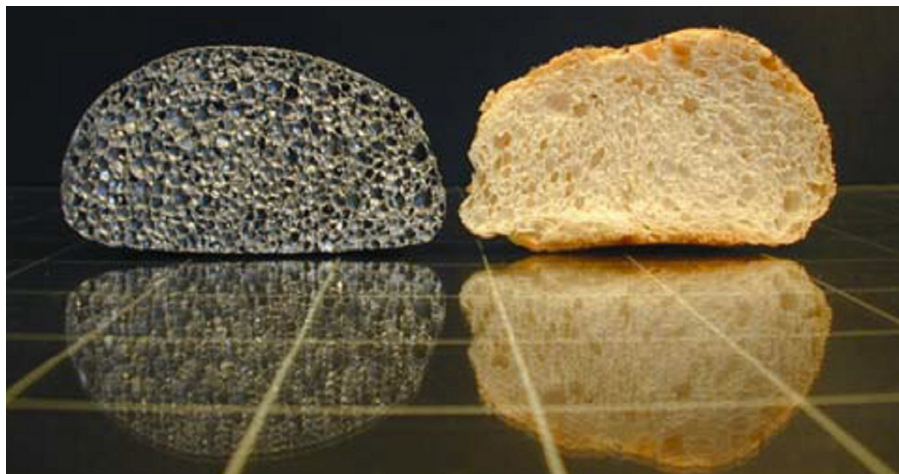
### **2.6.1 Introdução**

O desenvolvimento tecnológico, com novos materiais e processos fabris, juntamente com as crescentes demandas por novos materiais cada vez mais eficientes, têm gerado necessidades de conhecimento interdisciplinar, bem como, de profissionais cada vez mais capacitados. Frente a tal situação, verificou-se uma oportunidade para desenvolvimento do presente trabalho, pois o estudo de espumas metálicas tornou-se atrativo para pesquisadores interessados em aplicações tanto científicas quanto industriais.

### **2.6.2 Histórico**

A história das Espumas Metálicas tem seu início na década de quarenta, quando muitas patentes são registradas, mas as primeiras surgem mesmo entre 1950 e 1970 onde muitas variações para os métodos de produção são propostas. Segundo Banhart (2002), em 1943, Benjamim Sosnick produziu espumas de alumínio com adição de mercúrio no metal fundido em câmara fechada sob alta pressão. Porém, neste período, nenhum material científico foi publicado pelas empresas e pesquisadores envolvidos em pesquisa, além das patentes. Em 1972, a *Ethyl Corporation* produziu material celular de alta qualidade e enviou-o para *Ford Motor Company* para avaliação. Certamente, não foi bem sucedido por não ser o momento para materiais leves em uma era de aparente abastecimento ilimitado de recursos e quando a reciclabilidade e segurança não eram tão requeridas quanto hoje. Assim, muitos detalhes foram esquecidos e hoje é difícil ter-se acesso às idéias propostas e saber quais as que realmente funcionaram.

Segundo Banhart (2002), um segundo surgimento das atividades científicas na área deu-se nos anos oitenta, restabelecendo algumas técnicas antigas de produção e descobrindo algumas novas. As primeiras indústrias como ALCAN e Shinko Wire (Alporas) estabeleceram pesquisas internas, mas diferente dos anos setenta, algumas publicações emergiram de dentro dos laboratórios das indústrias. O Instituto Fraunhofer, em Bremen na Alemanha, entrou neste campo em 1990 depois de redescobrir um antigo processo de produção de espumas metálicas. Desde então o Instituto organiza e publica pesquisas relacionadas à produção de espumas metálicas (Figura 17). No meio da década de noventa, um programa americano de pesquisa e logo depois um programa alemão, com base no governo, iniciaram consideráveis pesquisas neste setor.



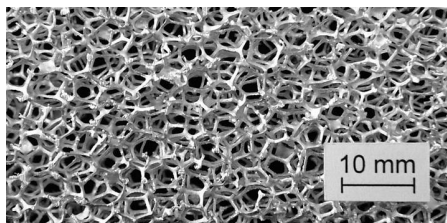
**Figura 17: Analogia entre uma Espuma de Zinco e uma fatia de Pão e seus vazios internos.**  
Fonte: Banhart (2002).

Até o momento, a situação é de tentativa de união dos avanços em pesquisa com a tecnologia de produção existente nas indústrias de hoje. O número de pesquisas nesta área aumenta a cada ano. Segundo Banhart (2007), até meados de 2005 existiam no máximo 550 publicações científicas sobre espumas metálicas em todo mundo. Ainda, para o mesmo autor, existem 3 áreas principais que necessitam de pesquisa no campo de espumas metálicas atualmente. A primeira área é a da física, procurando compreender como as espumas são estabilizadas e como esta estabilidade pode ser melhorada. A segunda área de investigação está nas relações entre as propriedades e a estrutura: sua morfologia, aspectos macroscópicos (densidade, tamanho e distribuição das células, curvatura da parede da célula e sua orientação) e microscópicos (nível de impureza,

ação do tempo, fácil e compreensível representação de evidências experimentais). Como terceira área de estudo está a modelagem da estrutura das espumas metálicas e metais celulares como importante ferramenta para o designer e o engenheiro na simulação, interpretação e aplicação deste material e possível comparação com dados experimentais, tal como este trabalho propõe.

### 2.6.3 Considerações Gerais sobre Metais Celulares

Segundo Oliveira (2007), os metais celulares são uma nova, e ainda não perfeitamente caracterizada, classe de materiais. Entende-se por metal celular (Figura 18) o material composto por uma matriz metálica com vazios em seu interior, chamados de poros ou células. As espumas metálicas possuem baixa densidade e propriedades físicas, mecânicas e acústicas peculiares, trazendo grandes vantagens em termos de peso e resistência. A estrutura em células (abertas ou fechadas) determina o comportamento macroscópico destes materiais que exibem comportamento mecânico e propriedades físicas que diferem muito dos materiais ditos sólidos, sem a presença de ar incorporado. Para Banhart (2002), os metais celulares apresentam combinações interessantes de propriedades físicas e mecânicas, como, por exemplo, alta rigidez combinada a peso específico muito baixo, ou permeabilidade a gases combinada com condutividade térmica alta, o que oferece promissoras possibilidades de emprego, como, por exemplo, na indústria aeroespacial. Por ainda carecerem de maiores informações quanto a seu comportamento mecânico, têm merecido interesse crescente na área de pesquisa de novos materiais.



**Figura 18: Metal Celular: Espuma de alumínio com célula aberta (DUOCEL®).**  
Fonte: Öchsner (2003).

Segundo Banhart (2002), algumas imprecisões existem no que diz respeito ao uso do termo Espuma Metálica, que com frequência é usado de forma geral para descrever materiais que não são de fato espumas. Para identificarmos corretamente as espumas metálicas, deve-se distinguir:



- Metais Celulares (*Celular Metals*): termo mais geral que faz referência ao corpo metálico no qual qualquer tipo de vazio gasoso é disperso. O metal divide-se em células fechadas que contém gás e precisa ter densidade igual ou inferior a 30% da densidade do material maciço.

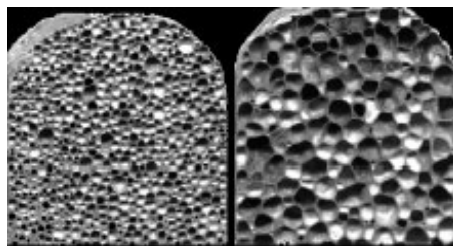
- Metais Porosos: tipo especial de metal celular restrito a alguns tipos de vazios, os poros, que são usualmente esféricos e isolados uns dos outros. O material tem, normalmente, o nível de porosidade menor que 70%.

- Espumas Metálicas (*Metal Foams*): classe especial de metais celulares que originam-se de uma matriz metálica líquida e assim têm uma morfologia mais restrita. As células são fechadas, separadas umas das outras por fina membrana, ou abertas, com seus poros interconectados. São, ainda, esféricas ou poliédricas. A expressão Espuma Metálica é válida para a fase líquida do produto, embora seja, usualmente, também utilizada para descrever o produto em sua fase sólida. Se usado desta forma, define-se o metal em sua fase líquida como Espuma Metálica Líquida. Metais Celulares originados de Espumas Metálicas Líquidas são de células fechadas, assim, alguns pesquisadores preferem denominar as estruturas metálicas de células abertas de esponjas metálicas (Figura 19).

- Esponjas Metálicas (*Metal Sponges*): morfologia de um metal celular, normalmente com vazios interconectados. Nomenclatura normalmente menos utilizada.

Segundo a Agência Espacial Européia (2008), três estágios diferentes podem ser identificados na produção do Metal Celular a partir da Espuma Metálica Líquida:

- 1 - Formação da espuma – o gás dispersa-se inicialmente no líquido.
- 2 - Coalescência – as bolhas começam a coalescer para formar bolhas maiores.
- 3 - Drenagem líquida – as bolhas arrebentam e voltam ao estado líquido.



**Figura 19: Estrutura da espuma na Terra (esquerda) e no espaço (direita).**

Fonte: Agência Espacial Européia (2008).

A razão pela qual as bolhas começam a coalescer é a tensão superficial. A tensão superficial pode ser descrita como a força que age sobre a superfície de um líquido, fazendo com que esta superfície se comporte como se tivesse uma película elástica,

como um balão. E, tal como um balão, as bolhas tentam minimizar a área de superfície, razão pela qual as bolhas coalescem com o decorrer do tempo; tendem a juntar-se e formar uma bolha grande em vez de permanecer como bolhas pequenas. Na Terra, a gravidade faz com que os filmes líquidos que existem entre as bolhas sejam drenados para baixo, provocando eventualmente o colapso da espuma. Isto resulta numa espuma com bolhas de tamanhos diferentes. No espaço, por outro lado, a espuma não é drenada porque não há força de gravidade a puxar o líquido para baixo. Ao contrário, a espuma tende a colapsar em todas as direções, resultando numa espuma mais uniforme no que diz respeito à forma e ao tamanho das bolhas. As bolhas aderirão também às paredes do recipiente, formando uma bolha de ar maior no centro do recipiente. Isto também se deve à tensão superficial.

As espumas ou outros materiais porosos com estrutura celular são conhecidos por possuir uma interessante combinação de propriedades físicas e mecânicas. Por estes motivos a natureza freqüentemente usa materiais porosos ou celulares em suas obras, assim como na madeira e nos ossos. Segundo Jorge e Arruda (2008), para ser classificado como material celular, o mesmo precisa ter densidade igual ou inferior a trinta por cento da densidade do material maciço da matriz. Entre os produzidos pelo homem, espumas poliméricas, atualmente, são as mais difundidas. Menos difundido é que tanto metais quanto ligas podem ser produzidas como metais celulares ou espumas e que pela interessante combinação de suas propriedades inspiram novas aplicações em um futuro próximo.

Os materiais metálicos celulares desde descobertos aumentaram muito sua gama de aplicação. Todavia, o metal poroso ou espuma metálica conveniente pode resolver diversos problemas dependendo de condições como:

- Morfologia: tipo de porosidade requerida (aberta ou fechada), tamanho da escala de porosidade desejada, área da superfície interna total de material celular necessário;

- Metalurgia: metal ou liga; ou ainda estado da micro-estrutura requerida;

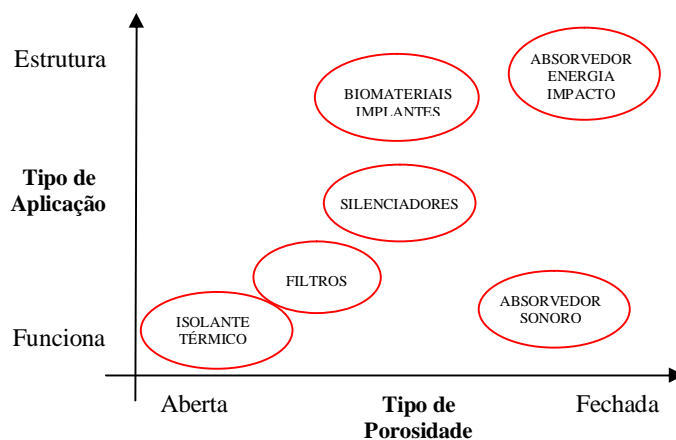
- Processo: possibilidades de moldar a espuma, sólido celular ou composto feito de espuma e chapa ou perfil convencional;

- Economia: custos e conveniência para produção em larga escala;

Para Banhart (2000), o primeiro ponto, em particular, é crucial para qualquer avaliação de aplicação do material metálico celular, pois a principal diferença entre

materiais celulares são os tipos de porosidade do material em função de seu uso: funcional ou estrutural. Para aplicação estrutural, o material celular deve ser leve porque de outra maneira ele seria feito convencionalmente de metal ou liga maciça. Todavia, espumas de alumínio, magnésio ou titânio são preferidas para ambas aplicações, tanto funcional, por exemplo para uso medicinal em próteses, como para situação estrutural, para estruturas sujeitas a calor intenso, como mostra o Gráfico 05.

Finalmente, as questões como processo e custo devem ser consideradas. A tecnologia para fazer a estrutura metálica celular escolhida deve ser e/ou estar disponível para transformá-la na forma necessária e para incorporá-la na máquina ou veículo. Esta tecnologia será inútil se o requerido componente não puder ser produzido a um custo razoável.



**Gráfico 05: Aplicação dos metais celulares de acordo com o seu grau de abertura necessária do vazio e sua aplicação.**

Fonte: Banhart (2002).

#### 2.6.4 Processos de Fabricação de Espumas Metálicas

O estudo de espumas metálicas tornou-se atrativo para pesquisadores, tanto da área científica acadêmica quanto industrial, devido às suas propriedades. Espumas metálicas são conhecidas por sua interessante combinação de propriedades físicas e mecânicas tais como alta rigidez com baixo peso específico ou alta resistência à compressão com boa absorção de energia. Segundo Jorge e Arruda (2008), para a produção de espumas metálicas têm sido empregados quase que exclusivamente o alumínio e suas ligas, que se mostram mais adequados aos processos atualmente utilizados na produção dos materiais metálicos celulares. Esses processos envolvem a

metalurgia do pó com a mistura de agentes efervescentes para posterior fusão da liga e sua espuma pela gaseificação controlada do agente efervescente.

Segundo Banhart (2000), algumas técnicas partem de um metal especialmente fundido com viscosidade ajustada e são injetados gases ou adicionados agentes efervescentes neste metal fundido causando a formação de bolhas em seu processo de composição. Outro método é preparar um sistema gás-metal supersaturado sob alta pressão e com formação de bolhas iniciais com pressão e temperatura controladas. Finalmente, espumas metálicas podem ser feitas misturando metais cristalizados com agentes efervescentes, compactando-os, gerando uma matriz metálica e então fundindo esta mistura (precursor).

Conforme Banhart (2007), entre os metais celulares, a espuma de alumínio é a que encontra melhor aplicação no mercado. Assim sendo, segundo o mesmo autor existem duas estratégias principais para a produção de Espumas de Alumínio. A produção direta de vazios inicia de um metal fundido contendo partículas não-metálicas dispersas uniformemente no qual são injetados gases para criar as espumas, conforme citado anteriormente. Outra alternativa é a adição de hidrato de titânio ao metal fundido, que depois de sua decomposição chega ao mesmo resultado. A Alporas (Japão), MetComb (Áustria) e Cymat (Canadá) são exemplos de indústrias que produzem espumas de alumínio desta forma. A produção indireta inicia de um precursor sólido que consiste em uma matriz metálica contendo agentes efervescentes dispersos uniformemente, normalmente hidratos de titânio e zinco. Ao submeter o precursor sólido à fusão, este expande-se e forma a espuma. Entre as indústrias que produzem espumas de alumínio desta forma estão: ALM (Alemanha), Alulight (Áustria) e Gleich – IWE (Alemanha). Os métodos de produção de metais celulares acima citados são explicados a seguir com sua respectiva denominação industrial.

#### **2.6.4.1 Produção de Espumas Metálicas por Injeção de Gases – *HYDRO / ALCAN***

Segundo Banhart (2001), uma variedade de ligas de alumínio podem ser usadas para produção de espumas metálicas por injeção de gases. O metal fundido é efervescido com injeção de gases (ar, nitrogênio, etc) introduzidos por mecanismos especiais rotativos ou bocais vibratórios. Estas ferramentas geram finas bolhas de gás na “mistura” e as distribuem uniformemente. A densidade da Espuma de Alumínio produzida neste processo varia de  $0,069 \text{ g/cm}^3$  a  $0,54 \text{ g/cm}^3$ , na média, e o tamanho dos

poros varia de 25mm a 3mm, com espessura de 50 $\mu$ m a 85  $\mu$ m de parede. O tamanho da célula tem relação inversamente proporcional à espessura da parede e a densidade pode ser influenciada ajustando o fluxo da inserção de gases, a velocidade do mecanismo que impele os gases e a frequência da vibração dos bocais, entre outros. Como vantagens tem-se a capacidade de processo contínuo em larga escala e as baixas densidades que podem ser alcançadas. Provavelmente também é menos oneroso que outros processos produtivos, resultando em um material celular mais econômico. Uma possível desvantagem é o corte na espuma ao longo do processo, que causa a abertura de poros.

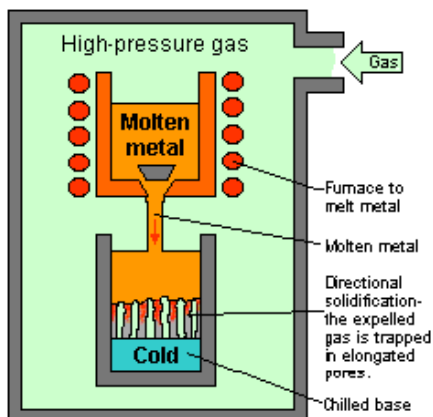
#### **2.6.4.2 Produção de Espumas Metálicas com Agentes Efervescentes (dilatadores) - ALPORAS**

Segundo Banhart (2001), uma segunda forma de criar espumas metálicas diretamente a partir de metal fundido é adicionar agentes efervescentes a este ao invés de injetar gás. O calor faz com que o agente efervescente se decomponha, libere gases e impulse o processo de formação de vazios. A empresa Shinko Wire Company (Japão) já produz espumas desta forma desde 1986 com produção superior a 1.000 kg por dia. O metal fundido começa a se expandir lentamente e gradualmente enche a forma de espuma metálica, sendo todo este processo sob pressão constante. Depois de resfriada a forma, o “metal líquido” (metal fundido) transforma-se em espuma sólida e pode ser retirada deste molde para seguir para os próximos procedimentos. O processo todo leva em torno de 15 minutos para um tamanho típico (2050mm x 650mm x 450mm<sup>3</sup>). De fato, as espumas produzidas desta forma, de nome comercial Alporas, parecem ser as mais homogêneas espumas de alumínio disponíveis atualmente. Uma relação empírica existe não somente entre o diâmetro da célula e a viscosidade do metal fundido, mas também entre densidade final da espuma e sua viscosidade. A densidade típica após o corte das laterais do molde (bloco celular) fica entre 0,18 g/cm<sup>3</sup> e 0,24 g/cm<sup>3</sup> com diâmetro de poros entre 2mm e 10mm.

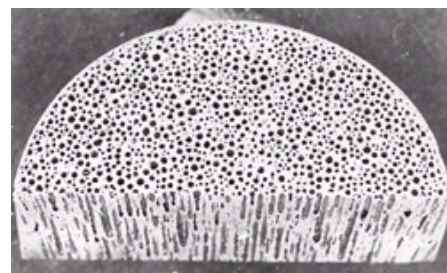
#### **2.6.4.3 Produção de Espumas Metálicas com Gás-Sólido - GASAR**

Segundo Banhart (2001), o processo de fabricação denominado GASAR foi inventado na Ucrânia (Ukraine State Metallurgical Academy) em 1993 e acontece através do arrefecimento rápido do metal saturado com hidrogênio (Figura 20). Quando o metal solidifica, o hidrogênio é expelido e forma poros. Como o resfriamento

acontece num determinado sentido, os poros são muito longos e em paralelo à direção de arrefecimento. Este sistema demonstra uma decomposição eutética, quando um metal fundido saturado com hidrogênio irá formar um sólido metal+gás de hidrogênio em refrigeração. O alumínio-hidrogênio é o sistema mais comumente usado. Um metal é derretido em um forno contido dentro de um recipiente sob pressão. O metal saturado derrete-se e, em seguida, é transferido para outro recipiente resfriado e com pressão controlada, enquanto solidifica gradualmente a partir da incidência de arrefecimento. Como a solubilidade do gás+metal fica abaixo da temperatura eutética, torna-se desprezível e é expulsa do metal em solidificação na forma alongada de poros alinhados na direção de refrigeração. A forma e a dimensão dos poros é controlada pela pressão, pela velocidade, direção de arrefecimento, pela pressão do gás, do metal ou de liga metálica utilizada e ainda pela presença de inclusões não-embebidas ao derreter e pela temperatura. Espumas foram produzidas utilizando alumínio, níquel, cobre, ferro, magnésio e várias ligas, com relativa porosidades entre 5% e 75% dos poros e tamanhos entre 10  $\mu\text{m}$  e 10 mm. Os poros são cilíndricos e sua uniformidade é variável. Esse processo produz espumas de qualidade razoável, mas os níveis máximos de porosidade não são particularmente elevados. O Processo GASAR produz somente formas mais simples, com produção lenta e de difícil escala industrial, sendo assim um processo mais caro e complexo (Figura 21).



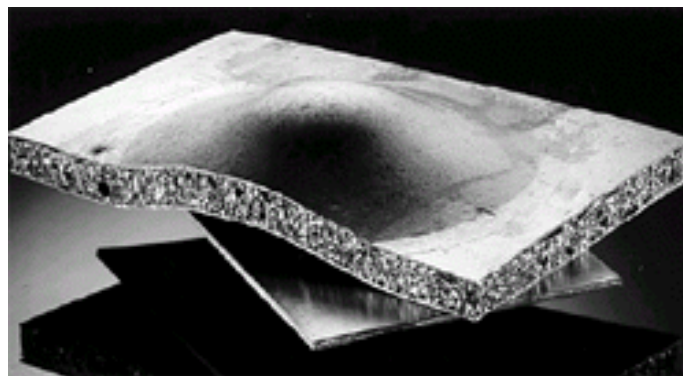
**Figura 20: Esquema do Processo GASAR. Fonte: Curran, D.**  
Fonte: Banhart, J, 2001.



**Figura 21: Espuma produzida pelo processo GASAR – vista de quão alongados são os seus poros.**  
Fonte: Banhart, J, 2001.

### 2.6.4.3 Produção de Espumas Metálicas por Cristalização – *FOAMINAL / ALULIGHT*

O processo de produção de espumas por cristalização inicia com a mistura de pós ou cristais (componentes) metálicos com agentes efervescentes, depois esta mistura é compactada para gerar um produto denso e semi-acabado. A compactação pode ser ativada usando qualquer técnica na qual os agentes efervescentes são embutidos (cravados) na matriz do metal sem nenhuma notável porosidade residual aberta. O próximo passo é o processo térmico com temperatura próxima ao ponto de fusão da matriz do material. O agente efervescente, que é distribuído de forma homogênea, decompõe-se e os gases liberados forçam a matriz precursora de metal fundido a expandir-se formando espumas com estrutura altamente porosa. Segundo Banhart (2001), esse método não se restringe ao alumínio e sua ligas. Zinco, latão, chumbo e ouro, entre outros metais e ligas, também podem gerar espumas desde que “misturados” com os agentes efervescentes apropriados. Se um pedaço do material precursor (matriz) é colocado em processo térmico sem um molde o resultado será uma espuma sem forma definida até seus limites externos, o que é feito inserindo-o dentro de uma forma vazia (molde) e expandindo o material por calor até as paredes do molde. Assim sendo, pode-se produzir formas complexas injetando-se a espuma ainda em processo de expansão de um reservatório em uma forma. Painéis Sanduíche podem ser feitos desta forma, com dois painéis externos e uma camada interna de espuma metálica. Estes painéis podem ter diferentes formas e desenhos e, após sua conformação, receber a camada interna de espuma metálica, conforme mostra a figura 22.



**Figura 22: Painéis Sanduíche de Espuma Metálica de alumínio.**  
Fonte: Banhart (2001).

#### **2.6.4.4 Produção de Espumas de Lingotes contendo Agentes Efervescentes (dilatadores) – FORMGRIP / FOAMCAST**

O processo de fusão de pó-compacto foi recentemente alterado pela incorporação de partículas de hidreto de titânio diretamente em alumínio fundido ao invés de utilizar o pó para preparar um material precursor (matriz). Para evitar a evolução prematura do hidrogênio, o metal fundido tem que ser rapidamente resfriado abaixo do seu ponto de fusão após a mistura com o agente dilatador, para evitar que sejam liberados gases antes da solidificação. Segundo Banhart (2001), a antiga técnica, denominada "Foamcast", foi realizada em uma máquina de moldagem por perda, sendo o pó de hidreto injetado no recipiente de perda simultaneamente à fusão do metal. Ligas normais de fundição como a A356 sem aditivos cerâmicos foram utilizadas. O resultado foi virtualmente denso e poderia ser uma espuma de refusão em analogia ao processo descrito anteriormente. Este processo pode ser influenciado por diversas variações no aquecimento e também das temperaturas finais das espumas, permitindo assim produzir uma variedade de diferentes estruturas de poros. O processo tem sido chamado "Formgrip" (Foaming of Reinforced Metals by Gas Release in Precursors), que é um acrônimo de espumas metálicas reforçadas pela liberação de gases em seus precursores (matrizes).

### **2.7 Aplicações para Materiais Metálicos Celulares no Setor Industrial**

#### **2.7.1 Setor Automotivo**

Com relação à aplicabilidade dos materiais celulares, a indústria automotiva tem se mostrado como um dos campos mais promissores para a utilização e viabilização de seu custo através da produção em massa para um grande mercado e em expansão.

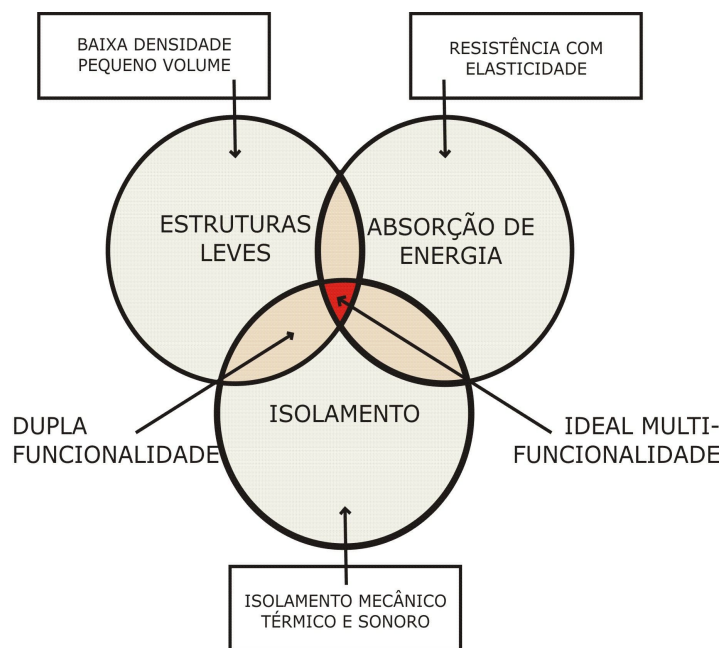
A crescente demanda por segurança no setor automotivo impulsionou a busca por veículos mais resistentes e ao mesmo tempo mais leves. Este conflito, com distintas demandas, entre elas o baixo consumo de combustível, necessita medidas adicionais para redução de peso. Especialmente na Europa e Japão, carros com dimensões reduzidas são desejados. Esta redução, todavia, não deve tomar o lugar do



compartimento do passageiro. Para tanto, é preferível introduzir novas tecnologias para reduzir a estrutura sem comprometer o conforto.

Também há demanda por reduzir as emissões acústicas dos carros com novos “absorvedores” de som e por aumentar a segurança em carros tão compactos, onde a zona de segurança em impactos também é reduzida pelo tamanho do veículo.

De acordo com Banhart (2001), as espumas metálicas oferecem a possibilidade de solução para alguns destes problemas. A figura 23 demonstra três campos de aplicação das espumas metálicas (principalmente de espumas de alumínio na indústria automotiva). Os círculos representam os três campos que devem ser diferenciados e as caixas de texto ilustram suas propriedades, que são responsáveis pelas vantagens nestes mesmos campos de aplicação. Uma aplicação ideal seria quando um mesmo componente com peso reduzido e capaz de absorver energia em caso de impacto também é isolante de som e/ou calor – Interseção entre os círculos. Tais propriedades multifuncionais são, é claro, difíceis de se encontrar em um único material e encontrando algum que satisfaça pelo menos duas destas demandas já seria muito bom.

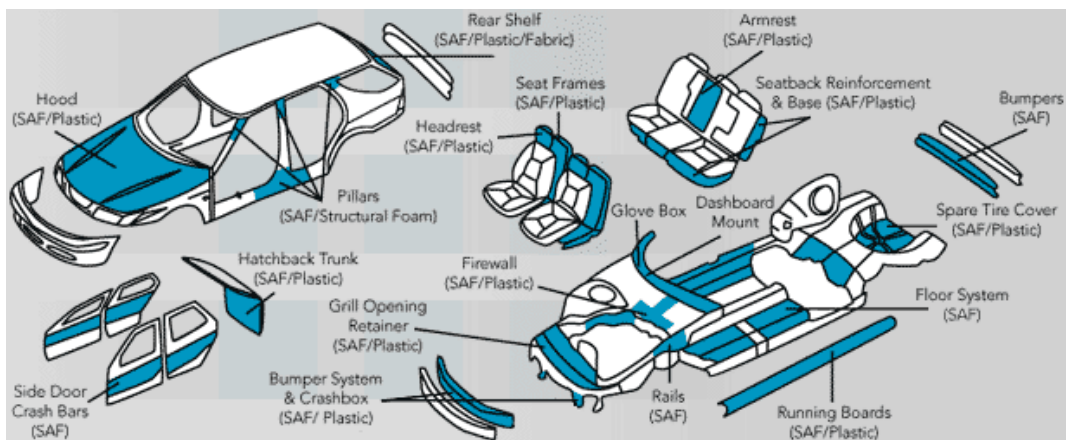


**Figura 23: Maiores campos de aplicação da espuma metálica com função estrutural no setor automotivo.**

Fonte: Banhart (2001).

Assim sendo, tem-se como potenciais aplicações das Espumas Metálicas, na indústria automotiva (Figura 24), em painéis sanduíches, reforços estruturais, elementos

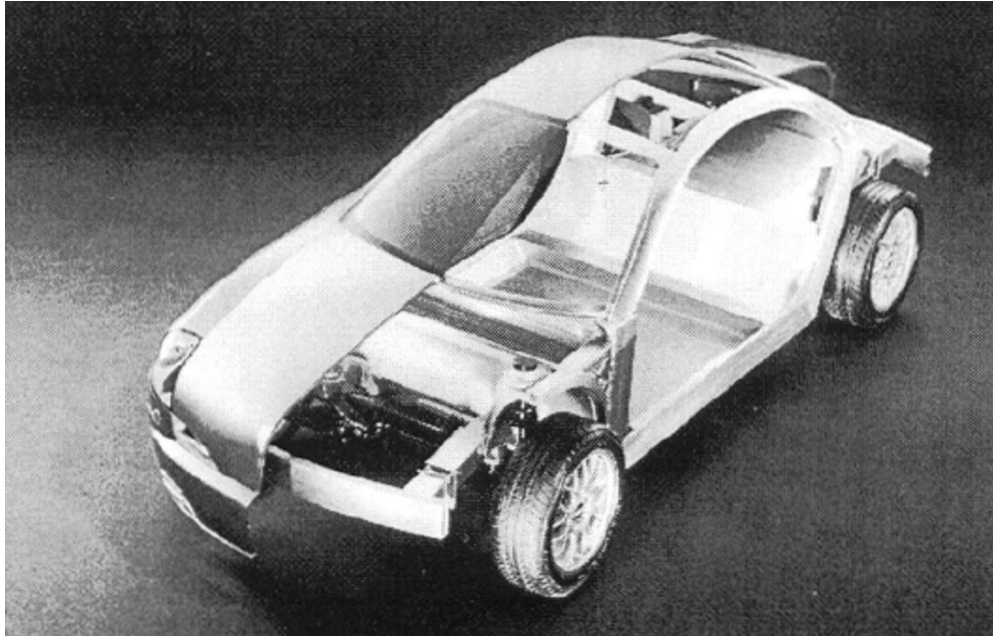
absorvedores de impacto, amortecimento de vibrações, elementos filtrantes, entre outros, vindo ao encontro às tendências deste mercado: redução de peso dos veículos para melhor desempenho e menor custo de combustível, além do aprimoramento em segurança.



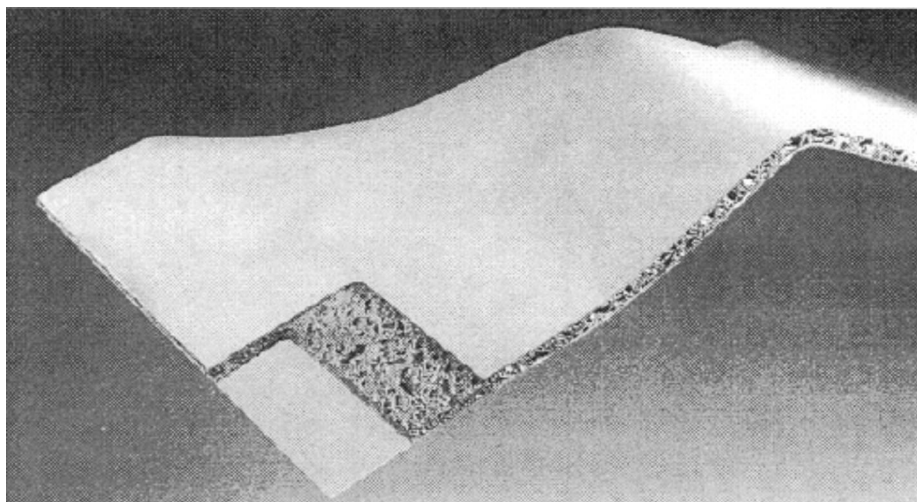
**Figura 24: Aplicação de Espuma Metálicas no Design Automotivo.**

Fonte: ALUSION (2008).

Todavia, pode-se dizer que um material seria realmente eficiente quando, com suas propriedades, for capaz de atender ao maior número de solicitações possíveis da requerida situação de demanda para sua aplicação. Assim, existem áreas potenciais de aplicação para este material, como a automotiva com aplicação em painéis de fechamento e aplicações estruturais que exploram várias de suas propriedades, como isolamento térmico e acústico, pequena espessura aliada ao baixo peso, mas com bom desempenho na absorção de energia de impacto, possibilidade de manufatura em sua forma tridimensional final, etc. A Karmann GmbH é uma empresa fornecedora para a indústria automotiva de atuação mundial que anunciou um novo sistema em espuma de alumínio unindo tecnologia revolucionária e painéis estruturais automotivos. Segundo ALUSION (2008), os painéis estruturais em espuma de alumínio oferecem uma melhor relação custo-benefício com painéis até 10 vezes menos espessos e 50% mais leves do que os convencionais em aço. Assim, os painéis estruturais tipo sanduíche simplificam o sistema estrutural do veículo com baixo peso e menor espessura, propiciando aos fornecedores da indústria automotiva produzir diferentes variações deste produto para o nicho de veículos de baixo peso (Figura 25 e 26).



**Figura 25: Veículo Conceito para o Design Automotivo de baixo peso.**  
Fonte: Banhart (2005).



**Figura 26: Painel Estrutural após expansão da Espuma em seu interior – mostrando sua manufatura e modelagem tridimensional.**  
Fonte: Banhart (2005).

Segundo Banhart (2005), recentemente a mesma empresa construiu um braço móvel para suporte e reparo em altura. O objetivo era aumentar o alcance vertical da plataforma de 20m para 25m, mantendo o peso total do veículo abaixo de 3,5 toneladas, para que assim o veículo continuasse a pertencer à categoria a qual se enquadra atualmente. A troca de categoria implicaria em custos de pessoal, uma vez que em outra categoria toda equipe teria que ter uma licença especial para guiar o veículo. Para tanto

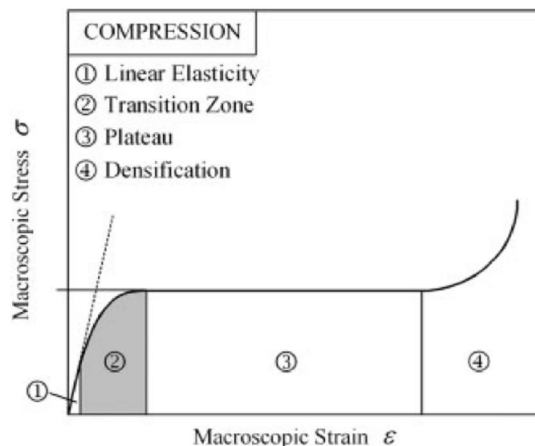
foram feitas simulações em programas de Elementos Finitos para otimizar a estrutura alcançando os objetivos. A união dos painéis sanduíche de espuma de alumínio foram utilizados para solucionar o problema com peso aceitável (Figura 27).



**Figura 27: Braço do veículo feito com painéis sanduíche de espuma de alumínio - Teupen GmbH.**  
Fonte: Banhart (2005).

### **2.7.2 Absorção de Energia em caso de Impacto**

Segundo Banhart (2001), nos estudos de aplicações para absorção de energia em caso de impacto, um item a ser explorado é a deformação plástica e seu regime irreversível. Muitos materiais celulares são excelentes absorvedores de energia, apresentando grandes deformações a níveis praticamente constantes de tensão. Tal comportamento é ilustrado pela Figura 28, que representa a curva tensão-deformação esquemática para uma espuma metálica, na qual a região do platô representa a grande capacidade de absorção de energia sob tensão constante.



**Figura 28: Curva tensão-deformação para espumas metálicas.**

Fonte: Öchsner (2003).

Desta forma pode-se verificar que, sob compressão, o corpo em espuma metálica apresenta um comportamento esperado de um material celular, com uma fase elástica inicial, seguida por uma zona de transição, um platô e densificação como verificado na Figura 28. Na fase plástica, a curva apresenta uma inclinação extremamente baixa, caracterizando um platô, no qual um pequeno aumento de força desencadeia uma grande deformação, que ocorre em consequência da deformação progressiva da estrutura celular. Segundo Jorge e Arruda (2008), este platô caracteriza, conforme citado anteriormente, uma grande capacidade de absorção da energia mecânica pelo material celular sob tensão constante. Após esta etapa, a inclinação da curva começa a subir, indicando o colapso da estrutura e, portanto, a compactação e adensamento do material empregado (Figura 29).



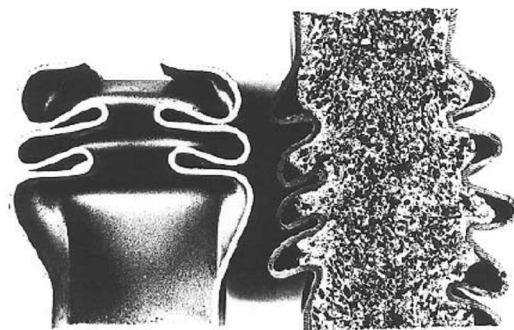
**Figura 29: Amostra de corpo em espuma metálica após comprimido.**

Fonte: Segundo Jorge e Arruda (2008).

Espumas Metálicas podem ter uma performance muito melhor do que outras espumas convencionais, como por exemplo, as poliméricas, pois são muito mais resistentes. O que faz a espuma de alumínio ser mais atrativa é o seu baixo “ricochete”

em situações de impactos dinâmicos, com índice menor de 3%, enquanto espumas de poliuretano celular apresentam em estudo índices de até 15% (Ashby, 2000). Assim sendo, um importante campo de aplicação para os metais celulares em geral e especificamente para as espumas metálicas é o de absorção de energia em impactos.

Segundo Ashby (2000), diferentes situações de impacto podem ser citadas na segurança regular em veículos, como quando há colisão e a energia é dissipada em designadas áreas protegendo o local do passageiro. Em baixas velocidades (3 – 10km/h), o impacto pode ser absorvido reversivelmente por materiais elásticos ou dispositivos hidráulicos de impacto. Em velocidades acima de 20 km/h, uma deformação programada é prevista em elementos designados para colisão: *crash boxes*, que podem ser simples tubos circulares de alumínio (Figura 30). Estes elementos podem ser facilmente repostos após a colisão tornando os reparos acessíveis. Somente em altas velocidades o chassi é deformado irreversivelmente com severo dano ao veículo.

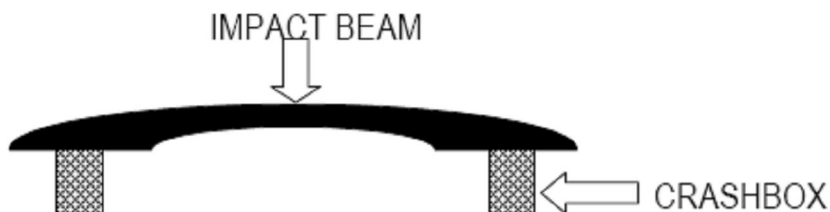


**Figura 30: Seções de tubos após impacto parcial, com e sem espuma metálica em seu interior.**

Fonte: Ashby (2000).

Ainda, conforme Ashby (2000), As empresas de seguro estão aumentando as regulamentações para proteger os passageiros em caso de colisão e minimizar os danos ao veículo e, com isto, os custos de reparo. Para tanto a idéia dos *crash boxes* vêm ao encontro desta necessidade. Estes *crash boxes*<sup>3</sup> são colocados entre o pára-choque e a frente da estrutura do veículo para absorver a energia de impactos médios (Figura 31).

<sup>3</sup> *Crash Box* – Sistema para absorção da energia de impacto.



**Figura 31: Desenho ilustrativo da localização dos *crash boxes*.**

Fonte: CUMAT (2008).

Segundo Banhart (2005), em cada tipo de impacto (frontal, lateral, oblíquo) o elemento absorvedor tem diferente performance (Figura 34) mas, em geral, para um bom absorvedor, alguns critérios podem ser citados:

- Comportamento constitutivo caracterizado como na Figura 28 apresentando plastificação somente após atingido o nível de tensão máximo tolerado e deformação progressiva no platô de tensão.
- Máxima capacidade de absorção por volume;
- Isotropia para absorção de energia: propriedade para absorção em um amplo raio de direções de impacto. Entendendo Material Isotrópico por aquele cujas propriedades do material em um ponto do corpo não são função da orientação. As propriedades são constantes para qualquer plano que passe por um ponto do material. Qualquer plano é um plano de simetria.

Além disto a absorção de energia costuma ser isotrópica<sup>4</sup>, exceto em alguns casos quando a fabricação cria anisotropia<sup>5</sup>.

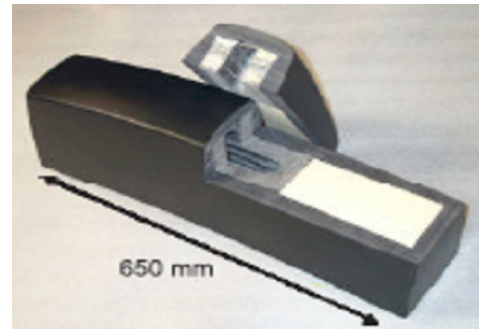
Absorvedores de impacto são utilizados também em veículos sob trilhos. Um exemplo são os veículos COMBINO, conceito de trem modular. Os trens devem ter uma proteção inferior frontal que previna o impacto de pedestres e os danos que podem ser causados (Figura 32). Neste caso os absorvedores da energia de impacto são feitos de polímeros estruturais reforçados internamente por espumas metálicas (Figura 33).

<sup>4</sup> **Material Isotrópico** – as propriedades do material em um ponto do corpo não são função da orientação. As propriedades são constantes para qualquer plano que passe por um ponto do material. Qualquer plano é um plano de simetria.

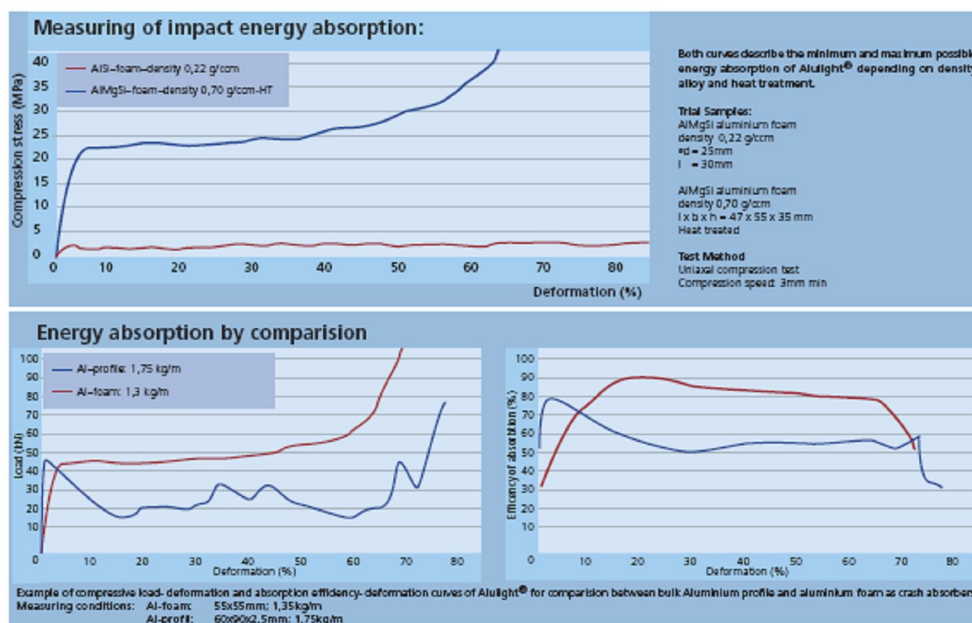
<sup>5</sup> **Material Anisotrópico** - as propriedades do material em um ponto do corpo são função da orientação. As propriedades não são constantes para qualquer plano que passe por um ponto do material. Não há planos de simetria.



**Figura 32: sistema veicular COMBINO.**  
Fonte: Banhart, 2005.



**Figura 33: Absorvedor da energia de impacto para o sistema veicular COMBINO.**  
Fonte: Banhart, 2005.



**Figura 34: Gráficos fornecidos por CYMAT sobre as propriedades do material.**  
Fonte: CYMAT (2008).

### 2.7.3 Setor de Construção Civil

Segundo Banhart (2001), há uma vasta gama de possibilidades para aplicação de metais celulares na construção civil. Assim como os prédios de escritórios são feitos em concreto, suas fachadas são decoradas com revestimentos junto ao corpo do prédio que, muitas vezes, tem o papel de melhorar sua aparência (Figuras 35a e 35b). Estes revestimentos têm que ser leves, resistentes e incombustíveis. Frequentemente finos painéis de mármore, granitos ou demais pedras decorativas são fixadas por suportes às



paredes destes prédios. Estes suportes podem ser feitos de espuma metálica (alumínio) em substituição às estruturas tipo *honey combs*<sup>6</sup>.

Os guarda-corpos de sacadas e escadas de incêndio têm rigorosas regulamentações de segurança a cumprir. Alguns dos materiais mais utilizados para este fim são pesados e têm problemas em caso de incêndio. Se eles fossem substituídos por peças em espuma metálica, estes problemas poderiam ser solucionados.

Para Banhart (2001), painéis de Espuma Metálica também seriam muito úteis na redução do consumo de energia de elevadores, pois o peso é muito importante nos elevadores modernos com rápida aceleração e, ao mesmo tempo, rápida desaceleração para uma chegada confortável. Todavia, a regulamentação de segurança evita a utilização dos painéis leves convencionais disponíveis hoje em dia. A espuma de alumínio pode agir como um redutor de peso e conseqüente redutor do consumo de energia, ao mesmo tempo em que serve como bom material estrutural, isolante térmico e acústico e para absorção da energia do impacto. Neste caso em especial, todas estas propriedades parecem tornar a aplicação de espumas metálicas em chapas para elevadores uma aplicação promissora.



Figura 35a

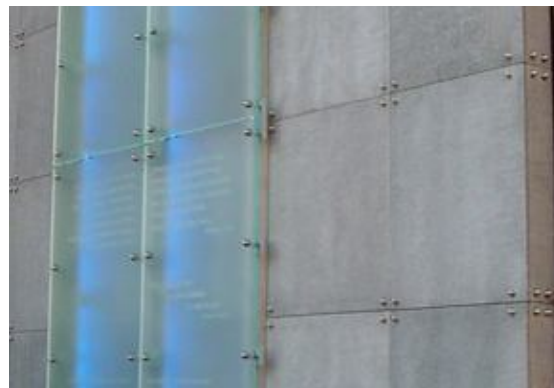


Figura 35b

**Figuras 35a e 35b – Aplicação de Painéis Externos em Espuma Metálica**

Fonte: Alusion (2008).

Atualmente, algumas portas corta-fogo e escotilhas tiram proveito das espumas de alumínio de baixa densidade por sua relação de pouca condutividade térmica e resistência ao fogo. Embora o ponto de fusão do alumínio seja baixo (<660°C), espumas

---

<sup>6</sup> *Honey combs* – painel tipo sanduíche com estrutura interna em forma de colméia ou favo para utilização estrutural, isolante, entre outros.

de alumínio são surpreendentemente estáveis quando expostas a fogo aberto devido a forte oxidação em tais condições.

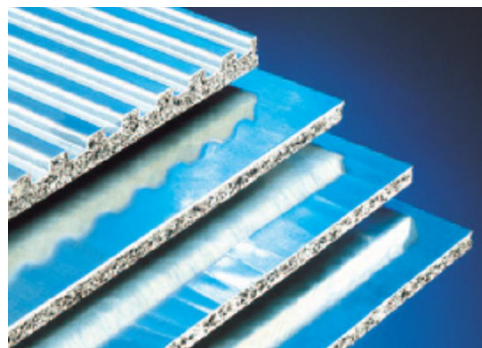
#### 2.7.4 Setor de Transportes: Espacial, Aéreo, Naval e Ferroviário

Segundo Banhart (2001), as espumas metálicas também são utilizadas na indústria aérea, substituindo painéis sanduíche (Figura 36), como os painéis de alto custo *honey comb*, com melhor performance e menor custo. Uma importante vantagem é poder já ser produzida com a curvatura desejada ou até mesmo em formas tridimensionais em contraste com as planas estruturas *honey comb*. Por estes motivos, algumas indústrias de helicópteros estão tentando substituir partes ou componentes freqüentemente feitos nestas estruturas tipo colméia por componentes com estrutura em espuma metálica. Não distante inclui-se o uso estrutural em partes de turbinas de aeronaves.

Em tecnologia espacial, as espumas metálicas estão sendo avaliadas como absorvedoras de impacto em unidades de terra e como reforço estrutural para satélites, substituindo materiais que encontram problemas com as adversidades das condições ambientais no espaço.

Na indústria naval, as mesmas vantagens de leveza e custo dos painéis de espumas metálicas também têm tornando promissor o uso deste material, mesmo que não tão freqüentemente utilizada. Como as espumas metálicas requerem menor volume de metal para cumprir as mesmas dimensões de chapas convencionais, ele também parece ser potencialmente benéfico ao meio ambiente (Banhart, 2005).

Na indústria ferroviária, as espuma metálicas seguem os mesmos princípios que na automobilística: absorção da energia de impacto, isolamento e rigidez aliados à leveza.



**Figura 36: Chapas em Espuma Metálica**  
Fonte: CYMAT, 2008.

### 2.7.5 Setor da Indústria Esportiva

Esta é uma área promissora para aplicação de novos materiais devido aos altos preços dos produtos aceitos neste setor. Todavia, não são muitas as aplicações propostas para os metais celulares nesta área. Um exemplo que pode ser citado são as caneleiras dos jogadores de futebol, onde a boa absorção de impacto e leveza do material poderiam ser explorados tornando-se um grande diferencial para este produto. Tais propriedades podem ser essenciais em um produto como este e na sua influência na carreira de um atleta profissional, por exemplo.

### 2.7.6 Setor da Indústria Biomédica

Segundo SCIENCE DAILY (2008), assim como o titânio e o cromo-cobalto, a espuma metálica pode ser utilizada em próteses e implantes dando devida atenção à biocompatibilidade. Implantes ósseos individuais (Figura 37) com estrutura semelhante à natural agora podem ser produzidos facilmente. Segundo Burblies (2008), primeiro um programa de simulação calcula a estrutura interna e a porosidade do osso, depois um equipamento de prototipagem rápida executa o implante em espuma metálica. Pesquisadores do IFAM - Instituto Fraunhofer de Manufatura e Engenharia aplicada à Pesquisa de Materiais desenvolveram este programa de simulação que calcula a estrutura interna e a distribuição de densidade no material natural. A partir desta simulação deriva-se esta estrutura para aplicação em outros materiais, como a espuma metálica. Segundo Burblies, agora pode-se produzir e adaptar as partes necessárias exatamente como elas são. Isto faz com que a técnica torne-se muito atrativa às indústrias.

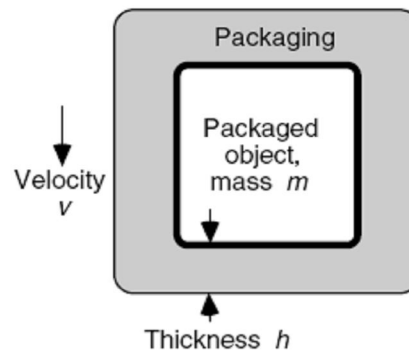


**Figura 37: Implante ósseo de mandíbula em espuma metálica.**

Fonte: SCIENCE DAILY (2008).

### 2.7.7 Embalagens

Segundo Ashby (2000), uma das funções principais das embalagens é proteger o seu conteúdo do dano causado pela aceleração e desaceleração. Esta pode ser acidental (cair de um caminhão ao ser transportada) ou antecipada, como no lançamento de um foguete. A tolerância ao dano é medida pelo nível de aceleração ou desaceleração que este pode suportar sem se partir. Este fator é diferente para cada tipo de objeto a ser embalado, tais como móveis, eletrônicos, equipamentos ou até mesmo o corpo humano (proteção para cabeça). Nestes casos, o objeto a ser transportado pode receber uma camada de espuma metálica ao seu redor como protetor de danos causados pela aceleração, desaceleração e impacto (Figura 38).

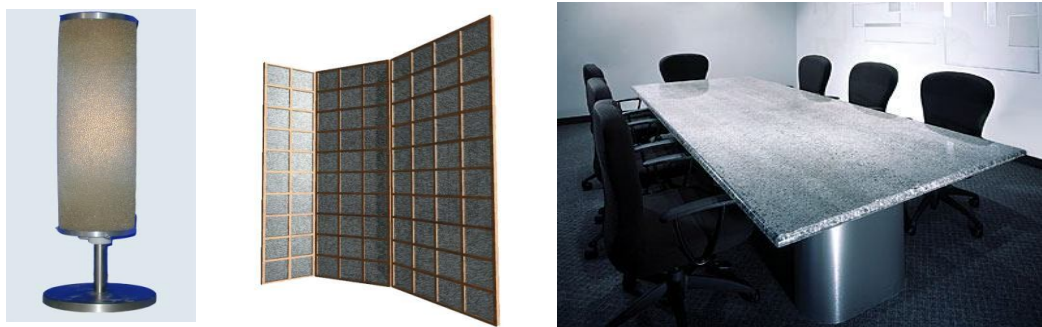


**Figura 38: Objeto embalado envolto em uma camada de Espuma Metálica.**

Fonte: Ashby (2000).

### 2.7.8 Demais Setores

Banhart (2000) descreve outras áreas ainda, tais como: Arte e Decoração em móveis e objetos de luxo (Figura 39), pois além de suas propriedades, sua aparência *high tech*, pode representar-se mais atrativa do que os materiais convencionais; no Controle Acústico; na Purificação da Água, reduzindo a concentração de íons indesejados na água, passando-a ainda contaminada por um recipiente metálico altamente poroso com sua estrutura celular aberta, onde os íons têm uma reação redox em contato com a estrutura celular metálica; na Joalheria, onde espumas de ouro ou prata podem representar um material com grande potencial, uma vez que a mesma peça tradicional com grande volume e visual pode ser substituída sem perder sua qualidade por uma de peso bem menor, mas com a mesma aparência, representando uma enorme economia (Figura 40).



**Figura 39: Aplicações da Espuma Metálica em Decoração (Luminárias, biombo e tampo de mesa.**  
 Fonte: CYMAT (2008).



a

b



c

d

**Figura 40: Aplicações da Espuma Metálica em Decoração**  
 a – Painel Decorativo    b – Sinalização    c – Forro Acústico    d – Expositor  
 Fonte: CYMAT (2008).

No que refere ao design industrial, Rubim (2003 apud Márquez 2008) afirma: o principal papel do design é conceber e integrar soluções criativas e técnicas, visando o enfrentamento de problemas nas diversas fases de desenvolvimento de produtos e serviços, exercendo, desta forma, forte influência na comercialização do produto final.

### 3 METODOLOGIA

O presente trabalho caracteriza-se por ser exploratório, realizado através de procedimentos técnicos de Pesquisa e Revisão Bibliográfica para fundamentação teórica dentro da linha de pesquisa de Design Virtual e do tema proposto. É realizada ainda análise de Estudo de Caso para modelagem, simulação virtual, validação e aplicação da Metodologia Proposta, apresentada conforme estrutura abaixo:

- Revisão Bibliográfica para caracterização das Espumas Metálicas, seus processos de fabricação, aplicação, etc.

- Coleta de Dados: obter os detalhes técnicos como geometria, carregamento e condições de serviço da estrutura definida a ser utilizada como estudo de caso: Sabiá 5.

- Modelagem da geometria do estudo de caso - chassi de veículo - no software Autocad.

- Simular o comportamento do chassi com materiais convencionais, no caso, aço e alumínio empregando o programa de elementos finitos ABAQUS CAE (Dassault Systèmes – Simulia, Providence, RI, USA).

- Comparar os resultados entre os diferentes materiais simulados para análise da estrutura em estudo.

- Proposta de representação do comportamento da espuma metálica, pesquisando as propriedades gerais, físicas e mecânicas do novo material a ser empregado, no caso a espuma metálica, no programa de seleção de materiais CES Edupack, para posterior aplicação em simulação no programa ABAQUS CAE.

- Análise da estrutura com o novo material – espuma metálica: assim como na etapa anterior, utilizando as informações coletadas no programa CES Edupack para análise no programa de elementos finitos ABAQUS CAE.

- Comparação dos resultados da simulação de material com porosidade com resultados experimentais existentes, conforme bibliografia para espécimes em metal celular. Nesta fase o objetivo é validar o modelo para materiais porosos verificando se o mesmo é representativo do comportamento dos metais celulares.

- Avaliação dos resultados obtidos com aplicação da espuma metálica na estrutura proposta frente aos resultados com a aplicação de materiais convencionais.

- Proposta inicial de um modelo de plano de negócio como ferramenta para análise da viabilidade do emprego de espuma metálica em design automotivo.

## **4 DESENVOLVIMENTO**

Ashby (1999) considera que os materiais têm atributos: sua densidade, resistência, custo, resistência à corrosão, e assim por diante. Cada projeto exige um determinado perfil do material empregado: uma densidade baixa, uma resistência elevada, um custo modesto e resistência à água do mar, por exemplo. O problema é de identificar o perfil desejado do atributo e então compará-lo com aqueles de materiais próprios da engenharia para fazer a melhor escolha. Cada novo material deve ter suas características definidas e comparadas com as de materiais já estabelecidos no mercado para que então outros critérios como custo e processos possam ser considerados para definir a solução preferível.

### **4.1 Coleta de Dados: Seleção e Propriedades dos Materiais no Software CES Edupack**











Conforme Dieter (1997, apud Marques, 2008), aquilo que funcionou uma vez é sempre uma solução, mas não necessariamente a melhor solução. Atualmente, tem ocorrido uma mudança de abordagem para seleção de materiais mediante a aplicação de métodos científicos. Um destes métodos utilizados analisa as propriedades de cada material por meio do software CES Edupack Granta Design (Marques, 2008). Neste caso, é possível estabelecer um comparativo destas propriedades, avaliando-se os elementos que compõem o projeto.

Na busca de evoluir nas técnicas de seleção de materiais e suas interpretações ou comparações entre diversos existentes, Ashby (1999) criou os “mapas de propriedades”, os quais deram origem ao software de Seleção de Materiais, nomeado de Cambridge Engineering Selector ® - CES, com o apoio dos desenvolvedores da Granta Design ® - 2007. Este programa possibilitou realizar, de modo virtual, o cruzamento de informações dotadas de propriedades distintas em que, a partir de um banco de dados pré-definido, faz-se a triagem dos materiais que coincidem com os requisitos solicitados em etapas progressivas de cruzamento, eliminando os materiais que não apresentam as características requeridas pelo projetista.

Assim sendo, o software permite separar os materiais mais adequados ao projeto proposto, limitando-os a poucas unidades para aplicação, após várias etapas de restrições através de três critérios principais de seleção: gráfico (pela comparação de



dois atributos do material em um gráfico, que pode ser de suas propriedades físicas, mecânicas, composição, etc), limite (através de limites numéricos de um ou mais atributo do material) e árvore (onde pode-se selecionar no universo de materiais do *software* uma ou mais classes específicas, como por exemplo, metais celulares dentre os metais). Antes mesmo de utilizar os critérios de seleção, pode-se identificar o grupo de materiais necessários dentro do banco geral de materiais do programa, como por exemplo, os metais celulares dentro do grupo dos metais, ainda pode-se estipular, neste caso, os ferrosos e não-ferrosos (Figura 41). O resultado é expresso através de mapas de propriedades, que são gráficos (Figuras 42, 43, 44, 45, 46, 47) visualizados de tal forma que os materiais, enquadrados na etapa de seleção, são apresentados por meio de elipses, determinando áreas de ocupação e apontando, assim, seu posicionamento diante de outros materiais por meio do cruzamento de suas propriedades (mecânicas, físicas, elétricas, térmicas, etc), composição e características gerais (custo, densidade, anisotropia, reciclabilidade, custo, etc). O software fornece também em seu relatório, por material, diversas informações complementares, tais como possíveis utilizações, fornecedores, referências bibliográficas, formas tridimensionais encontradas como exemplos, etc (conforme Quadro 02).

10 out of 134 records in cell		
Name	Identity	
 Aluminium Foam (0.5)	HYMFM_ALHD006	
 Aluminium Foam (1.0)	HYMFM_ALHD007	
 Aluminium-SiC Foam (0.07)	HYMFM_ALUD001	
 Aluminium-SiC Foam (0.16)	HYMFM_ALLD002	
 Aluminium-SiC Foam (0.41)	HYMFM_ALMD004	
 Aluminium-SiC Foam (0.54)	HYMFM_ALHD005	
 High Density Aluminium Foam (0.4...	HYMFM_ALHD	
 Low Density Aluminium Foam (0.14...	HYMFM_ALLD	
 Medium Density Aluminium Foam (...)	HYMFM_ALMD	
 Ultra Low Density Aluminium Foam ...	HYMFM_ALUD	

**Figura 41: Seleção do Grupo de Materiais no Software CES Edupack.**

Fonte: Granta Design - Cambridge Engineering Selector © - CES

<p><b>General</b>  <b>Designation</b>  Aluminium Foam (0.5)  Anisotropy Ratio * 1 - 1.1 %  Cells/volume 0.015 - 1 /mm<sup>3</sup>  Density 480 - 520 kg/m<sup>3</sup>  Price * 4 - 5 GBP/kg  CO2 creation * 19.1 - 21.2 kg/kg  Production Energy * 256 - 282 MJ/kg  Recycle Fraction * 0.3 - 0.4  Relative Density 0.17 - 0.2  Oxygen Index 100 %  Water Absorption 1e-3 - 2e-3 %</p> <p><b>Tradenames</b>  AEROWEB 3003, AEROWEB 5052, DURACORE 5052, DURACORE 5056</p>	<p><b>Mechanical</b>  Bulk Modulus * 4.7 - 5.3 GPa  Compressive Strength 5 - 10 MPa  Compressive Stress @ 25% strain 6 - 10 MPa  Compressive Stress @ 50% strain 15 - 20 MPa  Densification Strain 0.6 - 0.7  Elongation 60 - 70 %  Elastic Limit * 5 - 10 MPa  Endurance Limit * 4 - 9 MPa  Flexural Modulus 4.7 - 5.3 GPa  Fracture Toughness * 1.8 - 2.3 MPa.m<sup>1/2</sup>  Hardness - Vickers * 1 - 1.2 HV  Loss Coefficient 1.8e-3 - 2.3e-3  Modulus of Rupture 12 - 18 MPa  Poisson's Ratio * 0.28 - 0.3  Shape Factor 3  Shear Modulus * 1.75 - 2 GPa  Tensile Strength * 15 - 20 MPa  Young's Modulus 4.7 - 5.3 GPa</p>
<p><b>Composition</b>  <b>Composition (Summary)</b>  Al/12% Si  Base Al (Aluminium)  Al (Aluminium) 88 %  Si (Silicon) 12 %</p>	<p><b>Thermal</b>  Heat Deflection Temperature 0.45MPa * 140 - 150 °C  Heat Deflection Temperature 1.8MPa * 130 - 140 °C  Maximum Service Temperature * 140 - 200 °C  Melting Point 550 - 615 °C  Minimum Service Temperature -273 °C  Specific Heat 910 - 960 J/kg.K  Thermal Conductivity 7 - 14 W/m.K      Thermal Expansion 19 - 20 µstrain/°C</p>
<p><b>Typical Uses</b>  Energy absorption, Crash protection, Thermal insulation, Light weight structures, cores for sandwich structures, sound absorption, Electromagnetic shielding.</p> <p><b>Other Notes</b>  Also available as an open-celled foam.</p>	<p><b>Electrical</b>  Resistivity 31.6 - 34.7 µohm.cm</p> <p><b>Durability</b>  Flammability Good  Fresh Water Very Good  Organic Solvents Very Good  Oxidation at 500C Very Poor  Sea Water Good  Strong Acid Very Good  Strong Alkalis Poor  UV Very Good  Wear Average  Weak Acid Very Good</p>

**Quadro 02: Exemplo da Saída de Dados de um Consulta no Software CES Edupack.**

Fonte: Granta Design - Cambridge Engineering Selector ® - CES

Segundo Botelho (2003), destacam-se alguns fatores para a Análise e Seleção de Materiais conforme o Quadro 03:

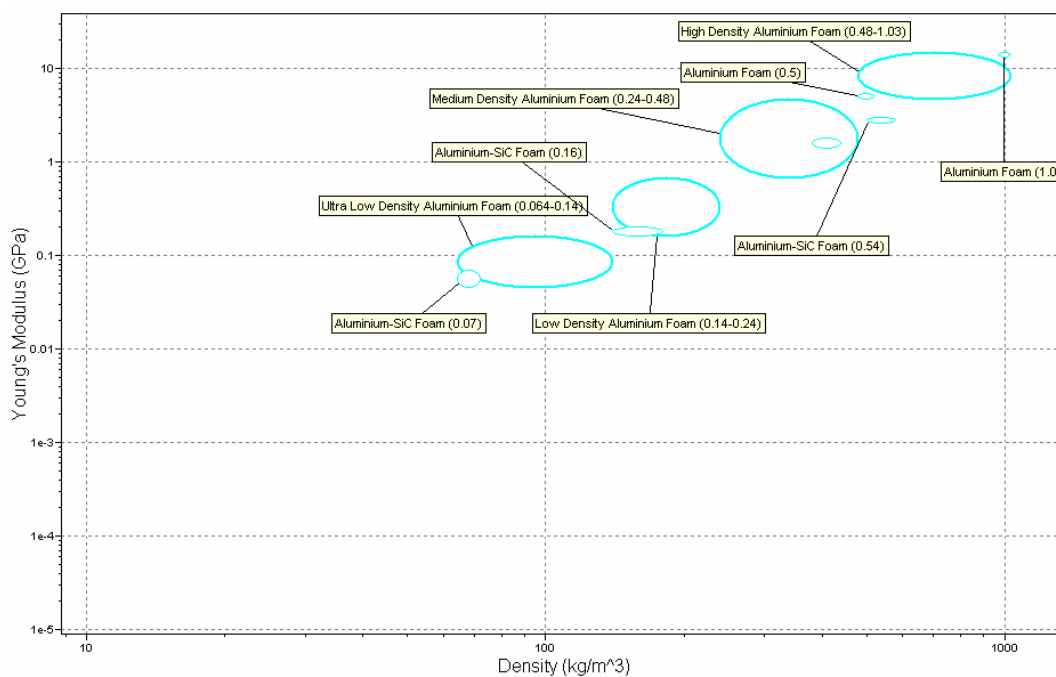
<p>1. Propriedades Mecânicas dos Materiais</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• limite de resistência; • limite de escoamento;</li> <li>• alongamento; • fadiga; • tenacidade ao entalhe;</li> <li>• dureza;</li> </ul>	<p>5. Custo</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• custo de fabricação;</li> <li>• vida útil do equipamento (previsto);</li> <li>• custo de paralisação e reposição do equipamento;</li> </ul>
<p>2. Condições de Serviço</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• temperatura de operação; • pressão de operação;</li> <li>• fluxo de serviço: 1.composição química; 2.concentração; 3. PH; 4.impurezas; 5.sólidos em suspensão; 6.toxidez, etc. • nível e natureza de tensões no material;</li> </ul>	<p>6. Segurança e Meio-Ambiente</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• local da instalação (risco potencial);</li> <li>• fluido letal, inflamáveis, tóxicos e explosivos;</li> <li>• pressões e temperaturas elevadas; • vida útil;</li> <li>• ciclo de vida;</li> </ul>
<p>3. Fabricação do Equipamento</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• tipo, formato e tamanho; • tratamento térmico.</li> <li>• soldabilidade, usinabilidade e conformação dos materiais;</li> </ul>	<p>7. Outros</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• coeficiente de atrito; • condutibilidade térmica;</li> <li>• resistência à abrasão; • soldagem dissimilar;</li> </ul>
<p>4. Disponibilidade dos Materiais</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• prazo de entrega; • importação; • estoque;</li> <li>• quantidade mínima para compra;</li> </ul>	

**Quadro 03: Fatores para a análise e seleção de materiais.**

Fonte: Botelho (2003).

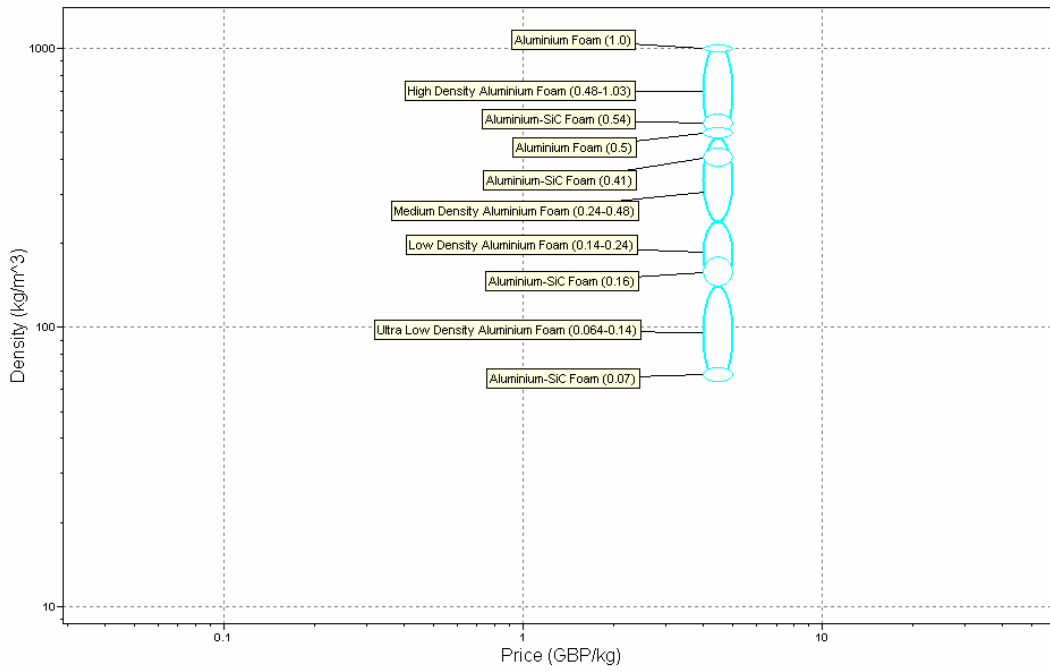
As atividades da Análise e Seleção de Materiais podem ser executadas tendo outros objetivos, cada um caracterizado e/ou complementado pelos requisitos especificados anteriormente. Assim, a lista abaixo apresenta esses outros aspectos:

- redução de custo;
- novas condições de serviço;
- materiais *versus* processo;
- redução de peso;
- novos materiais.



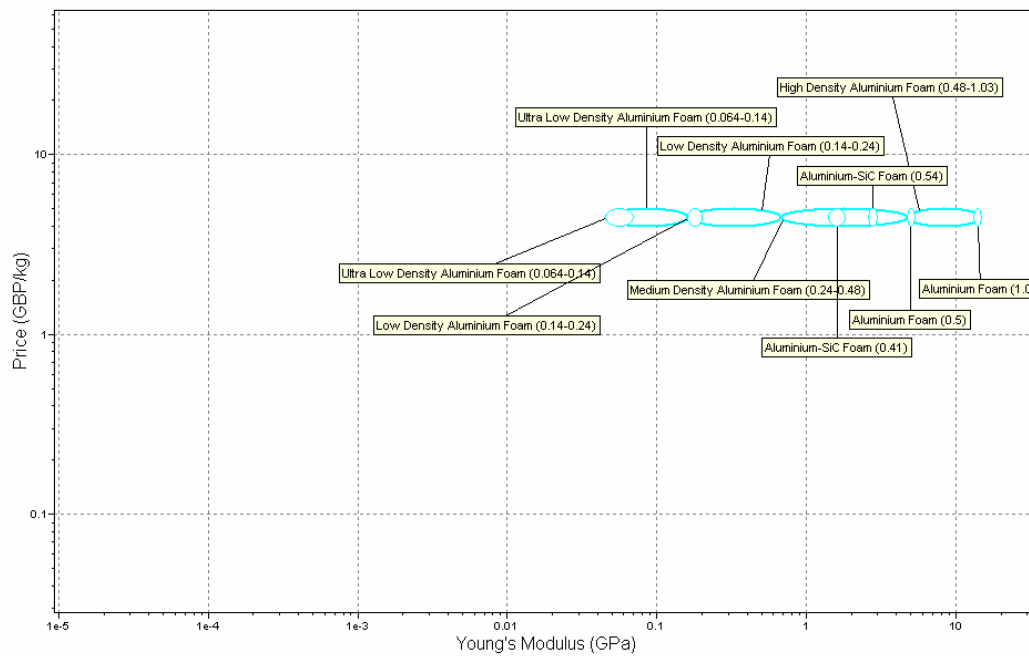
**Figura 42: Módulo de Elasticidade x Densidade.**

Fonte: Gerado pelo autor no software Cambridge Engineering Selector ® - CES.



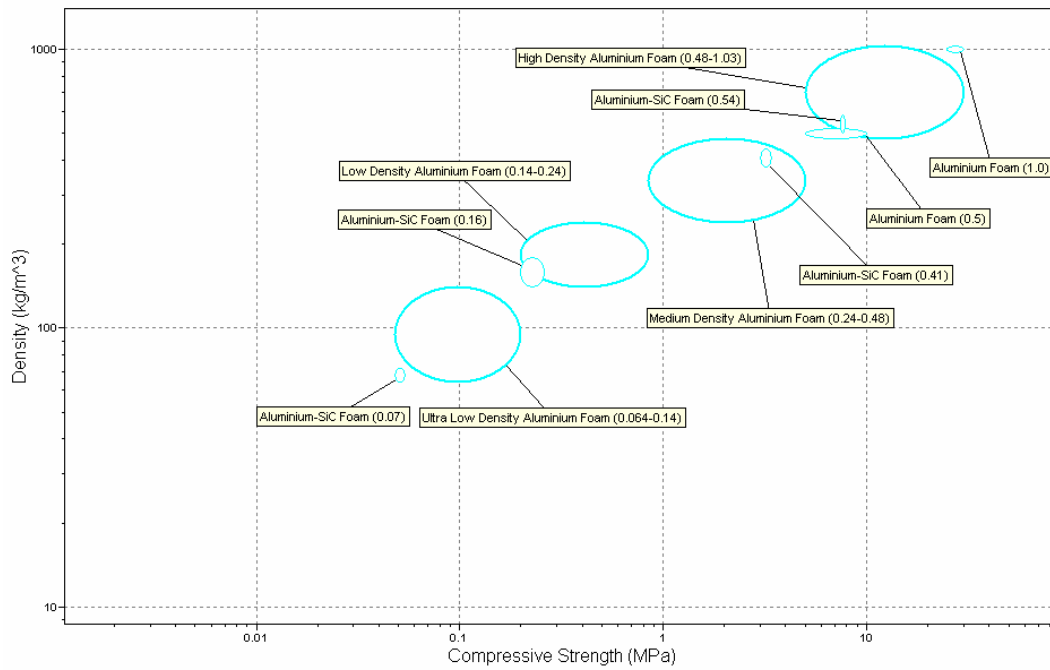
**Figura 43: Densidade x Preço.**

Fonte: Gerado pelo autor no software Cambridge Engineering Selector ® - CES (2008).



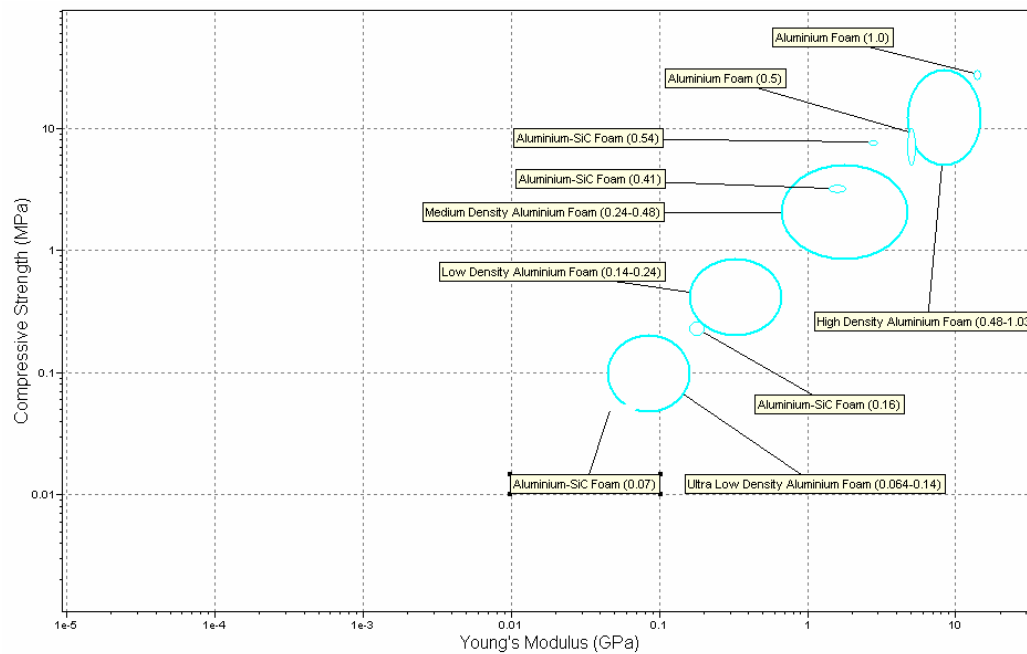
**Figura 44: Preço x Módulo de Elasticidade.**

Fonte: Gerado pelo autor no software Cambridge Engineering Selector ® - CES (2008).



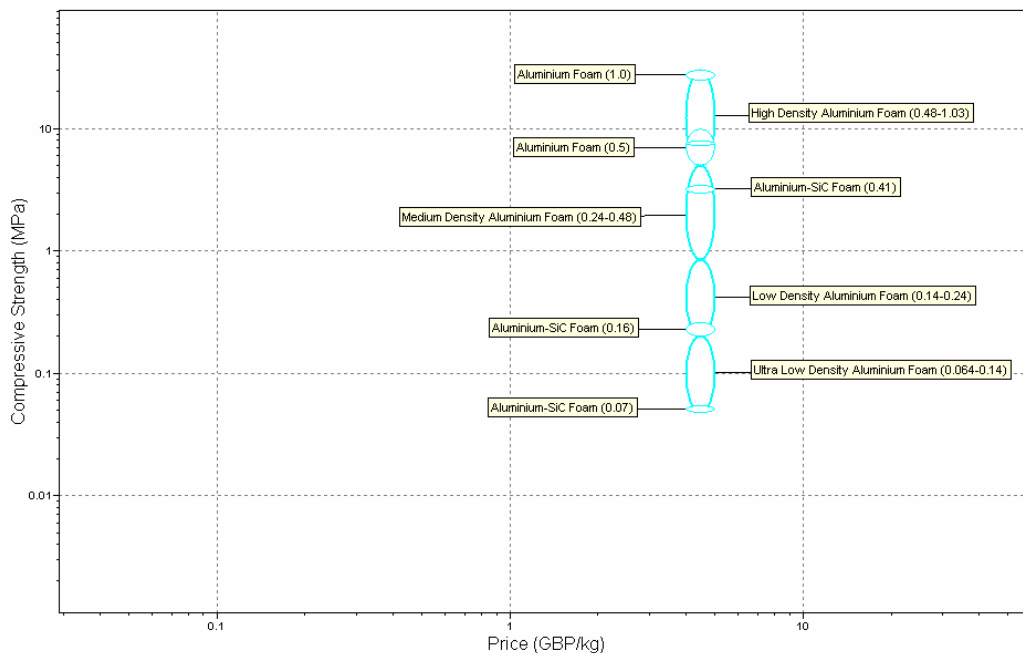
**Figura 45: Densidade x Resistência à Compressão.**

Fonte: Gerado pelo autor no software Cambridge Engineering Selector ® - CES (2008).



**Figura 46: Resistência à Compressão x Módulo de Elasticidade.**

Fonte: Gerado pelo autor no software Cambridge Engineering Selector ® - CES (2008).



**Figura 47: Resistência à Compressão x Preço.**

Fonte: Gerado pelo autor no software Cambridge Engineering Selector ® - CES (2008).

Com base em todas as figuras acima apresentadas e com os possíveis cruzamentos das variáveis intervenientes para a seleção do material, escolheu-se para a aplicação na simulação deste trabalho a Espuma Metálica Aluminium Foam (1.0) (HYMFM\_ALHD007 – Alulight / Alusion / Cymat, conforme Anexo 01 – Lista de Fornecedores de Espuma Metálica) com suas potenciais aplicações (alto absorvedor de impacto, redução de vibração, painéis de isolamento acústico e térmico, baixo condutor térmico, mobiliário, sinalização, luminárias e forros acústicos, painéis decorativos internos e externos, etc) e informações expressas abaixo na Quadro 04.

<p><b>General</b></p> <p><b>Designation</b>  Aluminium Foam (1.0)  Anisotropy Ratio * 1 - 1.1 %  Cells/volume 0.015 - 1 /mm<sup>3</sup>  Density 970 - 1030 kg/m<sup>3</sup>  Price * 4 - 5 GBP/kg  CO2 creation * 19.1 - 21.2 kg/kg  Production Energy * 256 - 282 MJ/kg  Recycle Fraction * 0.3 - 0.4  Relative Density 0.35 - 0.39  Oxygen Index 100 %  Water Absorption 1e-3 - 2e-3 %</p> <p><b>Tradenames</b>  AEROWEB 3003, AEROWEB 5052, DURACORE 5052, DURACORE 5056</p>	<p><b>Mechanical</b>  Bulk Modulus * 13.2 - 14.8 GPa  Compressive Strength 25 - 30 MPa  Compressive Stress @ 25% strain 35 - 44 MPa  Compressive Stress @ 50% strain 60 - 70 MPa  Densification Strain 0.4 - 0.45  Elongation 40 - 50 %  Elastic Limit * 25 - 30 MPa  Endurance Limit * 23 - 27 MPa  Flexural Modulus 13.2 - 14.8 GPa  Fracture Toughness * 5 - 6 MPa.m<sup>1/2</sup>  Hardness - Vickers * 2.5 - 3 HV  Loss Coefficient 3.5e-3 - 4.1e-3  Modulus of Rupture 30 - 36 MPa  Poisson's Ratio * 0.28 - 0.3  Shape Factor 3  Shear Modulus * 5 - 5.5 GPa  Tensile Strength 50 - 70 MPa  Young's Modulus 13.2 - 14.8 GPa</p>
<p><b>Composition</b></p> <p><b>Composition (Summary)</b>  Al/ 6% MgSi  Base Al (Aluminium)  Al (Aluminium) 99 %  MgSi (Magnesium Silicate) 0.6 %</p>	<p><b>Thermal</b>  Heat Deflection Temperature 0.45MPa * 150 - 160 °C  Heat Deflection Temperature 1.8MPa * 140 - 150 °C  Maximum Service Temperature * 140 - 200 °C  Melting Point 550 - 615 °C  Minimum Service Temperature -273 °C  Specific Heat 910 - 960 J/kg.K  Thermal Conductivity 28 - 46 W/m.K  Thermal Expansion 18.5 - 19.5 µstrain/°C</p>
<p><b>Typical Uses</b>  Energy absorbtion, Crash protection, Thermal insulation, Light weight structures, cores for sandwich structures, sound absorbtion, Electromagnetic shielding.</p> <p><b>Other Notes</b>  Also available as an open-celled foam.</p> <p><b>Reference Sources</b>  Name Identity  Alcan Inc. M_005  Alulight International GmbH F_011  Cymat Corporation F_013  ERG Materials and Aerospace F_015  M-Pore GmbH F_016  Shinko Wire Company F_014</p>	<p><b>Electrical</b>  Resistivity 10.5 - 12 µohm.cm</p> <p><b>Durability</b>  Flammability Good  Fresh Water Very Good  Organic Solvents Very Good  Oxidation at 500C Very Poor  Sea Water Good  Strong Acid Very Good  Strong Alkalis Poor  UV Very Good  Wear Average  Weak Acid Very Good  Weak Alkalis Good</p>

**Quadro 04: Saída de dados da espuma metálica selecionada para a aplicação na Simulação.**

Fonte: Gerado pelo autor no software Cambridge Engineering Selector ® - CES (2008).

## 4.2 Métodos de Modelagem e Ferramentas Computacionais

Os métodos de modelagem incluem realidade virtual, modelagem e ferramentas de simulação para descrever o comportamento do produto durante todo o seu ciclo de vida. Muitas destas ferramentas são baseadas em sistemas CAD (Projeto Assistido por Computador), CAM (Manufatura Auxiliada pela Computação), CAE (*Computer aided Engineering* - Engenharia Auxiliada por Computador), entre outros programas. Muitas formas os distinguem dos outros sistemas tradicionais de design, tais como a inovação e as atividades computacionais. A integração entre estes sistemas (CAD, CAM, CAE) propicia uma completa avaliação virtual do produto. Vários métodos de modelagem e ferramentas são combinados para gerar um simples e rápido modelo do produto, que associado às correntes ferramentas de renderização, podem chegar a um nível mais próximo da visualização fotorrealística.

### 4.2.1 Tecnologia CAD

A sigla *CAD* foi utilizada pela primeira vez pelo pesquisador Ivan Sutherland, do *Massachusetts Institute of Technology* (M.I.T.) no início dos anos 60. O termo pode ser definido como o processo de projeto que utiliza técnicas gráficas computadorizadas, através da utilização de softwares de apoio na resolução de problemas associados ao mesmo.

Para Souza (2003), estes sistemas já propiciavam várias vantagens, tais como, melhor gerenciamento de desenhos, precisão do dimensionamento, maior rapidez na recuperação, modificação ou atualização de projetos.

Por anos, a utilização de sistemas CAD foi limitada à aplicação em grandes empresas, devido direta ou indiretamente aos custos envolvidos, desde software/hardware até a qualificação da mão-de-obra. Segundo Souza (2003), a década de 70 foi marcada pela nova geração dos sistemas CAD e o desenvolvimento de técnicas computacionais para a representação de objetos tridimensionais. Hoje, os sistemas CAD não se limitam à geração e manipulação de desenhos em duas dimensões. Este recurso representa apenas uma pequena parcela dos possíveis benefícios a serem obtidos com a utilização desta tecnologia, podendo representar uma potente e indispensável ferramenta para a indústria moderna, permitindo, além de desenhos 2D, modelar objetos tridimensionais com formas complexas, realizar análise de forma geométrica para auxiliar a manufatura, definir volume e centro de massa do produto além da comunicação com outros softwares, através de interfaces padronizadas.

A partir da década de 80, outros sistemas computacionais tiveram ênfase e foram desenvolvidos para suprir as necessidades da engenharia com o objetivo de integrar o processo de manufatura por sistemas computacionais CIM (*Computer Integrated Manufacturing* – Fabricação Integrada por Computador) (Rozenfeld, 1996).

Utiliza-se um *software* CAD para o design do produto, geração de detalhamento e molde, após estas etapas um sistema CAE será utilizado para verificar se os projetos dos modelos estão corretos. Depois utiliza-se um *software* CAM para gerar os programas CNC (termo usado desde os anos 40 e 50 para máquinas controladas numericamente) que serão executados em um centro de usinagem para a manufatura do ferramental. Para verificar se a geometria usinada está condizente com o modelo do CAD, dados geométricos do modelo (nuvem de pontos cartesianos no espaço) serão adquiridos por uma máquina de medir coordenadas. As informações capturadas neste



processo serão comparadas com o modelo CAD através de um sistema CAI (Inspeção Auxiliada por Computador), que irá gerar um relatório quantificando e posicionando os desvios de forma, ocorridos no processo de usinagem. Com o atual desenvolvimento destes sistemas, este ciclo pode ser executado sem grandes restrições.

*“Desta forma, as geometrias construídas no CAD representam um elo de ligação entre outros sistemas computacionais de auxílio à engenharia. São as informações geométricas provenientes do CAD que estes sistemas utilizam como base de cálculo. Portanto, a correta escolha do software CAD a ser implantado em um ambiente de trabalho tem importância significativa, não apenas para as etapas de desenho e projeto mas também para as etapas que se sucedem.”*

(Souza, 2003)

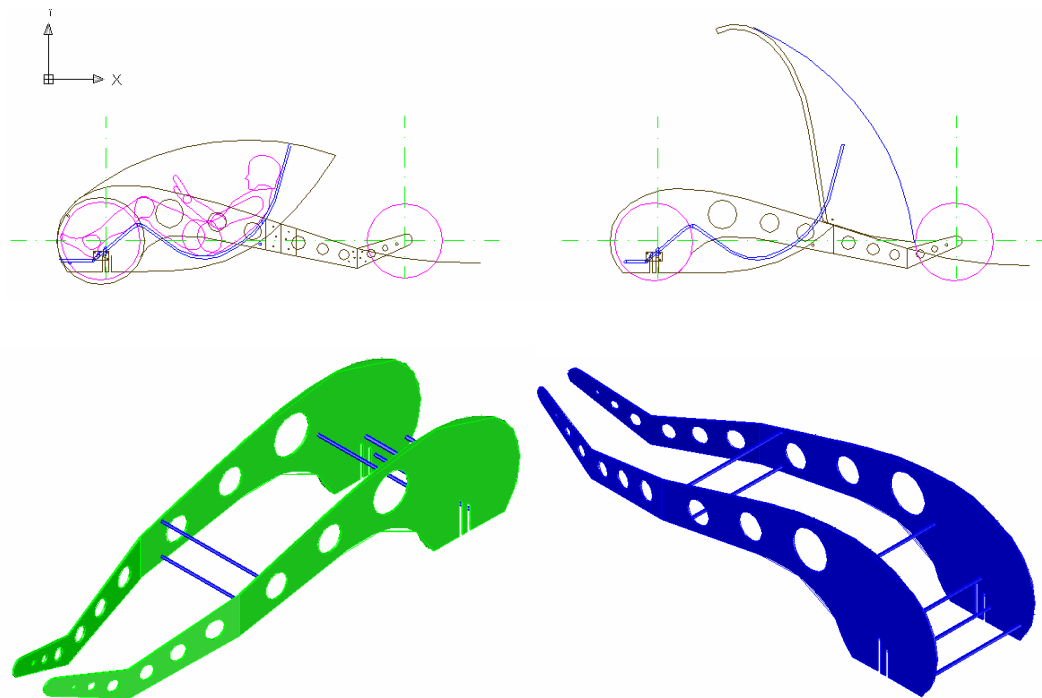
Segundo Aymone e Teixeira (2001), o uso de programas CAD não se restringe ao desenho técnico, mas abrange também a modelagem tridimensional com aplicação em áreas como a arquitetura, Design e publicidade, onde os modelos tridimensionais são utilizados para obter-se mais de uma vista de um mesmo objeto, tal como cortes, além de propiciar simulações, a criação de imagens fotorrealísticas e animações para o estudo e apresentação de projetos.

Existe uma grande variedade de softwares CAD tridimensionais disponíveis no mercado e estes podem ser caracterizados, principalmente, pela forma de gerar suas geometrias:

- Modeladores de Sólidos: capazes de gerar objetos tridimensionais, sólidos, possuindo centro de gravidade e volume e capazes também de realizar operações *booleanas*. Não adequados para modelar formas geométricas complexas.
- Modeladores de Superfícies: fazem uso de formulações matemáticas complexas, conhecidas como *splines*. Permitem o modelamento tridimensional de formas geométricas complexas. As geometrias não possuem espessura e as posições de cada ponto podem ser alteradas, mantendo o objeto tridimensional.
- Modeladores Híbridos: utilização de complexos algoritmos matemáticos usufruindo dos recursos das duas classes anteriores, utilizando o modelagem mais adequado para cada situação específica.

Segundo Aymone e Teixeira (2001), com os recursos de modelagem de sólidos é possível, através de operações lógicas de adição, subtração e interseção de formas simples, gerar objetos sólidos de alta complexidade com alto grau de precisão, por serem matematicamente precisos. Como estes são sólidos, é possível também calcular suas propriedades de massa, além de poder cortá-los ou uni-los a outros objetos.

No processo de modelagem, neste trabalho, utiliza-se o *software* Autocad 2007 para modelar a geometria do estudo de caso através da extrusão de polilinhas e subtração de formas primitivas básicas, como cilindros. Através de operações de edição, como espelhamento chega-se ao modelo final que é todo unido em um objeto só para posterior exportação para o *software* de simulação. O Autocad foi utilizado por sua compatibilidade no momento de exportar a estrutura para o *software* ABAQUS CAE, para o cálculo e visualização de tensões e deformações. Para um bom funcionamento ao gerar a malha e realizar a simulação no ABAQUS CAE, a geometria deve ser importada sólida e preferencialmente unida como um objeto 3D sólido. Assim, o Autocad 2007, dentre outros programas de modelagem foi o que melhor respondeu a este requisito de importação no software de simulação pelo Método de Elementos Finitos. A modelagem foi feita a partir do projeto bidimensional, também em Autocad, fornecido pela REDEMAT – UEMG. A partir deste, chega-se então ao modelo final (Figura 48) a ser exportado em formato “sat” (ACIS) ou “iges” (*industry-standard formats*) para o ABAQUS CAE.



**Figura 48: Vistas laterais e em perspectiva do Modelo gerado em Autocad.**

Fonte: Gerado pelo autor em Autocad 2007.

De todas as etapas do processo de modelagem por elementos finitos a geração da malha é etapa que mais consome tempo e recursos. Durante o processo de conversão de

arquivos CAD para CAE, sempre existem perdas de informações que podem produzir superfícies irregulares, inconsistentes ou até mesmo inexistentes. Antes que a malha possa ser gerada é necessário a reconstrução ou reparação dessas superfícies, muitas vezes no modelo em CAD, para posterior importação no *software* de Elementos Finitos. Além disso, muitas vezes, a geometria tem que ser simplificada nos seus detalhes para que a malha gerada possa ser representativa da análise em questão. É durante esta etapa que são definidos os tipos de elementos finitos (*shell, solid, beam, etc*) a serem utilizados no modelo de acordo com os fenômenos físicos que estes são capazes de representar e a necessidade de cada caso, principalmente em tratando-se de custo computacional e tempo disponível. A correta definição dos elementos, suas propriedades e da densidade da malha (tamanho de elemento) é determinante na precisão das respostas obtidas através do cálculo.

#### **4.2.2 Ambiente de Realidade Virtual e Simulação**

Segundo Malfanti (2001), existem muitas definições para realidade virtual, pois ela pode ter diferentes significados para cada pessoa, porém pode-se dizer que realidade virtual consiste em simulações tridimensionais interativas que reproduzem ambientes e situações reais através do uso de computadores. Pode ter alto conteúdo gráfico, sonoro e até mesmo tátil, quando imersiva. Tornando-se assim em uma nova e surpreendente forma de navegação e troca de dados.

O objetivo deste tipo de ambiente é aumentar a integração entre os projetistas e os produtos desenvolvidos. Técnicas interativas são usadas para o criador ver, ouvir, tocar e interagir com o modelo de sua criação. Estando imersos neste ambiente virtual pode-se criar e modificar produtos em tempo real, vendo-se os efeitos das modificações imediatamente. Estas novas facilidades proporcionam um ambiente de realidade virtual 3D que aumenta muito o campo de visualização do produto. Este ambiente abrange muitas fases do design, incluindo a visualização sensória em tempo real de produção, criando-se um protótipo virtual que pode ser manipulado e checado parte a parte, antes da construção de um protótipo físico ou modelo final.

A pesquisa relacionada a sistemas de Realidade Virtual, que já teve seu reconhecimento na área de entretenimento e jogos, assim como na área militar, nos últimos anos passou a ser cada vez mais relacionada a outras áreas, como a engenharia e o design, para melhor representação, percepção e análise do espaço físico e/ou produto

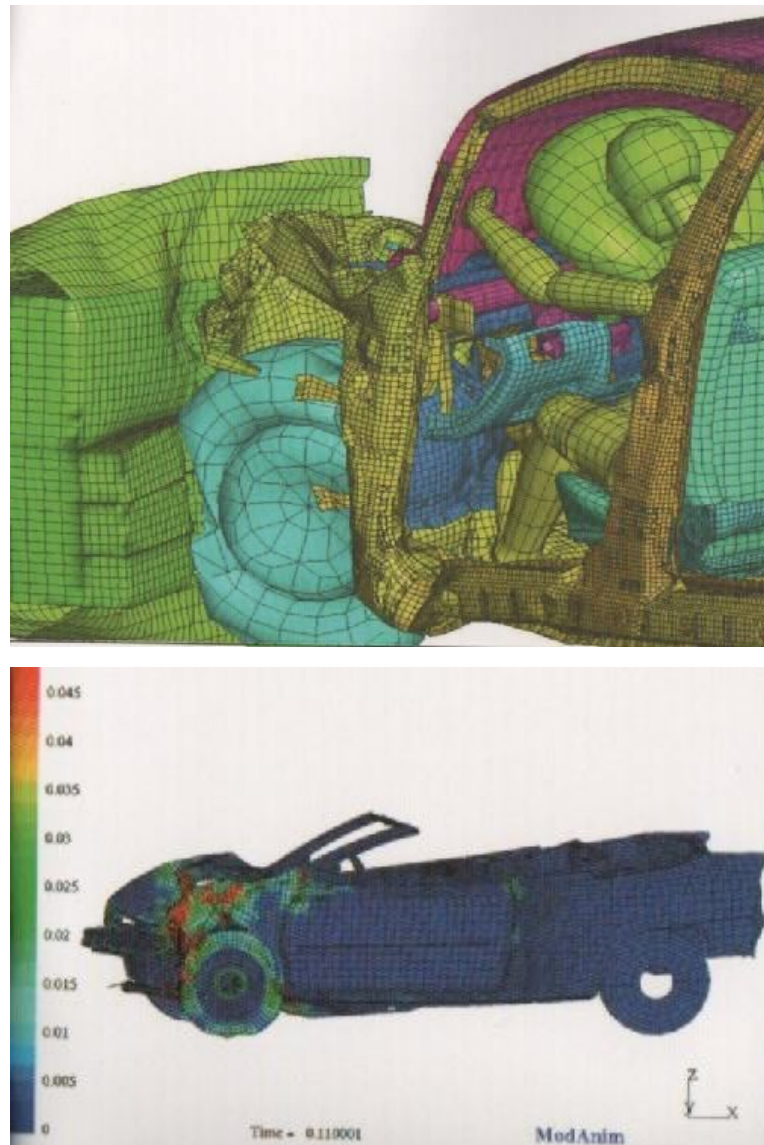
envolvido. Nestas áreas, o uso da Realidade Virtual permite um ganho nos processos de análise, quando conjugada com processos de simulação. A visualização em tempo real dos efeitos de uma mudança no modelo representado facilita a compreensão do processo.

Segundo Aymone e Teixeira (2007), a tecnologia de realidade virtual pode ser empregada em diversas áreas, tais como medicina, educação e engenharia e é definida pela interação e imersão do usuário. A evolução do *VRML 3D (Virtual Reality Modelling Language)* trouxe aos usuários a possibilidade de interagir com os novos modelos na *WEB*, usando tecnologias multimídia. Segundo Aymone e Teixeira (2007), a navegação do usuário em *VRML* não é imersiva, pois não utiliza equipamentos como capacetes para realidade virtual. Porém tem boa qualidade visual e boa navegação em tempo real, permitindo aproximar, rotacionar e verificar materiais, além de caminhar livremente ao redor do ambiente simulado. Como produto, a linguagem *VRML*, é um objeto orientado representativamente por níveis de abstração e com habilidade de ser fornecido através da internet (*download*). Equipes colaborativas podem construir juntas um modelo, sendo necessário para tanto uma mesma plataforma de trabalho. Com esta tecnologia, muitos projetistas em várias localidades, podem discutir e trabalhar sobre o mesmo projeto na Internet ou intranet simultaneamente. O objetivo desta integração é a consistência de informações e a simplificação das operações. Desta forma, diferentes interfaces, falta de padronização no gerenciamento de dados em CAD e incompatibilidades de sistemas CAD, entre outros, devem desaparecer gradualmente.

#### **4.2.3 Tecnologia CAE – O Método Dos Elementos Finitos – ABAQUS/CAE**

Segundo Alves (2000), é próprio da mente humana querer subdividir os sistemas em seus componentes individuais (elementos), assim, surge a idéia que, entendendo-se o comportamento de cada trecho da estrutura ou elemento, entender-se-á o conjunto, por mais complexo que possa parecer. Segundo Alves (2007), é exatamente neste ponto que entra em cena o Método dos Elementos Finitos. Com ele é possível dividir uma estrutura complexa em uma montagem de elementos de geometria simples (malha de elementos finitos), como triângulos, quadriláteros, tetraedros, paralelepípedos, etc, ou seja, a estrutura é formada a partir da montagem de elementos individuais, os elementos finitos. Esses elementos são conectados uns aos outros por intermédio de nós e está é a grande diferença em relação ao mundo analítico. Nos modelos em elementos finitos

apenas os deslocamentos destes nós são determinados em primeira instância e não todos os pontos da estrutura. Porém, julga-se que estes nós, se escolhidos em número suficiente, determinem as tensões e deformações sofridas pela estrutura com precisão, para então avaliar se a mesma atende às solicitações desejadas. Assim, se um modelo possuir 10.000 nós, o software só calculará os deslocamentos, por exemplo, destes pontos, mas supõe-se que eles sejam suficientes para representar o comportamento de todo conjunto adequadamente. Por isso, diz-se que o modelo é discretizado, pois não considera os infinitos pontos da estrutura da estrutura, que é contínua. Segundo Moreira (2007), hoje, a indústria é movida por três grandes forças tecnológicas: CAD, CAM, CAE. O CAE, terceiro componente deste tripé, que movimenta e impulsiona a economia, é responsável por aumentar a produtividade dos engenheiros e projetistas, melhorando o design e a qualidade dos produtos e conseqüente funcionamento dos produtos. É grande o número de empresas que vêm desenvolvendo os seus produtos com a utilização de modernas ferramentas de análise, como os recursos de CAE, aplicando o MEF na solução de problemas estruturais e/ou mecânicos para obtenção de produtos com alta qualidade e desempenho. Com estes recursos, diminuem-se custos de produção, com utilização da Engenharia Preditiva, ou seja, o comportamento dos componentes é simulado no computador, onde são previstas as falhas e/ou deficiências de performance, podendo-se prever e realizar as correções dos problemas. Os projetistas podem efetuar cálculos e dimensionamentos dos principais elementos estruturais, por exemplo, e das partes móveis da carroceria, assim como contínuas simulações virtuais do comportamento do veículo, como em condições de uso (tanto para cada componente como para o conjunto), frente a solicitações mecânicas (torção, flexão, fadiga, choque), verificando em cada momento o desempenho do projeto e segurança do usuário, como é visto nas figura 49 e no capítulo 4.2.4.1 com a apresentação do projeto do veículo Stark.



**Figura 49: Simulação de impacto frontal – deformações.**

Fonte: Piemont (2004).

Moreira (2007) indica que o mercado mundial CAE faturou em 2006 US\$ 1.388 bilhão e a perspectiva é de crescimento. Aplicações dos *softwares* CAE estão em todos os segmentos de áreas como a engenharia, design, arquitetura, entre outros e as análises e simulações feitas nestes sistemas são numerosas, sendo o papel principal do software CAE antecipar a detecção de falhas nos projetos para que sejam corrigidas o quanto antes, pois quanto mais tempo a fala levar para ser corrigida, mais cara será a solução do problema. Segundo Moreira (2007), a correção de uma falha no protótipo digital pode levar alguns minutos ou no máximo horas e não custar praticamente nada em

comparado a correções em modelos físicos, mas se esta falha não for detectada durante a fase de projeto, chegar à produção e só for detectada quando o produto já estiver no mercado, a reparação do erro pode custar milhões de reais e ainda prejudicar a imagem da empresa. A verificação de erros ainda na fase de projeto e a correção deles ainda no protótipo digital, modelado em CAD, reflete, por exemplo, no número de protótipos físicos, que pode ser reduzido, implicando em redução de custos e no tempo de desenvolvimento e fabricação do produto. Os *softwares* CAE permitem, assim, com que os projetistas possam, por exemplo, trabalhar com espessuras menores de um determinado material, sem com isso prejudicar a segurança do produto, reduzindo assim o consumo de matéria-prima.

Segundo Alves (2000), os *softwares* de Elementos Finitos oferecem uma biblioteca com diferentes tipos de elementos, cada qual representando um diferente modelo conhecido na mecânica estrutural (placas, cascas, membranas, sólidos, vigas, etc), por intermédio dos modelos de análise. Definido o modelo estrutural, pode-se analisar a estrutura inteira no computador, qualquer que seja a forma da estrutura e o tipo do carregamento, determinando o estado de tensões na estrutura e avaliando sua resistência mecânica. Assim, o MEF é uma ferramenta extremamente útil para auxiliar as equipes de engenharia no desenvolvimento de um produto, determinando seu comportamento estrutural e garantindo que não haverá falha, tanto em condições normais como em situações críticas. Desta forma, o modelo deve representar trecho a trecho da forma mais precisa possível o que ocorre na estrutura real. Exemplo deste tipo de sistema é o software ABAQUS CAE (Simulia, 2006), utilizado neste trabalho como ferramenta para pesquisa e tomada de decisão de projeto. Com ele o usuário pode, de forma rápida e eficiente, criar, editar, monitorar, diagnosticar e visualizar as análises avançadas do ABAQUS. O *software* integra modelagem, análise, gerenciamento do cálculo e visualização dos resultados em um ambiente amigável e consistente, familiar para quem tem experiência em *softwares* como o Autocad. Nele, pode-se, no módulo Part, criar, importar, editar e gerenciar as partes do modelo a ser analisado. Os modelos geométricos podem ser importados do Autocad utilizando-se o formato “acis-sat” ou de outros softwares de modelagem com a formato “iges”, convertendo o modelo em um objeto 3D sólido. Várias opções de edições são disponibilizadas antes, durante e depois da importação de algum modelo. Com fáceis ferramentas para monitoramento do andamento da análise, o programa provê um produtivo ambiente para gerar, interpretar e comunicar os resultados obtidos.

#### 4.2.4 Tecnologia CAE na Indústria Automotiva

Segundo Ricardo (2007), o emprego de tecnologia CAE ou MEF na indústria automotiva torna-se cada vez mais necessária e importante em função da crescente pressão por redução de custos e diminuição do tempo de desenvolvimento de novos produtos. O uso do computador com os softwares CAE atuais facilitou muitas tarefas do processo de simulação e análise. Cada uma destas tarefas ou tipo de situação exige um tipo de modelagem recomendada para resolver o problema. Caso seja um componente modelado em chapa, por exemplo, o elemento de superfície chamado casca fornecerá a espessura solicitada. Este ainda pode ser modelado como um sólido, pois quanto mais completo e mais próximo da realidade for o modelo, assim como suas condições de contorno, carregamentos e propriedades dos materiais, mais confiáveis serão seus resultados. Ainda, segundo Ricardo (2007), os primeiros programas de geração de modelos de elementos finitos surgiram em meados dos 1970, antes disto, os modelos eram feitos de forma manual, em folhas de papel ou por meio de rotinas de geração de malhas, o que exigia dos projetistas muito conhecimento de informática e experiência para interpretar os resultados das análises.

Entre as estruturas da indústria automotiva que podem ser simuladas, as mais freqüentemente analisadas são: carroceria, chassi, suspensão, motor, simulação de campos eletromagnéticos, simulação de aerodinâmica. Estas simulações, como citado anteriormente, têm como objetivo principal a diminuição de protótipos físicos e a redução do tempo no desenvolvimento de produto, além de agregar valor a um produto de base tecnológica com qualidade e durabilidade. Esta redução do tempo de desenvolvimento do produto faz com que os projetistas sejam cada vez mais especialistas e iniciem as simulações com a pesquisa e caracterização das propriedades dos materiais. Como visto, o CAE está cada vez mais presente na indústria automotiva, porém, um modelo só é consistente se for validado experimentalmente. Assim, a metodologia desenvolvida para um veículo pode ser aplicada a outro similar reduzindo o ciclo de desenvolvimento do produto e auxiliando na tomada de decisão e projeto, como é visto a seguir com o projeto do veículo Stark.



#### 4.2.4.1 Jipe Stark (TAC) – Veículo Nacional de Base Tecnológica

O projeto do jipe Stark (“forte”, em alemão) surgiu através de uma iniciativa da FIESC (Federação das Indústrias do Estado de Santa Catarina) pelo fato do estado ter grande quantidade de produtores de peças, mas não possuir montadoras de veículos. Então, a TAC (Tecnologia Automotiva Catarinense), uma empresa automotiva brasileira criada e sediada desde 2004 em Joinville, no estado de Santa Catarina, chegou para oferecer uma opção de 4x4 que garante robustez e conforto em qualquer trilha ou trajeto urbano lançando o projeto do off-road Stark 4WD Flex (Figuras 50 e 51). A empresa foi concebida sobre três importantes diferenciais competitivos, inovadores no segmento automotivo neste nicho de mercado: rigoroso planejamento do negócio; formação de parcerias com renomados fabricantes; utilização das mais modernas tecnologias para o desenvolvimento do carro, como modelos matemáticos, análise virtual de protótipos pelo método de elementos finitos para o dimensionamento de seus componentes estruturais.



**Figura 50: Desenho do off-road Stark 4WD.**

Fonte: TAC(2008).



**Figura 51: Desenho do off-road Stark 4WD.**

Fonte: TAC(2008).

Segundo TAC (2008), além do design arrojado e sofisticado, a grande novidade fica por conta do motor S23, um 2.3L 16V Turbodiesel Intercooler, inédito no Brasil, fornecido pela FPT – Powertrain Technologies, maior fabricante de sistemas de propulsão da América Latina. O propulsor do Stark, o S23, possui quatro cilindros, injeção direta common-rail e gera 127 cv a 3.600 rpm, com um torque de 30,6 kgfm a 1.800 rpm. Desenvolvido e fabricado na Itália, o motor também será produzido na planta brasileira da FPT de Sete Lagoas (MG), a partir de 2009. O S23 alia excelente desempenho e baixo consumo, com reduzidos índices de emissões de poluentes, atendendo à norma de controle Euro III e predisposto para Euro IV e Euro V.

Segundo TAC (2008), a estrutura tubular reforçada de elevada resistência mecânica oferece segurança em trilhas, minimizando riscos ao condutor e passageiros, sendo recoberta por uma carroceria de painéis de PRPV (plástico reforçado com fibras de vidro). Todos estes componentes foram planejados para possibilitar a montagem e desmontagem dos mesmos favorecendo a troca de peças e aumentando o ciclo de vida dos materiais utilizados, uma vez que os mesmos podem ser destinados a outros fins após sua utilização principal (Figura 52).

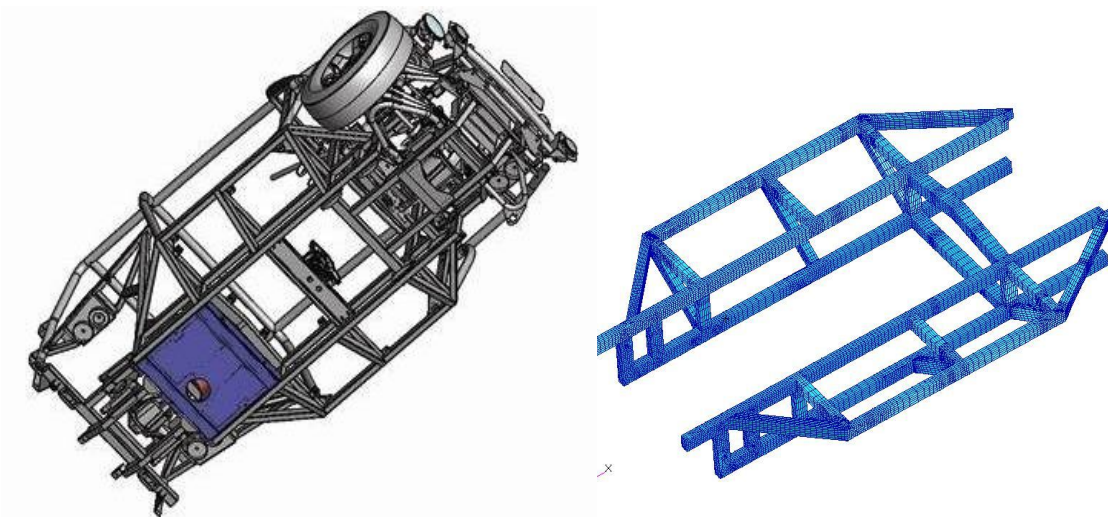


**Figura 52: Planejamento da montagem dos componentes do veículo.**  
Fonte: TAC(2008).

O veículo, além de potente, é o mais leve da categoria com motorização diesel (1,3 mil quilos). Outro destaque deste produto é sua ótima relação peso x torque - superior à maior parte dos motores 3.0L disponíveis no mercado. Para definir os componentes do veículo, a TAC dispôs de softwares de desenvolvimento virtual de produtos (VPD), usado pelas grandes montadoras do mundo. Os sistemas mecânicos: transmissão, suspensão, direção e a inovadora estrutura tubular foram dimensionados com as melhores práticas da engenharia e intensamente testados. A empresa utilizou softwares de modelagem e simulação desenvolvidos e utilizados pela MSC Software e Engenharia – São Paulo (TAC, 2008), fornecedora global deste tipo de ferramenta para as melhores e maiores montadoras, para proporcionar um projeto de base tecnológica

com alto nível de qualidade, que até então parecia ser acessível apenas às grandes empresas.

O veículo impressiona com características técnicas e criatividade 100% nacionais. Conforme TAC (2008), foram investidas mais de 28.000 horas de pesquisa e desenvolvimento e 15 milhões de reais para o projeto e produção, envolvendo aproximadamente 20 profissionais capacitados. Quatorze deles são da Questto Design, responsável por todo o desenvolvimento de estilo, integração de componentes mecânicos, gerenciamento de fornecedores e serviços. O projeto detalhado de estrutura e carroceria foi gerenciado por Aloysio Coelho, ex-projetista da Ford e atual coordenador do projeto no escritório Questto Design. As simulações da estrutura do veículo são de responsabilidade da empresa MSC – Multicorpos (Figura 53).

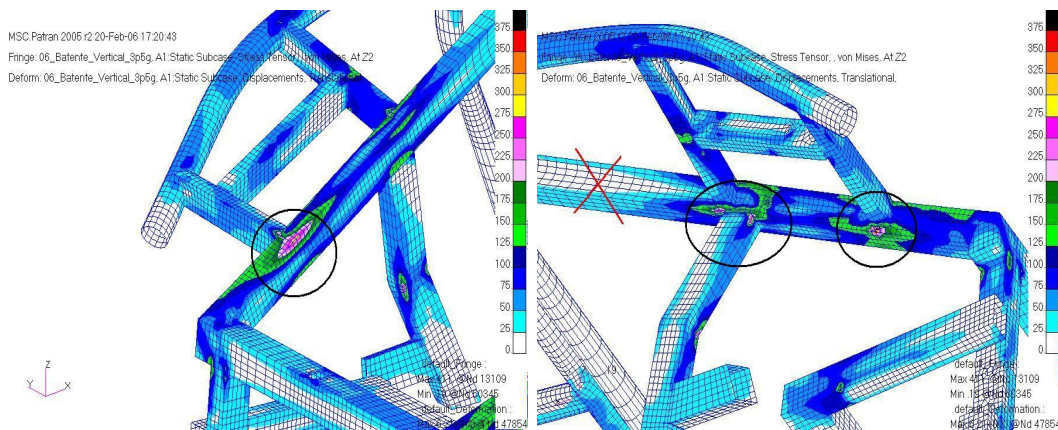


**Figura 53: Modelagem da estrutura do veículo e modelo 3D do chassi para simulação.**  
Fonte: TAC(2008).

Segundo a TAC (2008), diversas simulações foram realizadas para otimização da estrutura e diminuição de custos com a realização de protótipos, aluguel de pista e equipamentos específicos para avaliação e validação de testes de desempenho automotivo. Entre os testes realizados, destaca-se a simulação estática do peso próprio do veículo, como primeiro passo, *bump*<sup>7</sup> nos amortecedores em separado e no conjunto (chassi, amortecedores e rodas), aceleração e desaceleração em reta e em curva e por fim o *crash test* frontal e lateral (Figura 54). E assim, para cada nova alteração do projeto, novas simulações eram feitas. Estas diretrizes de projeto, de ser um veículo 100% nacional e de base tecnológica fortaleceram muito o lançamento do

<sup>7</sup> -Bump – Teste que simula a passagem do veículo por irregularidades da pista, seu deslocamento e conseqüências para a estrutura.

empreendimento e facilitaram as negociações e parcerias com fornecedores, como a Fiat Powertrain, fornecedora do motor.



**Figura 54: Simulações da estrutura do veículo.**

Fonte: TAC(2008).

A partir do início da produção do Stark (Figura 55) em linha, a TAC planeja aumentar a montagem, progressivamente, com produção de 1,2 mil unidades em 2009, até atingir a média de 100 veículos/mês em 2011. O valor estimado para o veículo é de R\$ 78.000,00 a R\$ 80.000,00.



**Figura 55: Stark 4WD.**

Fonte: TAC(2008).

### 4.3 Estudo de Caso: Sabiá 5

Segundo Câmara (2005), os Sabiás (Figuras 56, 57, 58, 59) são veículos hiper-econômicos desenvolvidos para competir na categoria Design da Shell Éco-Marathon. Esta competição destaca-se pela criação de veículos experimentais construídos por escolas e universidades de todo o mundo, dentre elas a UEMG – Redemat de Minas Gerais, criadora dos veículos Sabiá. Promovido pela Shell francesa, o evento consolidou-se mundialmente no que se refere ao desenvolvimento e aplicação de soluções automotivas, onde as variáveis ambientais apresentam-se como principal demanda.

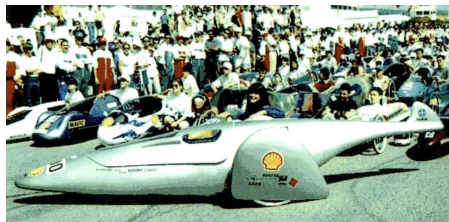
Segundo Botelho (2003), os automóveis concorrem nas seguintes categorias: performance geral; estudantes universitários; estudantes de escolas técnicas e liceus; primeira participação; inovação tecnológica; design, comunicação e otimização funcional. Segundo UNIVERSIA (2008), o atual recorde de economia é da ETH Zurich, em 2005, com 3.836 km com um litro de combustível, emitindo, segundo a organização da competição, pouco mais de 5,0 g de CO<sub>2</sub> na atmosfera, enquanto a média de emissão de CO<sub>2</sub> de um carro na Europa é em torno de 160g/km. Isso é menos que um atleta correndo a pé emitiria. Apesar de existirem regras rígidas de equiparação competitiva entre os modelos, o processo criativo é livre e representa assim uma das principais vantagens comparativas na competição, incentivando a ousadia e a inovação tecnológica.

Ressalta-se que este projeto não envolve apenas o desenvolvimento de um veículo, envolvendo também: marketing (conceito e divulgação do conceito); engenharia (suporte à realização das idéias); logística (disponibilizar os materiais e transporte do veículo e equipe para a França) e o design (que tem como função gerenciar estas áreas para a concepção e realização de uma série de produtos – veículo; material gráfico; uniformes; informações via Internet; entre outros).

Segundo Câmara (2005) sem *know-how* de outras participações, em 1994, o veículo Sabiá I (Figura 56) retornou da França com o *Prix d'Honneur du Design* – Prêmio de Honra do Design. No ano de 1995, uma segunda versão do Sabiá foi desenvolvida (Figura 57). Mais uma vez o projeto conseguiu mostrar ao júri francês que o Design Brasileiro é forte e competitivo.

Em 2000 um novo veículo se destacou por possuir um estilo nada convencional e com relevante atenção aos quesitos de segurança e conforto. Ao final, a Equipe Sabiá

2000 (Figura 58) conseguiu o *Prix Spécial de Design attribué à une Equipe Etrangère* na categoria estudantes e ainda obteve a primeira marca ao percorrer 83,78 km com um litro de gasolina.



**Figura 56: O Sabiá I detentor do Prix d'Honneur du Design 10ª Shell Éco-Marathon – 1994.**

Fonte: CÂMARA (2005).



**Figura 57: A Equipe Sabiá II na 11ª Shell Éco-Marathon – 1995.**

Fonte: CÂMARA (2005).



**Figura 58: A Equipe Sabiá 2000, no Circuito em Nogaro, ganhadora da 16ª Shell Éco-Marathon – 2000.**

Fonte: CÂMARA (2005).

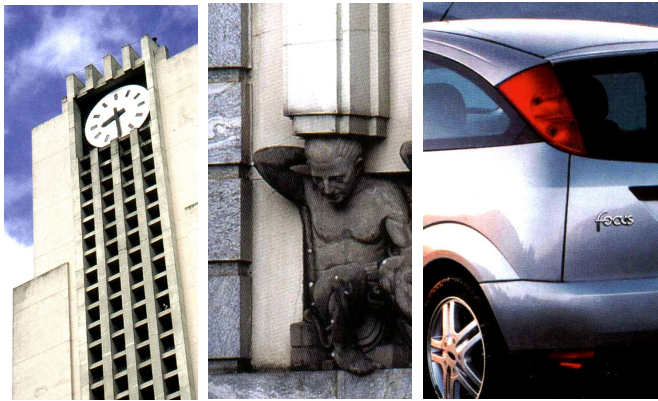


**Figura 59: A Equipe Sabiá IV conquistou a marca de 480,0km/l.**

Fonte: CÂMARA (2005).

Segundo Câmara (2005), já em 2002, na 18ª Shell Éco-Marathon, o Sabiá IV (Figura 58) alcançou a marca de 480km/l de gasolina, marca expressiva para a Escola de Design (dados aferidos por especialista da UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá). Foi, também, neste ano que iniciou-se, efetivamente, a concepção de parcerias acadêmicas para o desenvolvimento do veículo. Até então, tinha-se parceria junto a fabricantes e/ou fornecedores de materiais. Como todo projeto de design, este encontra-se inserido em um contexto sócio-cultural. Dessa forma, o veículo foi, também, uma homenagem ao arquiteto ítalo-brasileiro Raffaello Berti pela sua relevante influência na cultura e arquitetura da capital mineira, com aproximadamente 800 obras no estilo Art-Déco. Notou-se uma proximidade deste estilo ao New Edge, este profundamente explorado pela Ford europeia (Figura 60-a). Em ambos os estilos, os “vincos” destacam-se, sendo importantes para a concepção da carroceria do Sabiá, onde associa-se liberdade formal, elevada rigidez e baixo peso. Em consequência deste projeto, para a 19ª edição da maratona (2003), o Sabiá 4 foi destaque ao ser elevado à condição de

símbolo da maratona, fazendo parte de todo o material de divulgação mundial da competição (Figura 60-b), dentre os 250 veículos presentes em 2002.



**Figura 60-a:** Fachada do prédio da Sede da Prefeitura Municipal de Belo Horizonte e detalhe do mesmo prédio . A outra vertente de estilo, o New Edge, representado pelo Ford Focus. Em ambos, a presença de vincos é evidente.

Fonte: CÂMARA (2005).



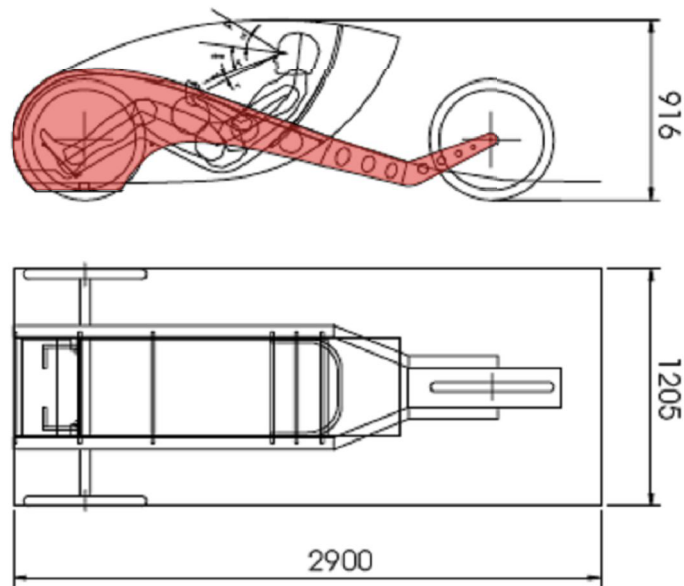
**Figura 60-b:** 19ª Shell Éco-Marathon – 2002.

Fonte: CÂMARA (2005).

Segundo Botelho e Câmara (2008), na quinta edição do veículo, o maior destaque refere-se ao conceito. Dotado de uma morfologia simplificada, o Sabiá 5 (Figura 61) denominado apropriadamente de “carro folha”, explora as características das chapas (folhas), selecionadas com base nos pontos destacados abaixo:

- Aplicação de materiais compatíveis às características formais do veículo e com o meio ambiente. Uma vez que esta é uma das principais demandas para o século XXI, priorizou-se no desenvolvimento do Sabiá 5 a utilização de materiais e processos que se enquadram na redução de processos e de consumo de energia para a produção, na utilização de materiais que apresentem melhor performance ambiental ao longo de sua utilização, desde a retirada da natureza, bem como na desmontagem / reciclagem dos componentes ao final de sua vida útil. Estes pontos permitem eliminar processos complexos, caros e de elevado consumo de energia. Neste conceito pretende-se aplicar o melhor material às características e solicitações inerentes a cada parte. Por este motivo a escolha do Sabiá 5 como objeto do Estudo de Caso, onde será simulado o seu chassi (área em destaque na Figura 61) em espuma metálica como alternativa para a redução de peso do veículo e conseqüentemente melhor desempenho.

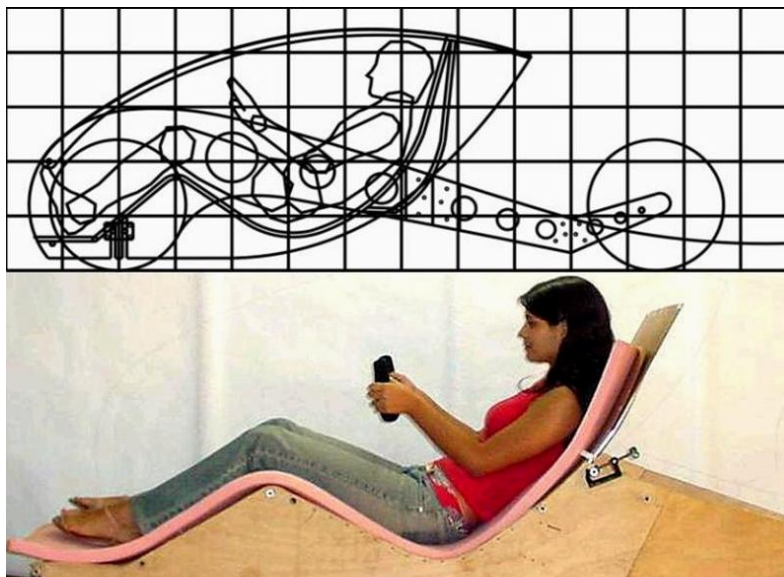




**Figura 61: Vistas superior e lateral do Projeto Sabiá 5.**

Fonte: Botelho (2003).

- Os aspectos ergonômicos, sempre em destaque nos veículos Sabiás, foram maximizados nesse conceito devido às possibilidades de aplicação de uma maior gama de materiais. Outra parte de destaque do projeto faz-se com relação aos aspectos dimensionais do espaço para a piloto (Figura 62), seus controles, saída, ações de emergência e do próprio conforto. Para a definição da posição de pilotagem, fez-se um estudo com suporte de uma cadeira antropométrica. Foram avaliadas as condições da prova, tais como formato da pista, tempo de duração e temperatura prevista no interior do carro, de modo a definir a melhor posição do corpo da piloto, considerando ainda a visualização da pista e competidores. Do mesmo modo, pedais, volante, controles e equipamentos de emergência foram dispostos de maneira a personalizar a direção, aumentando o domínio sobre as condições de pilotagem. Assim, foi possível, através da aplicação do design e da engenharia de materiais simultaneamente, equacionar forma e material, assim como processo e função, conforme figura 61.



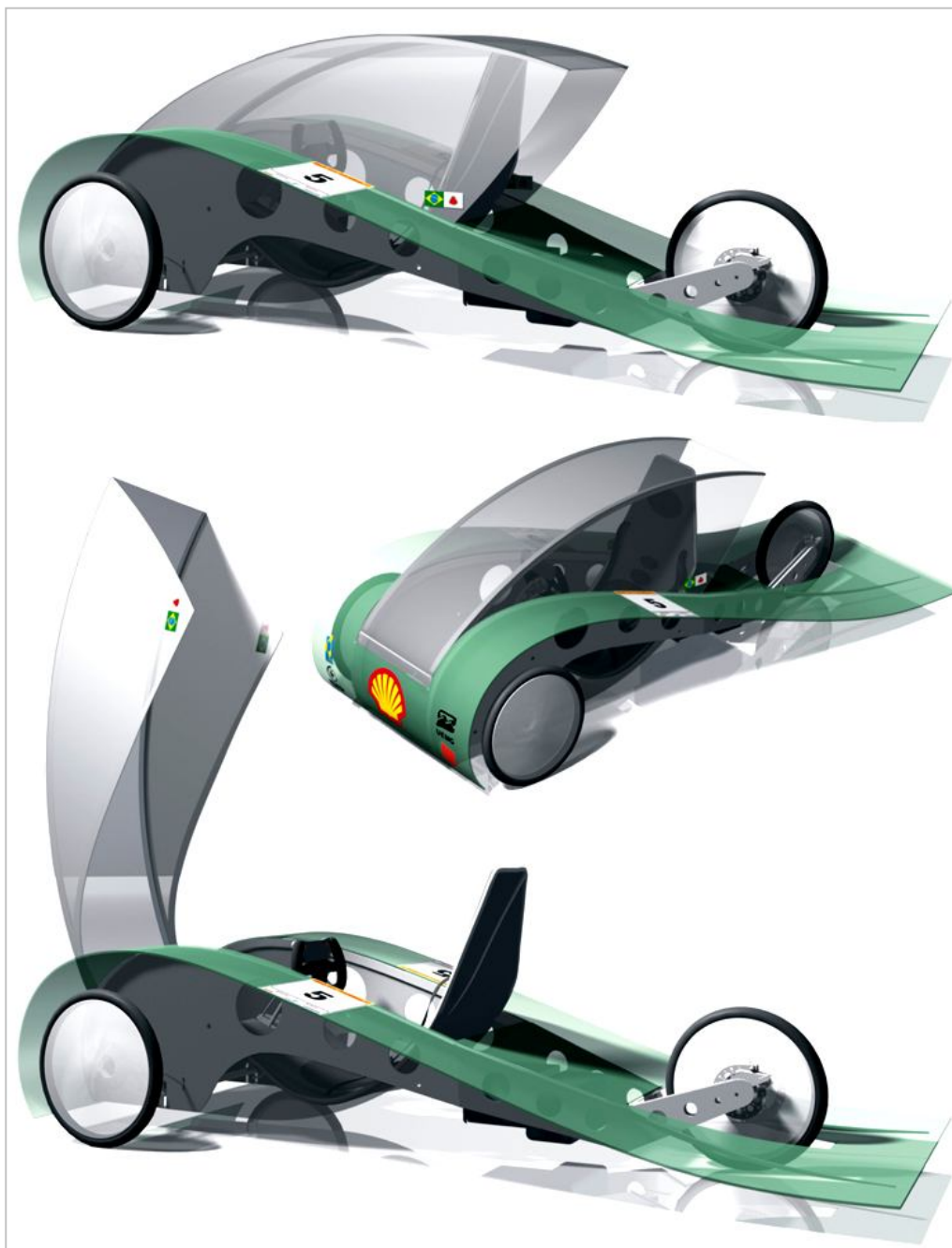
**Figura 62: Projeto do Assento da Piloto – Análise Antropométrica.**  
Fonte: Câmara (2006).

Em sua carroceria encontram-se associadas diversas partes às funções de estruturação, estilo e de posicionamento da piloto. Banco, chassi e cabine formam uma estrutura integrada. Nestes itens, foi usado o alumínio, o aço e o polímero policarbonato explorando suas propriedades para cada solicitação. Para fixação do chassi e parte da carroceria serão utilizados parafusos de titânio. Isso se deve ao seu menor peso e ao fato de haver a necessidade de um número elevado de unidades.

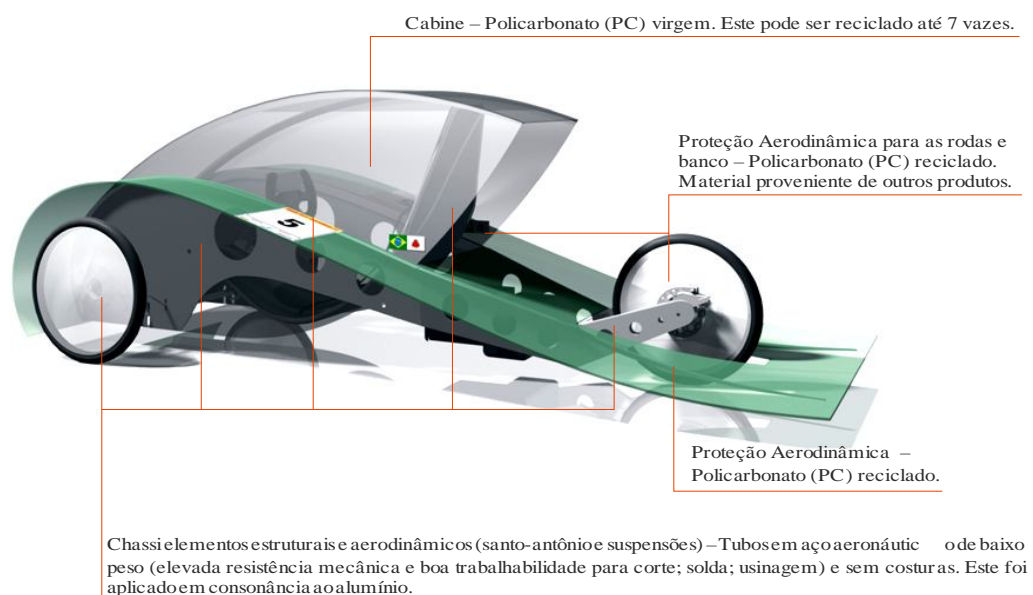
Neste projeto (Figura 63 e 64) há, também, um maior enfoque no marketing institucional, bem como, na divulgação de um carro com forte apelo conceitual, que reúne elementos dos quatro veículos anteriores: a necessidade de instigar à busca pelo novo, pelo surpreendente e pelo mais adequado ao uso.

Devido à liberdade formal para a aplicação de materiais, houve uma necessidade maior de integração entre as diversas partes envolvidas no projeto: fornecedores; design; marketing; engenharias; logística e testes. Dessa forma, seguindo o programa de parcerias interinstitucionais, contou-se com o apoio da Universidade de Caxias do Sul – UCS, de fornecedores e agentes de viagem das outras edições, bem como da Rede Temática em Engenharia de Materiais – REDEMAT (Figura 65). Mais uma vez, a integração entre as partes para focar um objetivo comum foi o grande desafio. Estabelecer líderes, e sua comunicação para as várias funções, mostrou-se como um avanço, nesta edição. A junção destes elementos permitiu que o veículo alcançasse mais uma vez todo o material de divulgação internacional da Shell Eco-Marathon 2005. O

projeto Sabiá 5 alcançou mais uma vez impacto em conceito, sendo aclamado pela organização e pelo júri do prêmio de Design e *Eco-Conception*, como o veículo mais bem concebido das Shell Éco-Marathon. Tal denominação o posiciona em uma categoria de destaque.



**Figura 63: Proposta do Sabiá 5 para a 20ª Shell Éco-Marathon.**  
Fonte: Câmara (2006).



**Figura 64: Distribuição de materiais na carroceria do veículo.**

Fonte: CÂMARA (2008).



**Figura 65: Equipe do Sabiá 5.**

Fonte: CÂMARA (2008).

#### 4.4 Simulação do Estudo de Caso: Sabiá 5

Segundo a metodologia proposta, em um primeiro momento, simula-se a geometria (chassi) do estudo de caso com material convencional, no caso o aço 1020 e o Alumínio AA 8011. Logo após, simula-se a mesma geometria com a aplicação de Espuma Metálica selecionada no *software* CES *Edupack* para posterior análise e comparação dos resultados obtidos, uma vez que não tem-se dados experimentais do modelo do Estudo de Caso. No CES *Edupack*, além das propriedades físicas e mecânicas da espuma metálica selecionada, também buscou-se as informações necessárias para simulação com os materiais convencionais.

Propriedades físicas e mecânicas adotadas para o aço 1020:

- Densidade: 7870 kg/m<sup>3</sup>
- Módulo de Young (E ): 200 GPa
- Coeficiente de Poisson ( $\mu$ ):0,3
- Limite Elástico: 280 MPa

Propriedades físicas e mecânicas adotadas para o alumínio AA 8011:

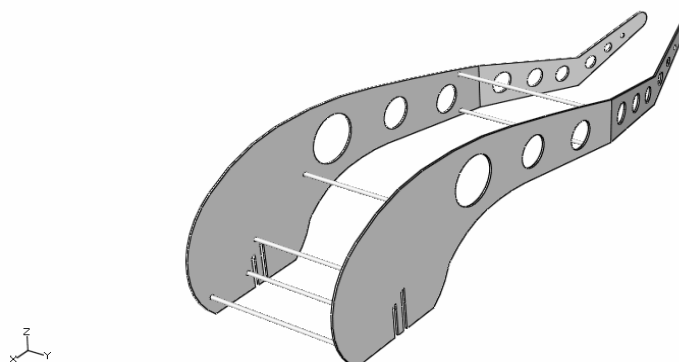
- Densidade: 2570 kg/m<sup>3</sup>
- Módulo de Young (E ): 68 GPa
- Coeficiente de Poisson ( $\mu$ ):0,32
- Limite Elástico: 280 MPa

Propriedades físicas e mecânicas adotadas para a Espuma Metálica 1.0 - HYMFM\_ALHD007 (Fonte: gerado pelo autor – CES *Edupack*, 2008):

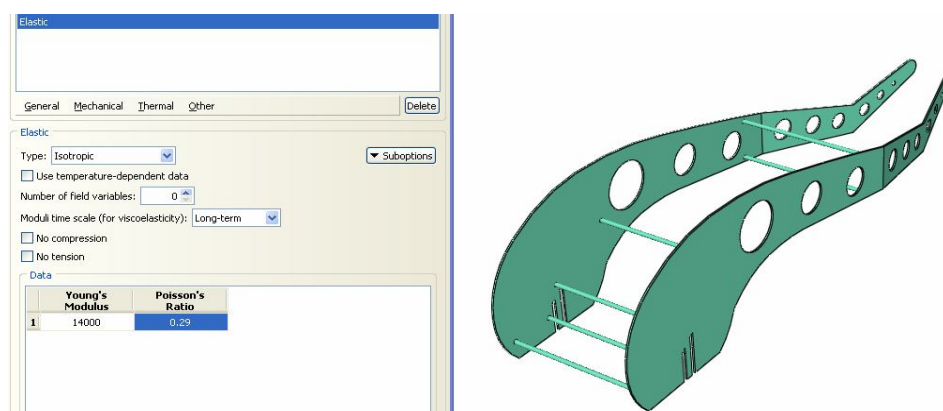
- Densidade: 1030 kg/m<sup>3</sup>
- Módulo de Young (E ): 14,80 GPa
- Coeficiente de Poisson ( $\mu$ ):0,28
- Limite Elástico: 25 MPa

Em um primeiro momento importa-se a geometria modelada em Autocad para o ABAQUS CAE (Figura 66). Em seguida informam-se as propriedades do material a ser simulado (Figura 67) e cria-se a malha no modelo importado para verificação da geometria importada (Figura 68).A partir da estrutura modelada e importada pode-se

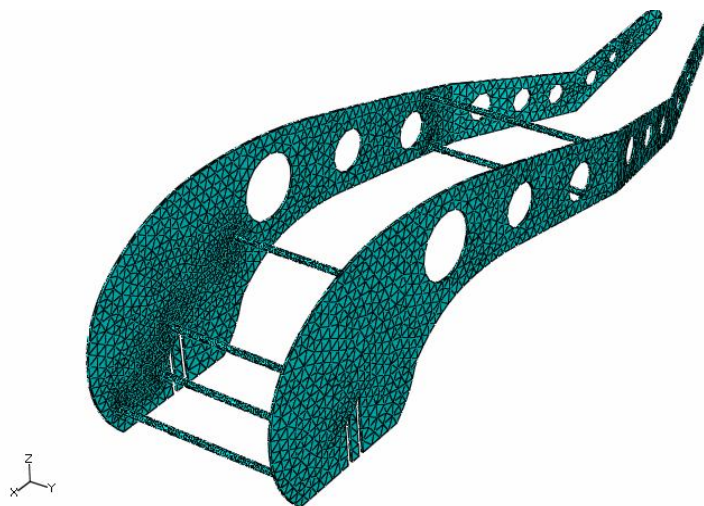
calcular o volume do chassi para cada diferente material. Este multiplicado pela densidade do respectivo material tem-se a massa, que multiplicada pela aceleração da gravidade, leva ao peso próprio.



**Figura 66: Geometria do Estudo de Caso importada no ABAQUS CAE.**



**Figura 67: Preenchimento das propriedades dos materiais no ABAQUS CAE.**

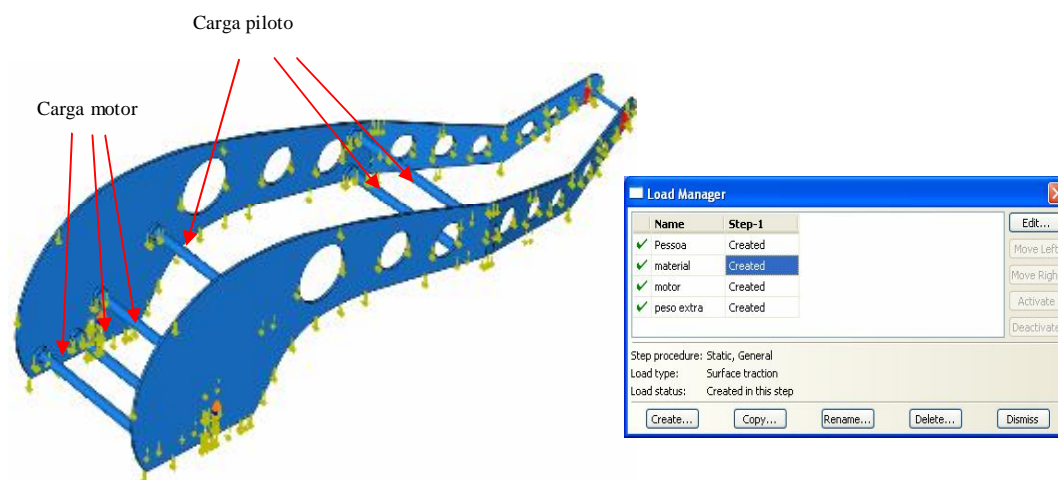


**Figura 68: Criação da Malha – 25.729 elementos tetraédricos lineares – Aço 1020.**

Carga devido ao Peso Próprio da Estrutura do Chassi conforme a densidade de cada Material:

- Aço 1020: 674,21 N
- Alumínio AA8011: 210,17 N
- Espuma Metálica 1.0 HYMFM\_ALHD007 – Alulight/Alusion/Cymat: 88,24 N

Para a aplicação das cargas no modelo, dividiu-se a carga do peso total do veículo, fornecido pela REDEMAT – UEMG: 700N, em três partes principais: peso próprio da estrutura (de acordo com cada material), motor e demais componentes (denominado peso extra). Para chegar-se ao valor destas cargas, subtraiu-se da carga total o valor do peso próprio da estrutura, conforme verificado acima para cada tipo de material e também o valor conhecido do motor: 200N, assim chegando ao valor da carga dos demais componentes (Figura 69). Aplica-se ainda, sobre as barras de união entre as laterais o peso da piloto: 650N. Estas cargas calculadas são aplicadas de acordo com as áreas das superfícies de aplicação das mesmas em cada parte do modelo, para encontrar-se assim a pressão exercida uniformemente em cada elemento da estrutura para cada diferente carga. A parte frontal, onde localizam-se as rodas dianteiras, é engastada e a parte onde localiza-se a roda posterior é simplesmente apoiada, para simular as condições de contorno da estrutura (Figura 69).



**Figura 69:** Aplicação das diferentes cargas - Aço 1020

## 4.5 Análise das Simulações do Estudo de Caso: Sabiá 5

### 4.5.1 Simulações Estáticas de peso próprio da estrutura com aplicação de diferentes materiais

Segundo ABRAMS (2007), uma carga estática é aquela que não varia com o tempo. Todavia, a força é aplicada lentamente, assim, uma estrutura é considerada estática, quando é carregada lentamente até atingir a sua carga máxima e para esta determinam-se as forças internas nos elementos, suas tensões e deformações. Assim, as cargas são aplicadas tão lentamente e geram movimentos tão lentos na estrutura, que em qualquer instante a resposta pode ser calculada. As deformações resultantes na estrutura, associadas às forças aplicadas se desenvolvem também lentamente e atingem seus valores máximos quando o carregamento externo também for máximo. É como se a estrutura, até chegar à carga máxima, percorresse um caminho que pudesse ser registrado como uma sucessão de fotografias de problemas estáticos.

Após terem sido aplicadas as cargas e realizado o *Job* (trabalho de cálculo estático da estrutura), chegamos à visualização das tensões (Figura 70) para o primeiro material aplicado, o aço 1020 e suas respectivas deformações sofridas (Figura 71).

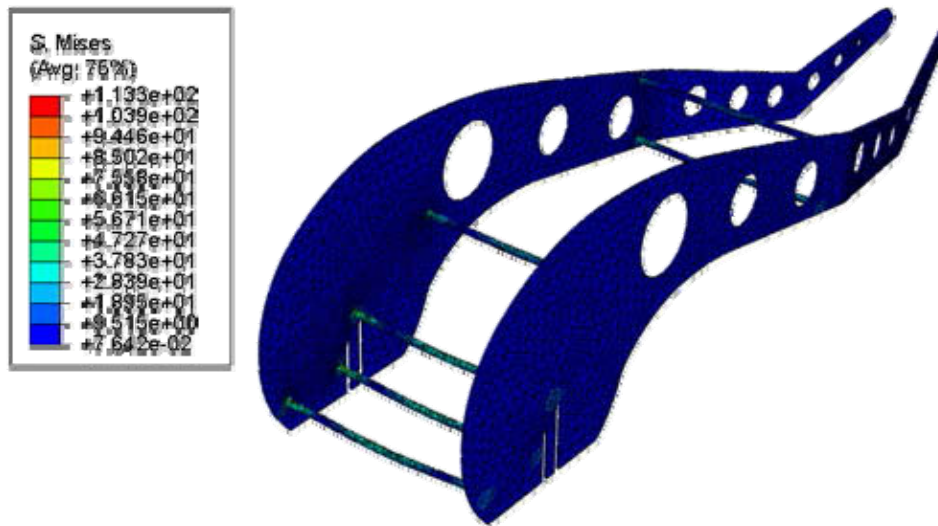


Figura 70: Visualização das tensões de von mises (MPa) – aço 1020.



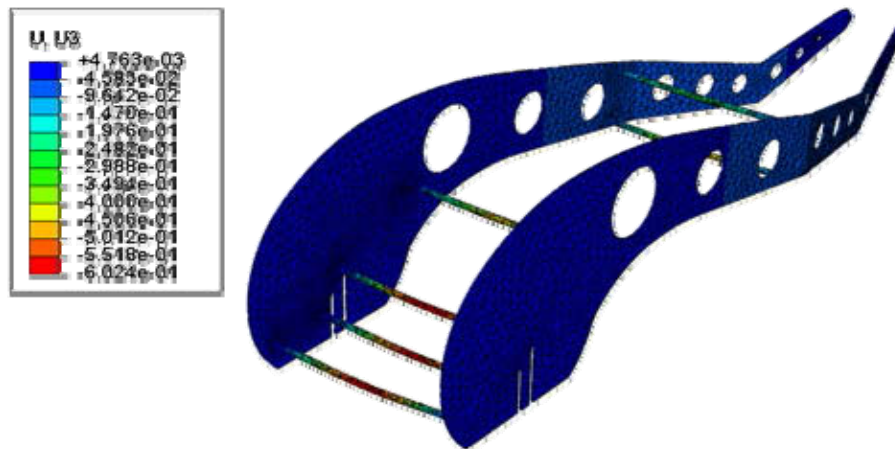


Figura 71: Visualização da deformação (mm) – aço 1020.

Na Figura 70 podem-se ver os pontos em que a estrutura é mais solicitada, mas é na Figura 71 que conseguem-se visualizar e quantificar as deformações sofridas e, através desta análise, propor novas alternativas de otimização da estrutura (volume de material), de tempo, soluções de fabricação, etc, tudo graças à simulação e análise embasada em dados. Nesta primeira simulação nota-se através da análise Figura 71, que o deslocamento máximo é pequeno, não chegando a 1mm e que as tensões ficaram abaixo do limite elástico do material. Assim propõe-se a aplicação de um novo material, mais leve, o Alumínio AA 8011, também de aplicação automotiva.

Na figura 72 visualizam-se as tensões para o segundo material aplicado, o Alumínio AA 8011. Verifica-se que este material também fica dentro da faixa do limite elástico do material (280 MPa).

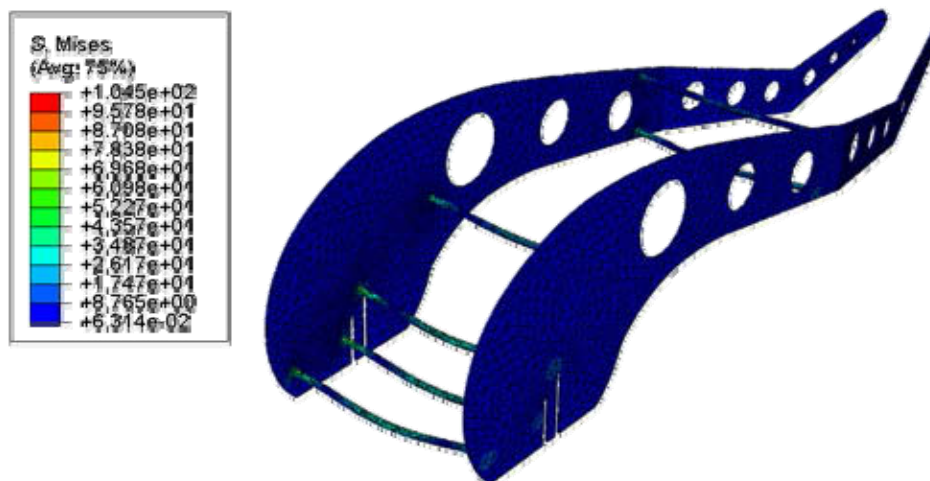
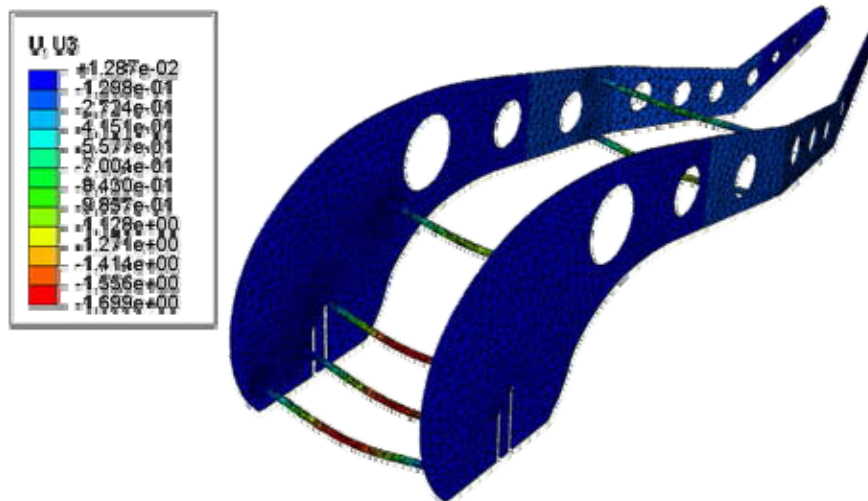


Figura 72: Visualização das tensões de von mises (MPa) – alumínio AA 8011.

Segundo análise da Figura 73, visualização da deformação sofrida pela estrutura, pode-se ver que a mesma teve uma deformação de 1,69mm, no local mais solicitado da estrutura: parte frontal, onde tem-se a carga do motor, parte da carga extra e do peso da piloto. Este comportamento indica que, para cargas maiores pode haver falha nestes pontos.



**Figura 73: Visualização da deformação (mm) – alumínio AA 8011.**

Para uma análise comparativa entre os materiais, propõe-se então a simulação da estrutura em espuma metálica. Como a deformação na situação anterior (Alumínio AA 8011) é mínima e o peso material (22,01kg) já é bem menor do que o verificado inicialmente (Aço 1020), com peso de 67,42 kg. Propõe-se, então, uma nova alternativa em espuma metálica, onde a estrutura do chassi tem 8,82 kg de peso próprio. Por sua vez, quase oito vezes mais leve do que o modelo inicial e quase três vezes mais leve do que a proposta anterior, em alumínio maciço.

A visualização das tensões sofridas pela estrutura em espuma metálica pode ser vista na figura 74, onde verifica-se que a mesma ultrapassou o seu limite elástico (25Mpa) e teve deformação plástica ao longo das barras de união entre as faces laterais.

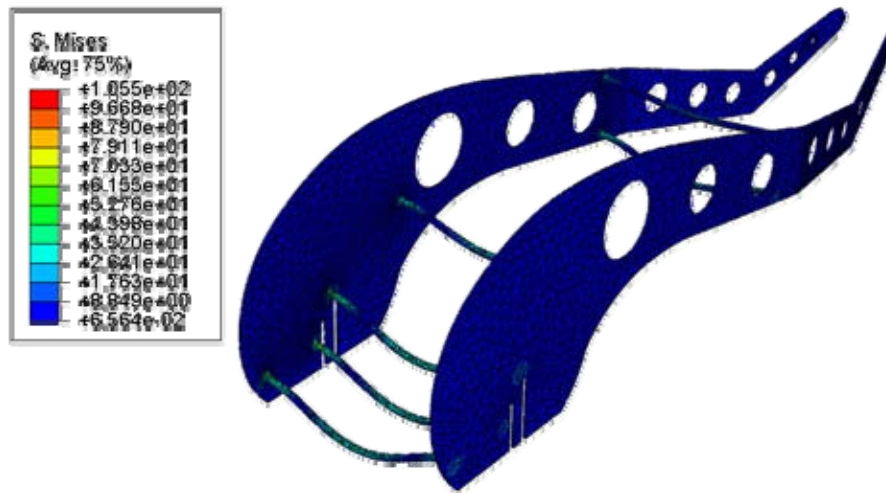


Figura 74: Visualização das tensões de von mises (MPa) – espuma metálica 1.0.

Na figura 75 visualiza-se a deformação sofrida pela estrutura. Esta teve um deslocamento máximo de 8,20mm também nas barras da parte frontal do chassi. Porém, ao comparar-se o ganho com a redução de peso pela seleção do material (espuma metálica) desde a primeira análise, pode-se propor uma nova simulação, novamente em espuma metálica, com até a duplicação do diâmetro das barras mais solicitadas e mesmo assim ainda teria-se um enorme ganho com a redução global de peso. Pode-se propor ainda a integração de dois materiais de acordo com os resultados analisados. Assim, as faces laterais poderiam ser em espuma metálica e os tubos em alumínio, uma vez que na análise com este material obteve-se também um bom resultado.

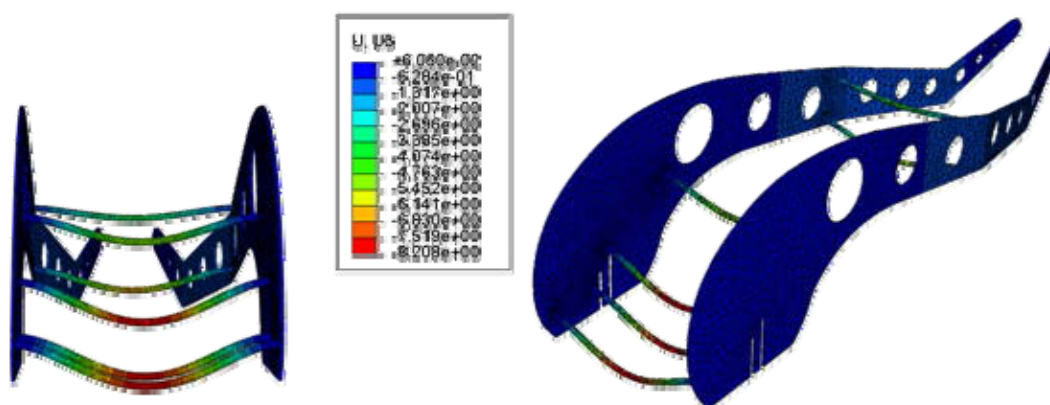


Figura 75: Visualização da deformação (mm) – espuma metálica 1.0.

Com base nas diferentes análises, pode-se ver que este processo de auxílio à tomada de decisão de projeto através da simulação computacional pode ser decisivo na seleção, teste e especificação de materiais na busca de melhores resultados, tanto formais quanto econômicos, aprimorando-se cada vez mais as alternativas propostas até a escolha da definitiva, feita por qualquer um dos fatores de quantificação apresentados e passíveis de medição (tensões, peso, custo, etc). Pode-se observar isto no Quadro 05, onde compara-se peso, tensões e custo por material, vendo, por exemplo, que mesmo o modelo custando quatro vezes mais em espuma metálica do que em aço, por seu peso ficar quase oito vezes mais leve, provavelmente, para o objetivo deste veículo, este valor ainda seja viável, assim como para uma série de outras finalidades, onde o baixo peso seja requisito primordial.

Material	Peso Próprio da Estrutura	Tensões Globais (locais mais solicitados)	Limite Elástico (MPa)	Custo Total do Material
Aço 1020	67,42 kg	28 – 113 MPa	280 MPa	R\$ 302,77*
Alumínio AA 8011	22,01 kg	26 – 104 MPa	280 MPa	R\$ 682,31*
Espuma Metálica	8,82 kg	35 – 52 MPa	25 MPa	R\$ 1361,90**

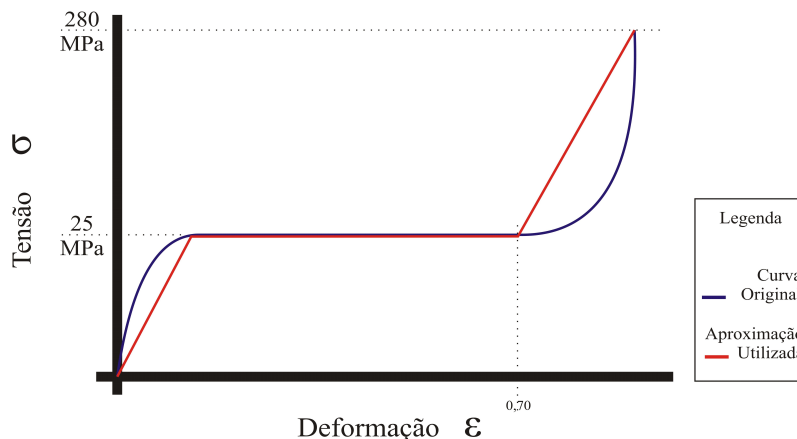
**Quadro 05: Quadro comparativo - estrutura de 6mm de espessura e barras de 16mm de diâmetro.**

Fonte: \* Aços Brasileiro (aço - R\$ 4,70 / kg) e GSD Metals – SP (alumínio – R\$ 31,00 / kg).

\*\* ERGAEROSPACE (2009), ERG Materials and Aerospace Corporation - Duocel®. ( $\$1.50/2,54\text{mm}^3$ )

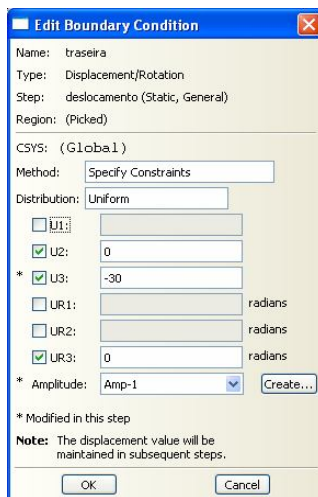
#### 4.5.2 Simulações Estáticas de deslocamento

Para as simulações estáticas de deslocamento realizadas neste trabalho o material selecionado (espuma metálicas) foi caracterizado conforme suas propriedades mecânicas para elasticidade e plasticidade, conforme a figura 76.

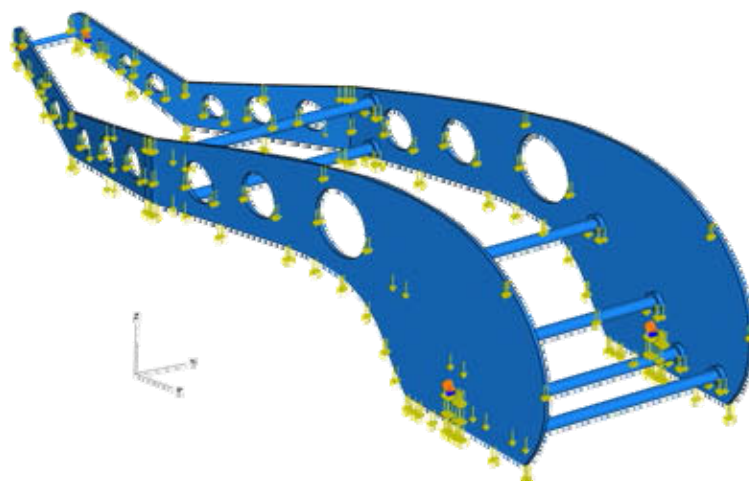


**Figura 76: Gráfico da relação constitutiva do material e da relação utilizada nas simulações.**

As condições de contorno foram definidas para dois casos principais: deslocamento ou simulação da passagem por irregularidade da pista com -30mm na roda traseira e mesmo deslocamento com a roda dianteira esquerda. Para o primeiro caso (deslocamento traseiro), em dois pontos simetricamente distantes, localizados no eixo das rodas dianteiras são aplicadas restrições à translação em X, Y e Z e giro em Z, deixando-se livre os giros em X e Y. Mais dois pontos são localizados no eixo da roda posterior com deslocamento negativo de -30mm no eixo z, restrição de movimento no eixo y e liberdade de movimento no eixo x, além de restrição de giro em z e liberdade de giro em x e y. Estas condições de contorno são repetidas nas demais simulações para os mesmos dois casos de deslocamentos, sejam eles estáticos ou dinâmicos (Figuras 77 e 78).

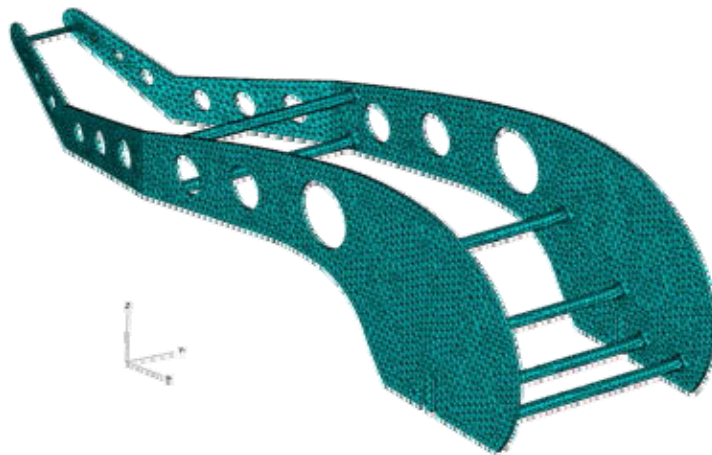


**Figura 77: Visualização do deslocamento no menu condições de contorno.**



**Figura 78: Visualizações das condições de contorno e do carregamento do peso próprio por *body force*.**

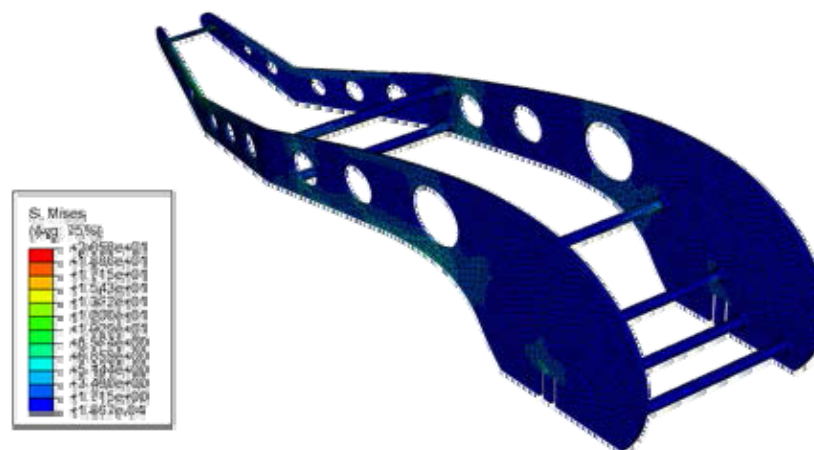
A malha para cada simulação tem, no mínimo 30.000 elementos, como no caso da simulação do modelo com 9mm de espessura em espuma metálica (Figura 79), chegando a 494.000 elementos para o estudo do modelo com aplicação de dois materiais: estrutura externa e barras em alumínio e preenchimento interno (12mm) em espuma metálica.



**Figura 79: Visualizações da malha com 30.000 elementos para o modelo em espuma metálica 9mm espessura.**

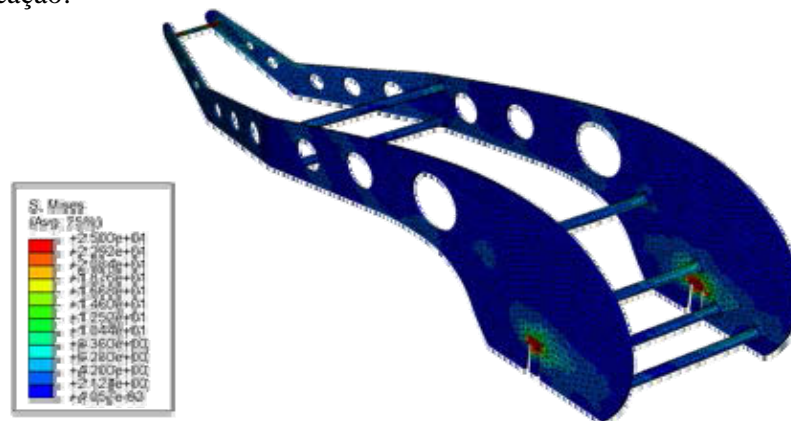
Para todos os modelos a seguir as cargas foram aplicadas conforme visto anteriormente, ou seja, de acordo com o volume de material empregado e sua respectiva densidade para chegar-se a carga devido ao peso próprio do material mais a carga devido ao peso da piloto, peso do motor e respectivamente da carga do peso extra (sistemas ale do motor, fechamentos e parte aerodinâmica). Estas cargas foram aplicadas como *Body Force*, ou seja, aplicação do carregamento uniformemente por unidade de volume do modelo.

Após ter sido aplicado o peso próprio, como um primeiro passo para todas as simulações, então são aplicadas as cargas e realizado o *job*, chegando-se a visualização das tensões e deformações para o modelo de 9mm de espessura em espuma metálica maciça (Figuras 80, 81, 82, 83) e de 9mm de espessura em alumínio maciço (Figuras 84, 85).



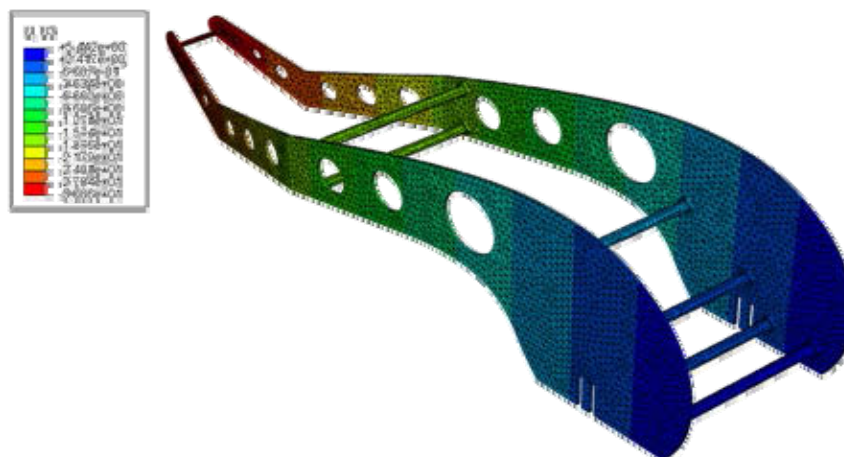
**Figura 80: Visualização das tensões de von mises (MPa) - deslocamento traseiro de -30mm modelo em espuma metálica 9mm espessura.**

Na figura 80, pode-se verificar que as tensões para o deslocamento traseiro de -30mm não ultrapassam o limite elástico da espuma metálica (25MPa) em nenhum ponto da estrutura, revelando-se assim uma situação menos crítica para este veículo. Parte-se então para simulação de uma situação mais complexa: o deslocamento dianteiro de uma só roda. De acordo com a figura 81, podem-se ver os pontos em que a estrutura é mais solicitada para a situação de deslocamento dianteiro esquerdo e onde concentram-se as tensões, que para este modelo, ultrapassam o limite elástico, havendo plastificação.



**Figura 81: Visualização das tensões de von mises (MPa) - deslocamento dianteiro esquerdo de -30mm – modelo em espuma metálica 9mm espessura.**

Nas figuras 82 e 83, pode-se verificar a deformação sofrida pela estrutura para os dois casos de deslocamentos simulados em espuma metálica. No primeiro (Figura 82), há uma deformação de 5,42mm na parte dianteira do veículo no momento de maior deslocamento traseiro. Enquanto no segundo (Figura 83), deslocamento dianteiro esquerdo, há uma deformação de 5,27mm na face oposta do deslocamento.



**Figura 82: Visualização das deformações (mm) - deslocamento traseiro - 30mm – Espuma Metálica 9mm espessura.**

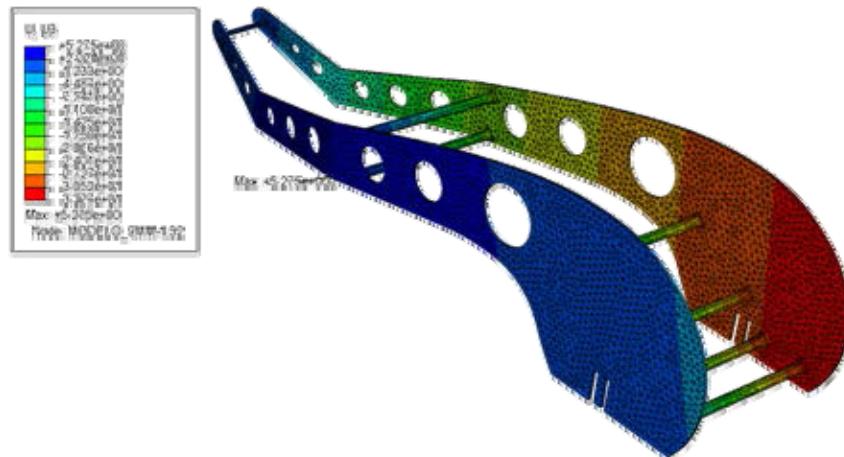


Figura 83: Visualização das deformações (mm) - deslocamento dianteiro esquerdo -30mm – Espuma Metálica 9mm espessura.

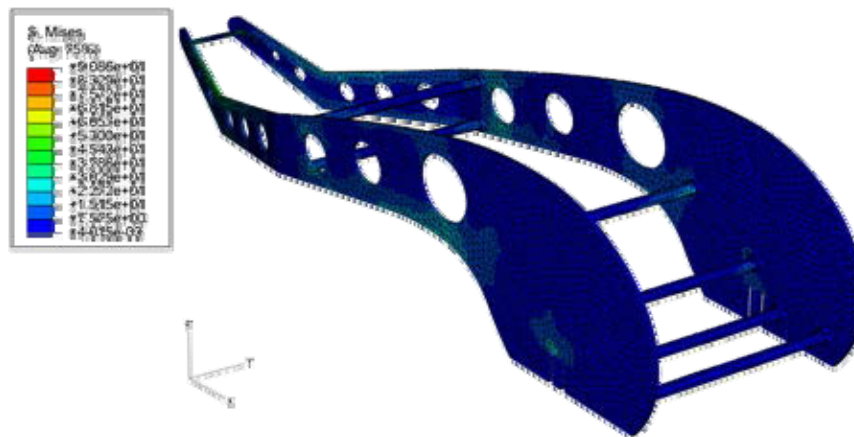


Figura 84: Visualização das tensões de von mises (MPa) - deslocamento traseiro -30mm – Alumínio 9mm espessura.

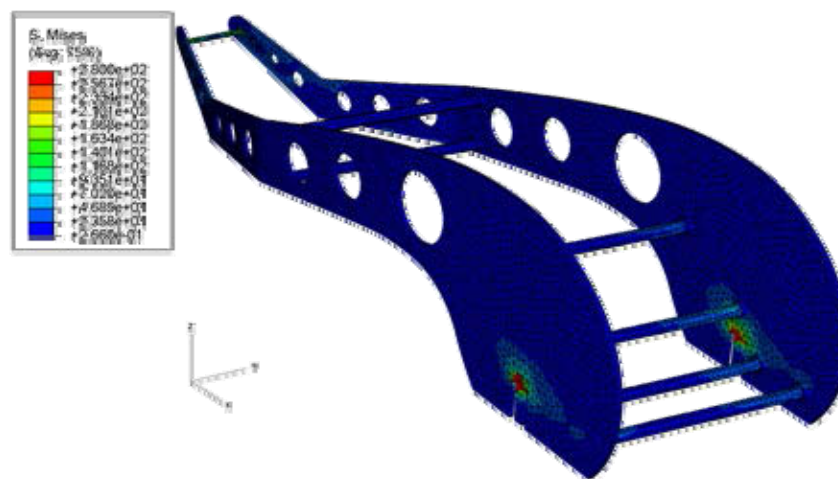


Figura 85: Visualização das tensões de von mises (MPa) - deslocamento dianteiro esquerdo -30mm – Alumínio 9mm espessura.

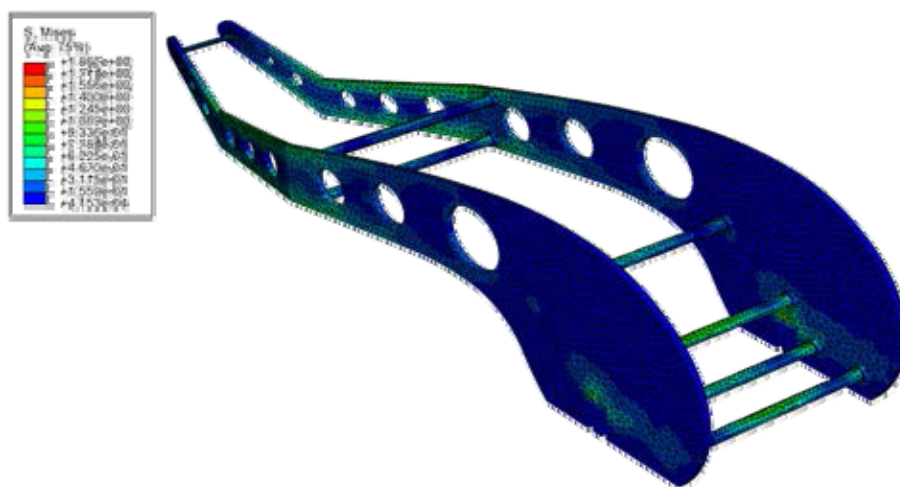


Analisando as figuras acima, pode-se ver os principais pontos de concentração de tensões e deformações e com isso otimizar a estrutura para novas simulações. Em relação às simulações anteriores (capítulo 4.5.1), somente de peso próprio, as barras de ligação entre as faces laterais já tiveram seu diâmetro duplicado, de 16mm para 32mm, uma vez que em seu modelo original, estas eram em tubos de aço e agora propõe-se em barras de espuma metálica maciça. A espessura das laterais também passou de 6mm para 9mm. Mesmo assim vê-se a necessidade de reestruturação destas em testes futuros. Porém, como as faces laterais do chassi também não resistiram a estes testes, propõe-se na próxima simulação o aumento da espessura das mesmas de 9mm para 15mm, verificando assim, se é realmente necessário alterar também a espessura das barras.

O modelo submetido a esta simulação tem peso próprio total do chassi de 11,85kg e peso total do veículo de 39,85kg.

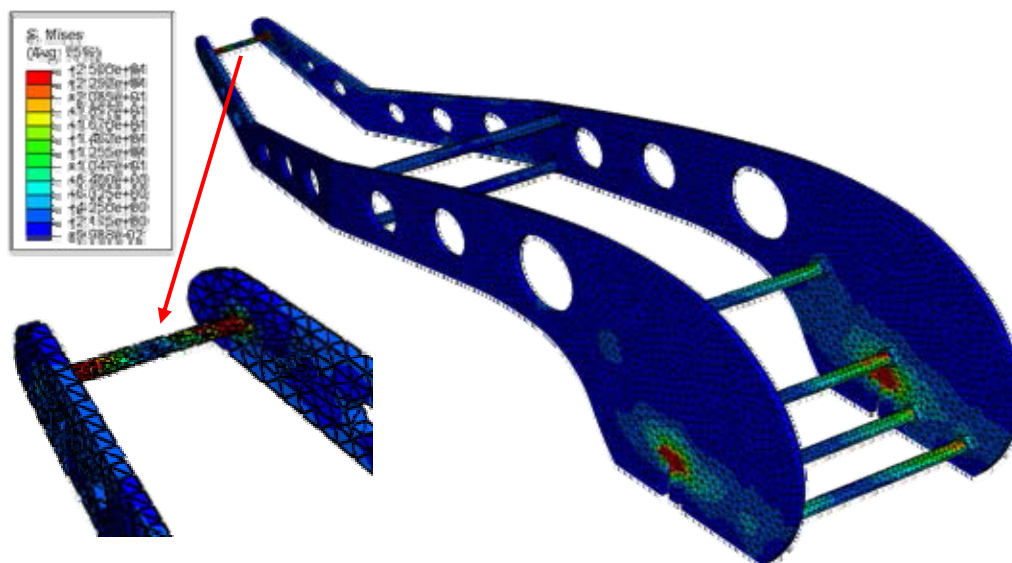
Pode-se verificar também, que o modelo em alumínio comportou-se de forma semelhante ao modelo em espuma metálica, ou seja, resistiu à simulação de deslocamento traseiro, mas não resistiu à simulação de deslocamento dianteiro esquerdo, assim, as novas simulações são propostas primeiramente somente em espuma metálica.

O teste com a nova geometria proposta segue os mesmos princípios para aplicação de cargas e situações de contorno da simulação anterior e conforme as figuras 86 e 87, pode-se visualizar as tensões para o mesmo material aplicado (espuma metálica) porém com espessura de 15mm em suas laterais.



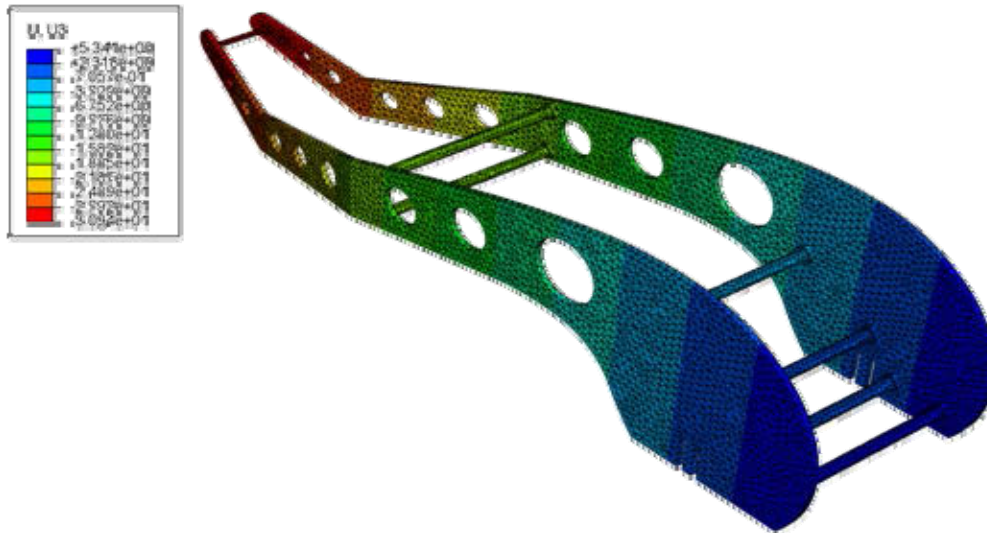
**Figura 86: Visualização das tensões de von mises (MPa) - deslocamento traseiro de -30mm – modelo em espuma metálica 15mm espessura.**

Na figura 86, pode-se verificar novamente, que para o deslocamento traseiro de -30mm a estrutura não ultrapassa o limite elástico do material, chegando apenas em 1,66 MPa. Já segundo a análise da figura 87, pode-se verificar que, novamente, com o deslocamento dianteiro esquerdo de -30mm a estrutura ultrapassa o limite elástico do material, havendo plastificação em diversos pontos, como nas barras e laterais do chassi, assim necessitando de novos testes, principalmente desta situação de deslocamento, para validação da aplicação da espuma metálica para uso estrutural neste modelo.

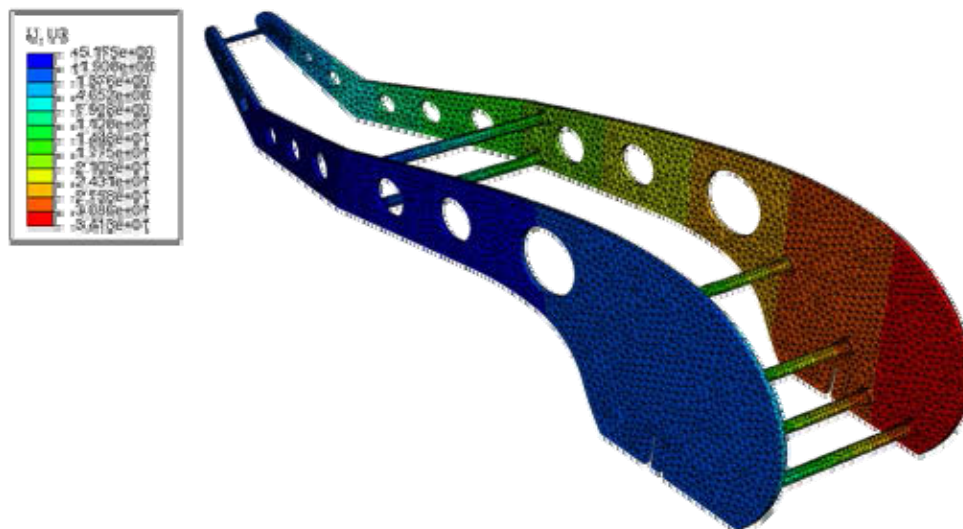


**Figura 87: Visualização das tensões de Von Mises (MPa) – deslocamento dianteiro esquerdo de -30mm – modelo em espuma metálica 15mm espessura.**

Conforme pode-se ver nas figuras 88 e 89, deformação sofrida pela estrutura, nota-se que, enquanto a parte traseira desloca-se -30mm (Figura 88), a estrutura deforma-se 5,34mm, principalmente na parte exatamente oposta, frente do veículo. E, enquanto a parte dianteira esquerda desloca-se -30mm (Figura 89), a estrutura deforma-se 5,17mm na lateral oposta e nas barras de ligação entre as duas laterais.



**Figura 88: Visualização da deformação (mm) - deslocamento traseiro -30mm – modelo em espuma metálica 15mm espessura.**

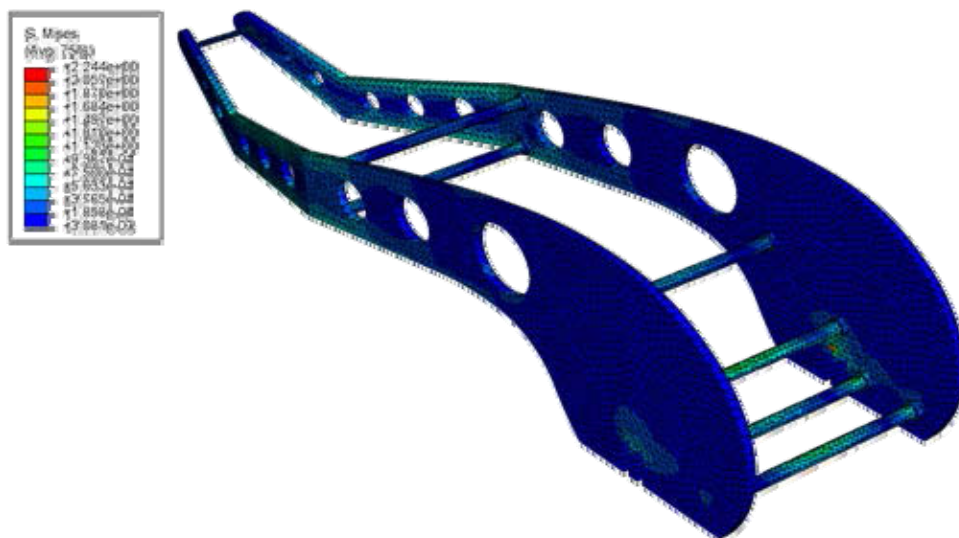


**Figura 89: Visualização da deformação (mm) - deslocamento dianteiro esquerdo -30mm – modelo em espuma metálica 15mm espessura.**

Com chassi de 15mm de espessura e barras de 32mm de diâmetro, em espuma metálica, o veículo tem peso próprio total do chassi de 18,14kg e peso total do veículo de 46,14kg.

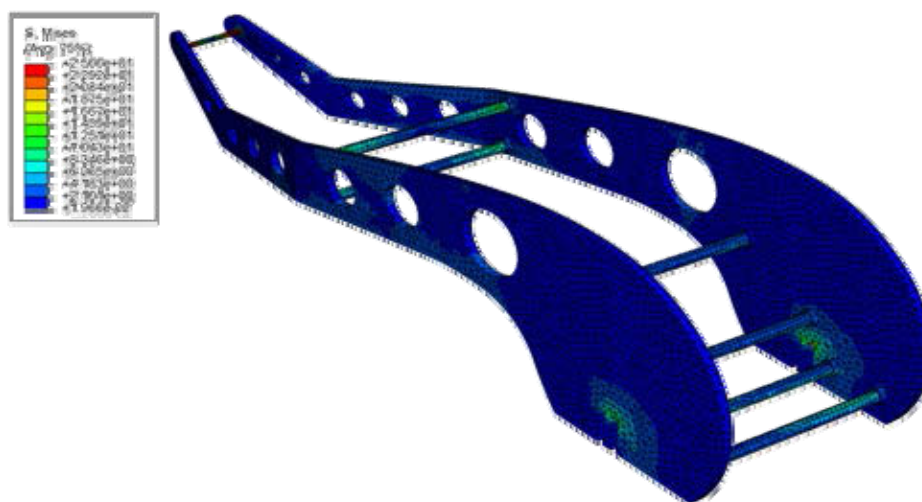
Assim como nas simulações anteriores, este teste segue os mesmos princípios para aplicação de cargas e situações de contorno e conforme as figuras 90 e 91, pode-se visualizar as tensões para o mesmo material aplicado, porém agora, com espessura de 20mm nas laterais do chassi e barras ainda com 32mm de diâmetro.

Na figura 90 pode-se ver que para o deslocamento traseiro de -30mm, a estrutura não ultrapassa o limite elástico do material, chegando a apenas 2,24 MPa de tensão máxima nos pontos mais solicitados.

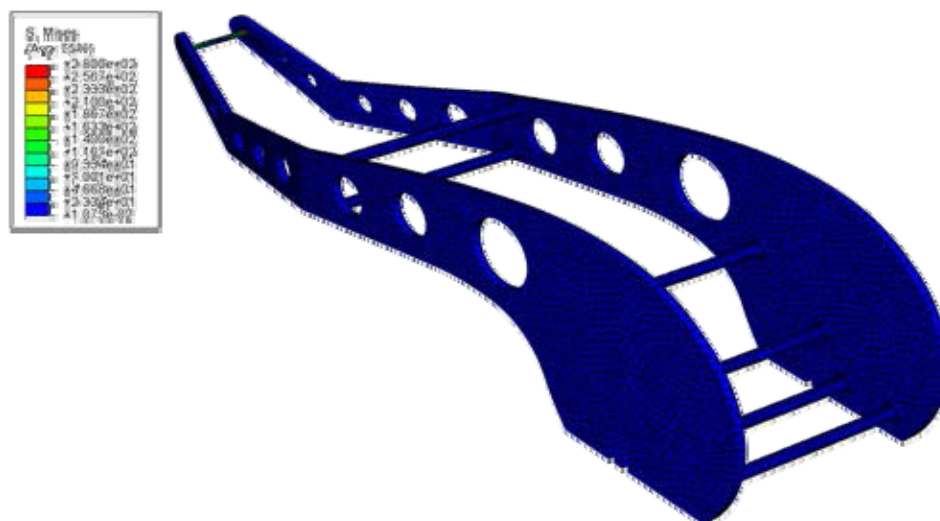


**Figura 90: Visualização das tensões de von misses (MPa) - deslocamento traseiro -30mm – modelo em espuma metálica 20mm espessura.**

Já para o deslocamento dianteiro esquerdo, a estrutura apresenta outra vez plastificação principalmente na barra traseira, onde foi mantido o diâmetro original do eixo da roda traseira (Figura 91) e, em média, conforme a legenda apresentada, as demais barras da estrutura tem tensões máximas de 14,50MPa. Parte-se então para uma nova tentativa com a barra traseira em alumínio (figura 92).



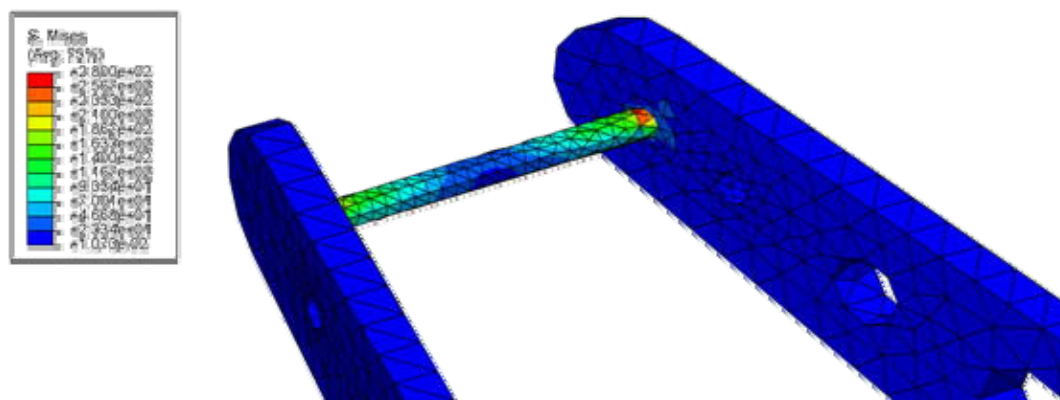
**Figura 91: Visualização das tensões de von misses (MPa) - deslocamento dianteiro esquerdo -30mm – modelo em espuma metálica 20mm espessura.**



**Figura 92: Visualização das tensões de von misses (MPa) - deslocamento dianteiro esquerdo -30mm – modelo em espuma metálica 20mm espessura e barra traseira em alumínio com 16mm diâmetro.**

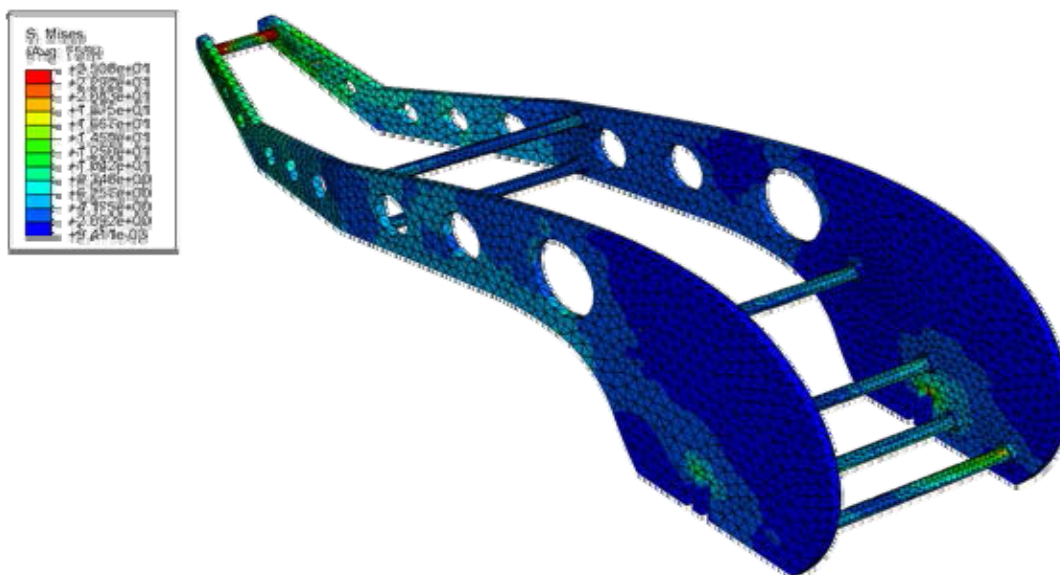
Nesta tentativa de solucionar o problema de plastificação na barra traseira, propõe-se então a simulação da aplicação do alumínio somente nesta barra e espuma metálica no restante da estrutura, assim como na simulação anterior (Figura 92).

Nesta situação, verifica-se então que a barra traseira em alumínio não plastifica, porém tem tensões de 260MPa em pontos críticos, sendo muito próximo de seu limite elástico (280MPa), como pode-se ver na figura 93 em uma ampliação desta parte da estrutura.

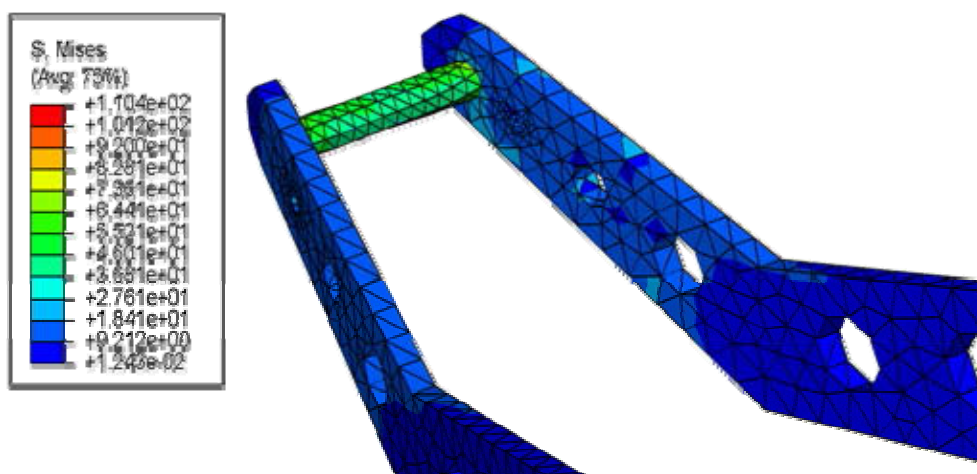


**Figura 93: Ampliação: tensões de von misses (MPa) - deslocamento dianteiro esquerdo -30mm – modelo em espuma metálica 20mm de espessura e barra traseira em alumínio 16mm diâmetro.**

Em função da análise da situação acima testa-se então uma nova simulação com laterais também com 20mm de espessura em espuma metálica, porém com a barra traseira com diâmetro de 32mm, assim como as demais que ligam as duas laterais do chassi e não mais com o diâmetro original do veículo (Figuras 94 e 95).



**Figura 94:** Visualização das tensões de von misses (MPa) - deslocamento dianteiro esquerdo -30mm - modelo em espuma metálica com laterais de 20mm espessura e barra traseira 32mm diâmetro.

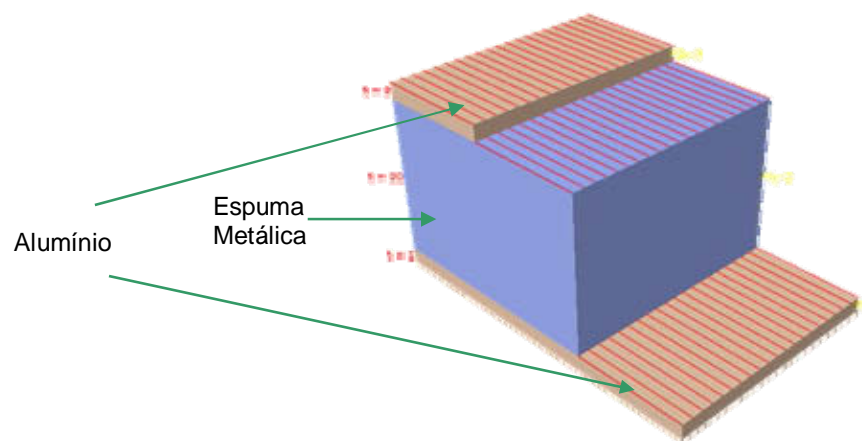


**Figura 95:** Ampliação: tensões de Von Mises (MPa) - deslocamento dianteiro esquerdo -30mm - Laterais em espuma metálica 20mm espessura e barra traseira em Alumínio 32mm diâmetro.

Com chassi de 20mm de espessura e barras de 32mm de diâmetro, em espuma metálica, o veículo tem peso próprio total do chassi de 23,38kg e peso total do veículo de 51,38kg. Novamente tem-se plastificação da barra traseira quando em espuma metálica, mesmo com seu diâmetro dobrado: 32mm (Figura 94). Verifica-se ainda, que

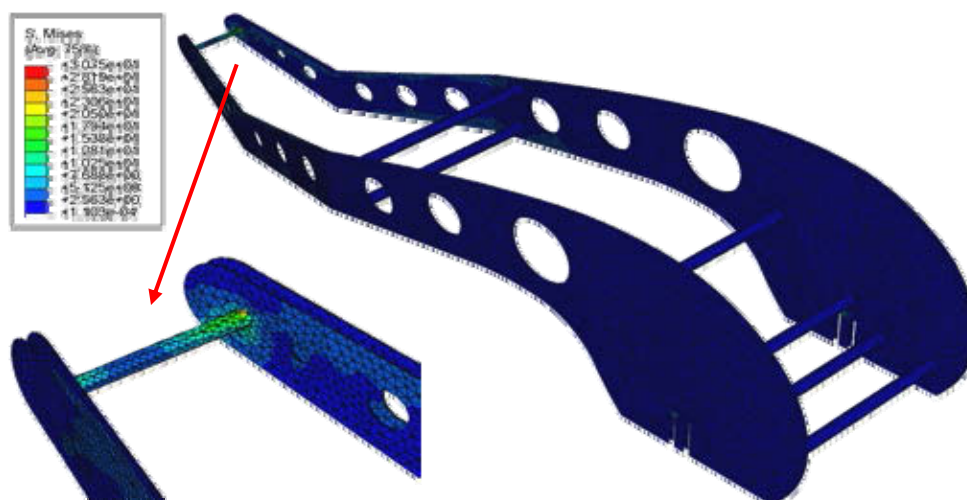
os pontos críticos são sempre nas áreas de ligação entre as barras e as laterais do chassi, assim submete-se o mesmo modelo a um novo teste com a barra de 32mm em alumínio (Figura 95) para verificar se as tensões diminuem consideravelmente.

Testa-se ainda uma segunda simulação propondo a aplicação do alumínio em todas as barras do sistema, assim como em uma pequena camada (1mm) de fechamento das laterais, assim fazendo com que este contato “barras – laterais do chassi” seja com o mesmo material, no caso o alumínio. Nesta simulação o interior da estrutura recebe uma camada de 12mm em espuma metálica, como preenchimento para um painel sanduíche (Figuras 96, 97, 98, 99). Para este caso, propõe-se ainda uma segunda simulação com uma nova geometria para a união das barras com as laterais do chassi (Figuras 100, 101).

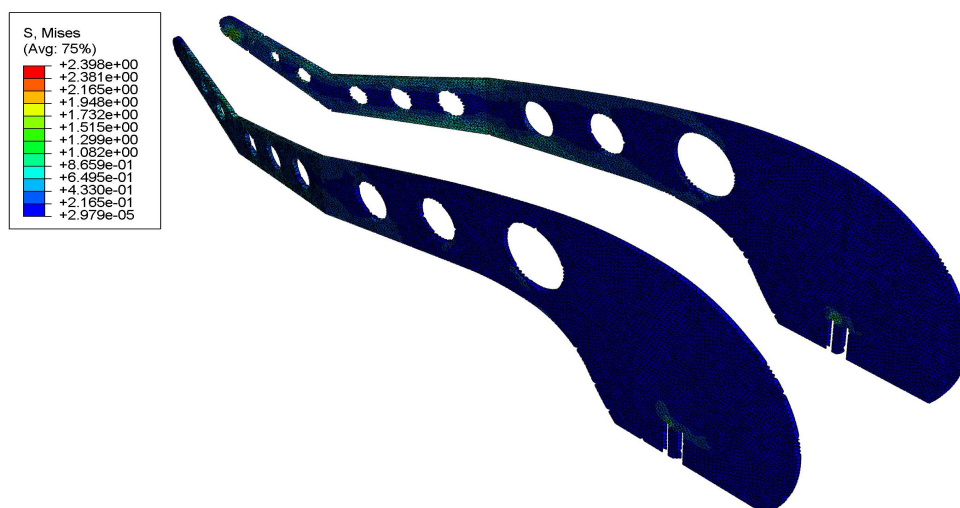


**Figura 96: Composição de materiais para a lateral do modelo para o ensaio de *crash test* .**

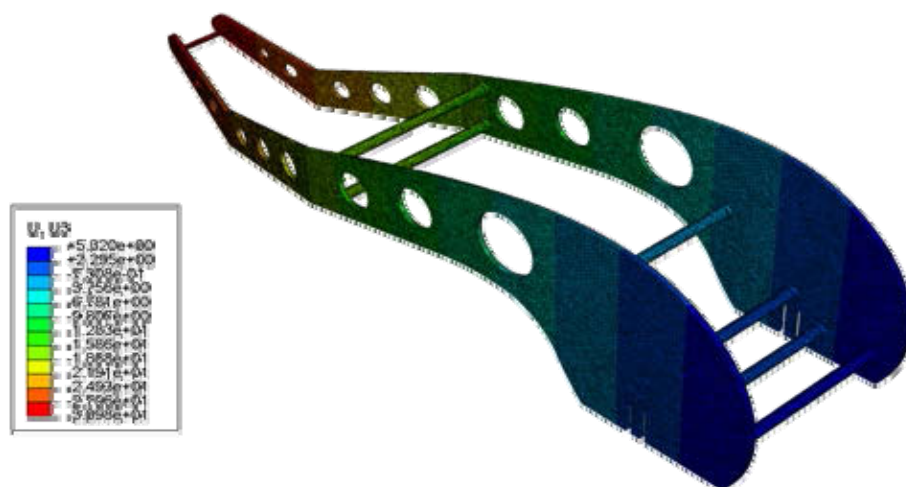
Fonte: Gerado em parceria com Smarttech – SP (2009).



**Figura 97: Visualização das tensões de von misses (MPa) - deslocamento traseiro -30mm – modelo com laterais (1mm) e barras (32mm) em alumínio.**



**Figura 98: Visualização das tensões de von misses (MPa) - deslocamento traseiro - 30mm –Preenchimento do painel sanduíche em espuma metálica – 12mm.**

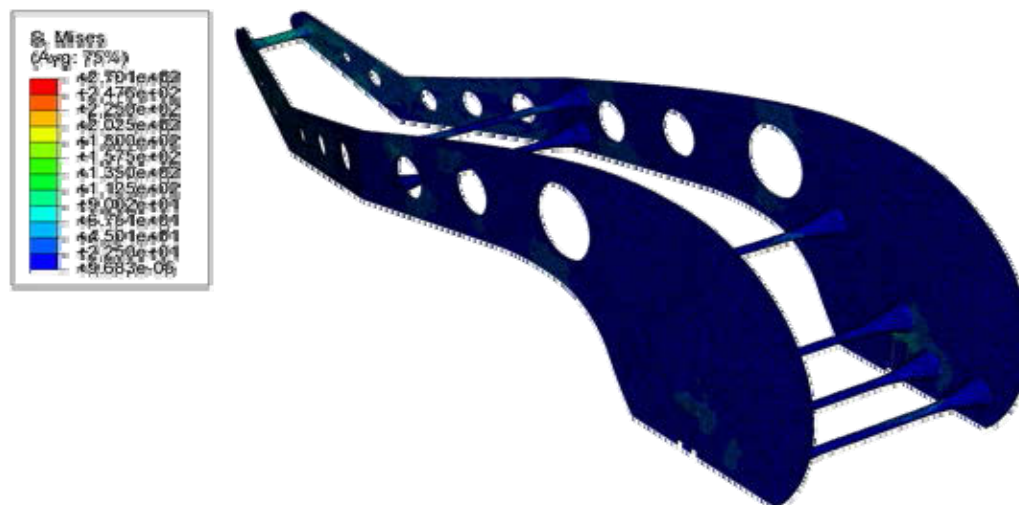


**Figura 99: Visualização da deformação (mm) - deslocamento traseiro -30mm – modelo com laterais e barras em alumínio e preenchimento do painel sanduíche em espuma metálica.**

Analisando as figuras 97 e 98 pode-se perceber que em ambos os casos não atinge-se o limite elástico dos materiais, chegando-se em tensões máximas de 30,75 MPa para a estrutura em alumínio e 2,39 MPa para o preenchimento em espuma metálica do sanduíche. Na figura 99, verifica-se que enquanto a estrutura traseira é deslocada em -30mm, na parte oposta, tem-se deformação máxima de 5,32mm. Porém, nota-se novamente que as áreas críticas estão concentradas na ligação das barras com os painéis, chegando-se assim na próxima simulação com a alteração de geometria das barras (ligação com as laterais em forma de cálices), com objetivo de reduzir as áreas de concentração de tensões.



Para esta última simulação estática testa-se a situação com maiores solicitações, (deslocamento dianteiro). Conforme tem-se na figura 100, verifica-se que as tensões na barra traseira são bem maiores neste caso do que nas barras dianteiras com o deslocamento traseiro. Com a nova geometria (Figura 100 e 101) tem-se tensão máxima de 270 MPa na estrutura em alumínio e 24,59 MPa (Figura 101) no preenchimento de 12mm de espuma metálica. Como, também, pode ser visto na figura 102, os pontos de maior tensão identificados na legenda encontram-se em elementos internos da malha ou em locais pouco prováveis de localização de tensões máximas para este caso, sendo assim considerados imprecisão da malha adotada uma vez que, segundo testes realizados, quanto maior o número de elementos da malha, mais baixas são as tensões. Para este teste a malha foi composta por 494.000 elementos. Acredita-se que o refinamento cada vez maior da malha, conforme testes realizados, tende a solucionar estes problemas e com isso melhor representar a situação simulada, porém com alto custo computacional.



**Figura 100: Visualização das tensões de von misses (MPa) - deslocamento dianteiro esquerdo - 30mm – modelo com laterais (1mm) e barras (32mm) em alumínio.**

Com a aplicação desta nova geometria, a deformação tanto para estrutura em alumínio (Figura 103) quanto para o preenchimento em espuma metálica ((Figura 104) é menor do que visto nas simulações anteriores. Tendo-se 4,28mm de deformação na estrutura em alumínio na lateral oposta a que sofre o deslocamento de -30mm e 4,23mm no preenchimento em espuma metálica.

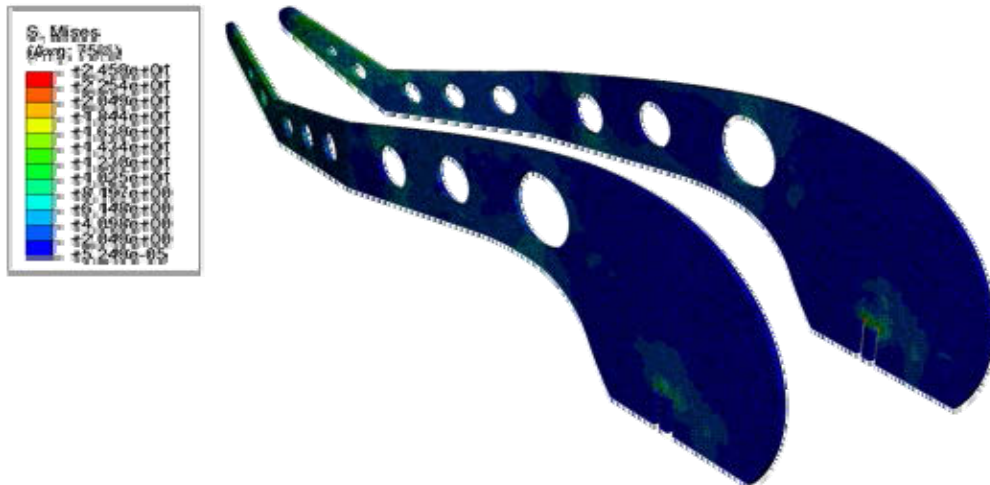


Figura 101: Visualização das tensões de von misses (MPa) - deslocamento dianteiro esquerdo -30mm – modelo com preenchimento do painel sanduíche em espuma metálica – 12mm.

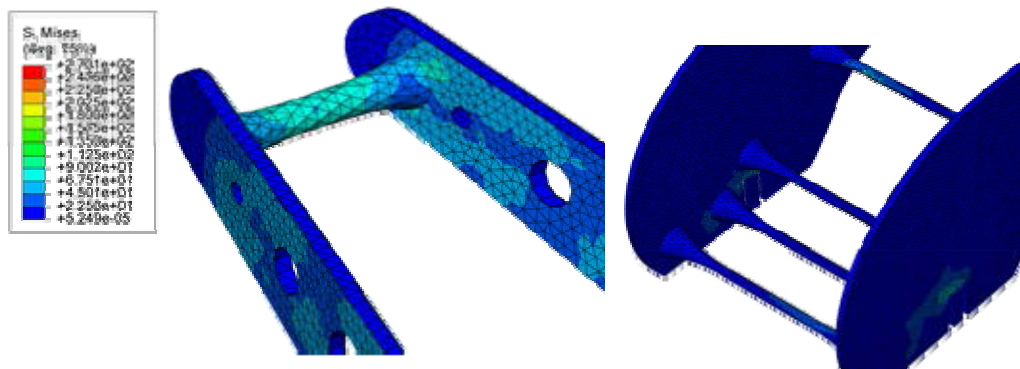


Figura 102: Ampliação das tensões de Von Misses (MPa) - deslocamento dianteiro esquerdo -30mm – Estrutura em Alumínio e Espuma Metálica (preenchimento).

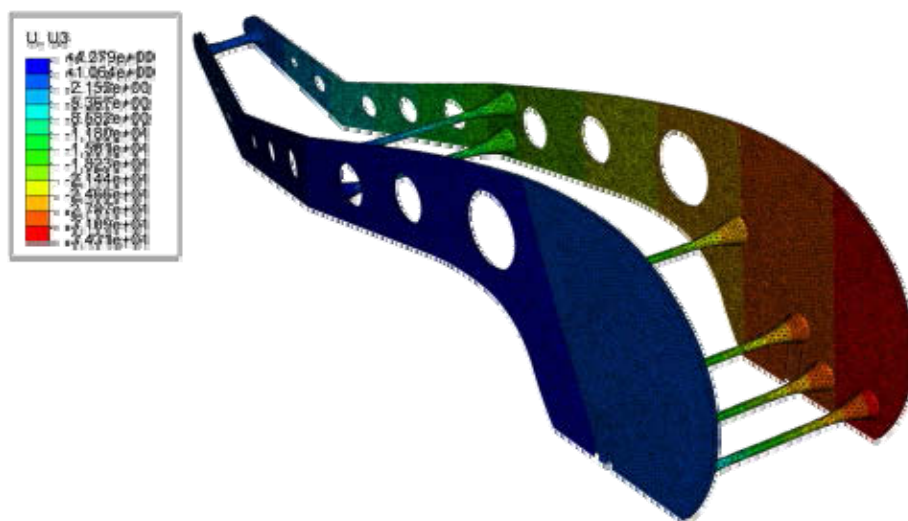
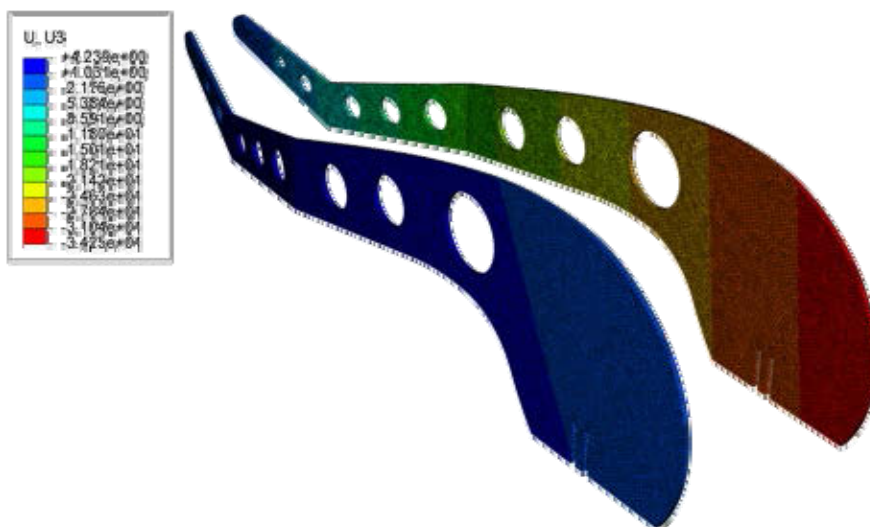


Figura 103: Visualização da deformação (mm) - deslocamento dianteiro esquerdo -30mm – modelo com laterais e barras em alumínio.



**Figura 104: Visualização da deformação (mm) - deslocamento dianteiro esquerdo -30mm – modelo com preenchimento do painel sanduíche em espuma metálica – 12mm.**

Conforme o quadro 06, pode-se verificar os valores de limite elástico, peso próprio e tensões máximas para os dois tipos de deslocamentos simulados. A partir destes dados percebe-se que, para os testes estáticos, o último modelo simulado (sanduíche de alumínio e espuma metálica) não ultrapassa as tensões máximas admitidas e ainda com peso próprio inferior (24,88kg) ao modelo todo em alumínio de 9mm de espessura (29,86kg), que por sua vez ultrapassa o limite elástico para a situação de deslocamento dianteiro.

Material	Limite Elástico (MPa)	Peso Próprio	Tensões Máximas (Deslocamento Traseiro)	Tensões Máximas (Deslocamento Dianteiro)
Espuma Metálica Laterais 6mm / Barras 16mm	25 MPa	8,82 kg	20,58 MPa	Acima de 25 MPa
Alumínio Laterais 9mm / Barras 16mm	280 MPa	29,86 kg	90,86 MPa	Acima de 280 MPa
Espuma Metálica Laterais 9mm / Barras 16mm	25 MPa	11,85 kg	20,58 MPa	Acima de 25 MPa
Espuma Metálica Laterais 15mm / Barras 32mm	25 MPa	18,14 kg	1,66 MPa	Acima de 25 MPa
Espuma Metálica Laterais 20mm / Barras 32mm	25 MPa	23,38 kg	2,24 MPa	Acima de 25 MPa
Laterais em Alumínio 1mm Barras em Alumínio 32mm Preenchimento - Espuma Metálica 12mm	280 Mpa (Al) 25 MPa(Es. Mt.)	24,88 kg	30,75 MPa (Al) 1,73 MPa (Es. Mt.)	270 MPa (Al) 24,59 MPa (Es. Mt.)

**Quadro 06: Quadro comparativo entre os diferentes modelos submetidos a teste Estático.**

Com base no quadro acima, pode-se ilustrar, até para comparação com o quadro 05, que o custo de material do último modelo (composto de laterais de 1mm em alumínio e preenchimento de 12mm em espuma metálica) que resistiu aos testes estáticos realizados, é de R\$ 2.970,05 (ERGAEROSPACE, 2009).

Na prática o modelo estático de elementos finitos serve de base para obter-se parâmetros de projeto para simulação, mas está distante de representar a realidade dos problemas de engenharia automotiva. Para tanto, são propostos os testes dinâmicos a partir das simulações estáticas realizadas. Estas novas simulações têm como função principal chegar a um resultado mais próximo da realidade, para tanto, uma vez que em teste estático o modelo apresentou algumas deficiências, propõe-se novamente alterações em sua geometria. Para estas simulações, no modelo com dois materiais, aumenta-se a espessura das laterais em alumínio em testes com 1mm, 2mm e 3mm. Nos modelos constituídos de um só material, testa-se todo em alumínio com a mesma geometria original do modelo anterior (14mm) e todo em espuma metálica com 14mm e 25mm de espessura, uma vez que nos testes estáticos, o mesmo com 20mm já ultrapassou os limites máximos de tensão admitidos.

#### **4.5.3 Simulações dinâmicas de deslocamento**

As cargas dinâmicas tiram a estrutura da sua condição de equilíbrio, é o caso das estruturas que estão sujeitas a carregamentos que variam com o tempo, chamados de carregamentos dinâmicos, estes carregamentos movem os componentes da estrutura e apresentam variações consideráveis de velocidade sujeitos, portanto, a acelerações.

Para Souza (2006), uma grande quantidade de aplicações em engenharia envolve componentes sujeitos a essas cargas dinâmicas, pois sob a ação dessas cargas, as estruturas comportam-se de modo bastante diferente do comportamento apresentado sob a ação de cargas estáticas. A natureza das forças que se manifestam ao analisar-se o comportamento de cada trecho da estrutura sob ação de cargas dinâmicas merece um cuidadoso estudo. Assim cargas dinâmicas ocasionam acelerações nos elementos de uma estrutura ou na estrutura inteira. Essas acelerações estão associadas às variações de velocidade que ocorrem na mesma. Como os elementos da estrutura possuem massa, sob efeito das acelerações presentes surgirão forças de inércia e forças elásticas que irão provocar vibrações. A maioria dos componentes mecânicos está sujeita a cargas que variam com o tempo e, portanto possuem características dinâmicas. Em veículos

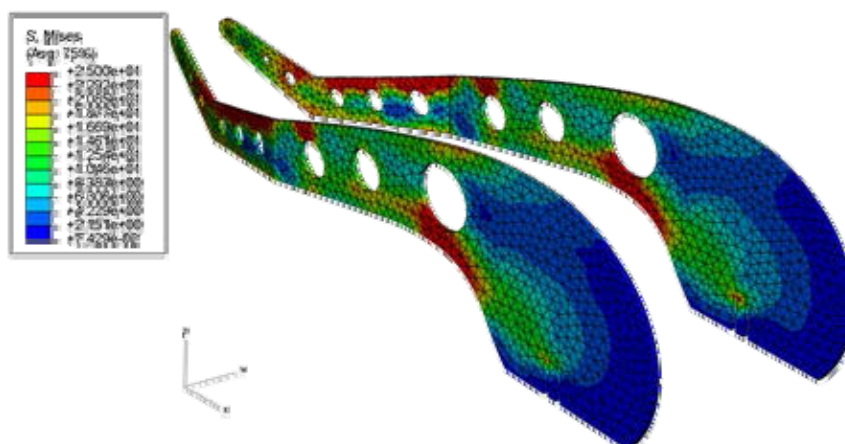
terrestres, a estrutura está sujeita a toda sorte de ações ocasionadas por acelerações repentinas, frenagens violentas, pisos irregulares que geram impactos, reduções acentuadas de marchas etc. Esses eventos acarretam no veículo e em seus componentes, acelerações de diversas intensidades e em diferentes direções. Como consequência a estrutura e os componentes mecânicos deverão ser dimensionados considerando que as forças que estão atuando possuem características totalmente diferentes da estrutura estática.

O projeto de estruturas deve considerar os carregamentos medidos experimentalmente. Muitas vezes, na impossibilidade de prever todos os possíveis carregamentos, surgem os carregamentos de projeto, de modo que se possam prever as situações mais severas da utilização da mesma. Segundo Souza (2006), pode-se citar as seguintes cargas dinâmicas:

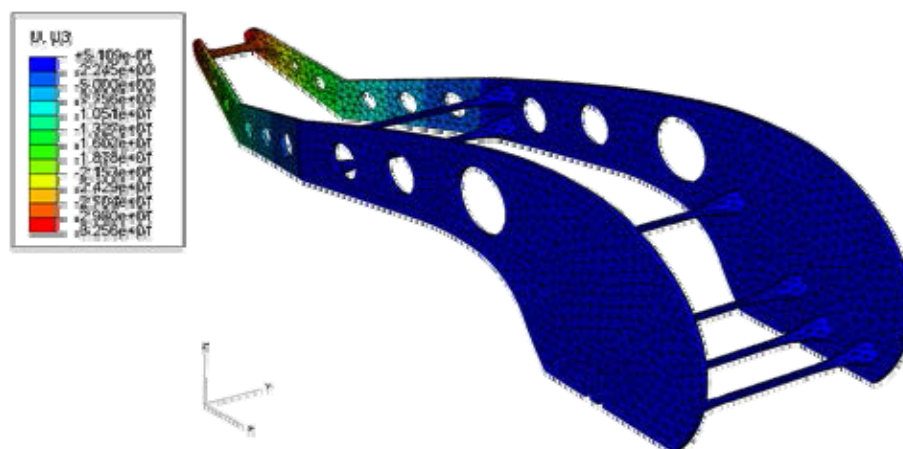
- a) Cargas periódicas – repetem-se identicamente em intervalos de tempos iguais, ocasionando vibrações na estrutura. A cada período ( $T$ ) que o fenômeno se repete é chamado de ciclo.
- b) Cargas senoidais – são cargas periódicas mais simples, a variação com o tempo é chamada de harmônica, ou seja, executa um movimento harmônico.
- c) Cargas não periódicas ou de impacto – podem atuar durante um intervalo muito pequeno de tempo e refere-se a uma colisão real de dois corpos. São consideradas perigosas para as estruturas. Estas, por sua importância e maior grau de complexidade, tanto de teste como de efeito para estrutura em estudo é que serão simuladas nos testes dinâmicos neste trabalho, seguindo os mesmos valores e princípios para aplicação de cargas, condições de contorno e deslocamentos dos testes estáticos, até para avaliação e comparação entre os dois casos.

O deslocamento ao qual o modelo foi submetido pode ser visto na figura 105, onde visualiza-se primeiramente, até 1s, o carregamento do peso próprio e depois então o deslocamento de -30mm simulando irregularidade da pista, ora na roda traseira, ora em uma das rodas dianteiras. Este deslocamento e o tempo em que o mesmo ocorre foi calculado para que o modelo simulasse o veículo a uma velocidade de 18 km/h.





**Figura 107: Visualização das tensões de von mises (MPa) - deslocamento traseiro -30mm preenchimento de 12mm em espuma metálica – 12mm.**



**Figura 108: Visualização da deformação (mm) - deslocamento traseiro -30mm barras 32mm e laterais 1mm em alumínio e preenchimento em espuma metálica – 12mm.**

O mesmo modelo ainda é submetido ao teste de deslocamento dianteiro da roda esquerda para posterior comparação com os demais modelos tipo sanduíche (Figuras 109 e 110). Na figura 109, pode-se ver o modelo com a geometria original e a geometria após o deslocamento e os pontos de maior acúmulo de tensões e conseqüente plastificação.

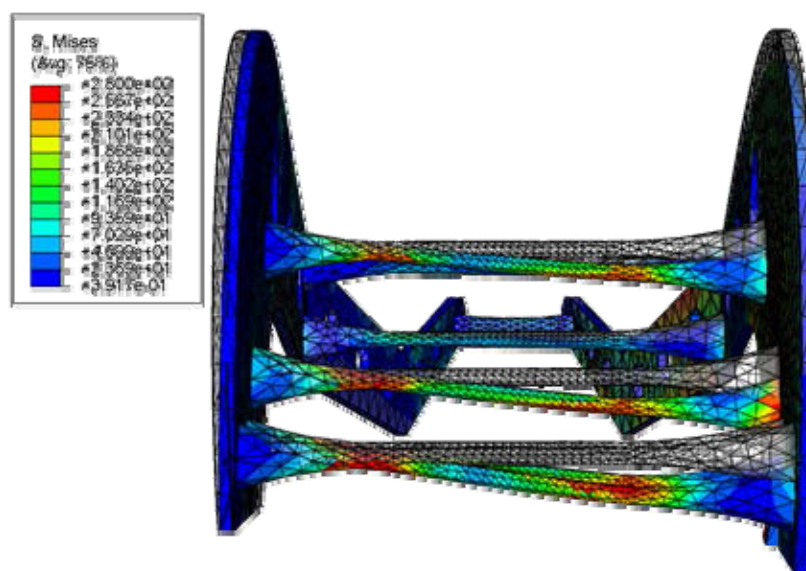


Figura 109: Visualização da deformação (mm) - deslocamento dianteiro esquerdo -30mm e da posição original da geometria - modelo 14mm todo em espuma metálica.

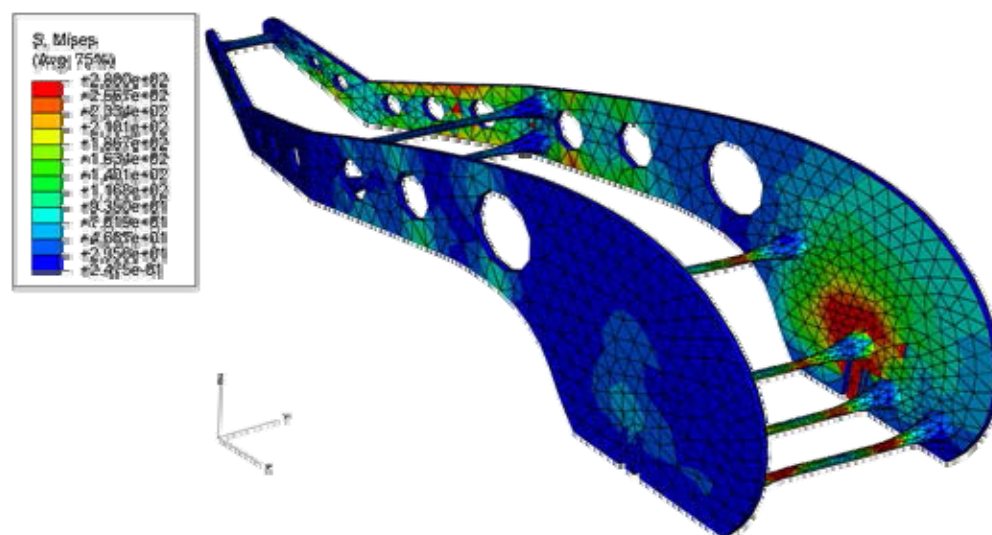
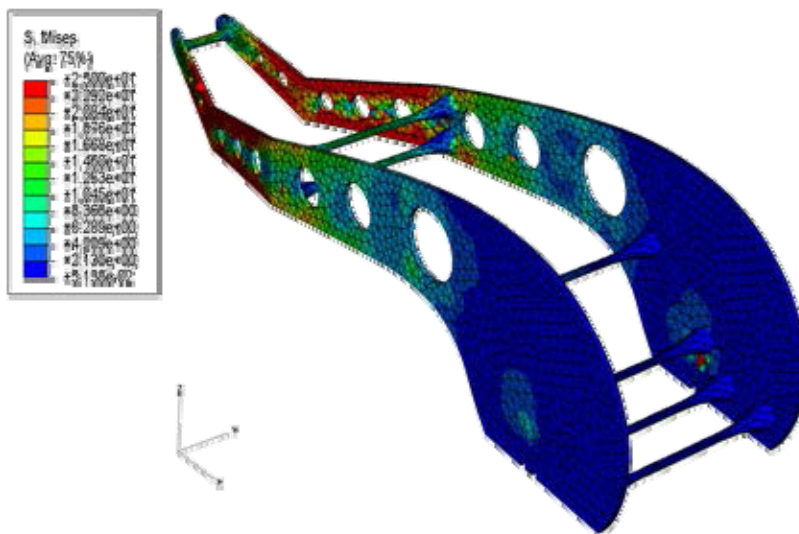


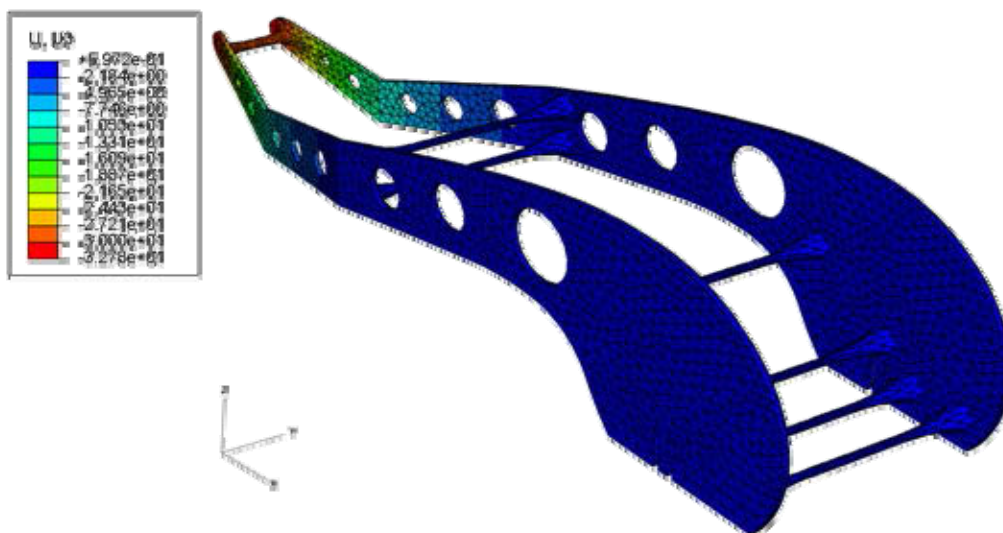
Figura 110: Visualização das tensões (MPa) - deslocamento dianteiro esquerdo -30mm modelo 14mm todo em espuma metálica.



Logo após o mesmo modelo, porém todo em espuma metálica, é submetido ao deslocamento traseiro, conforme as figuras 111 e 112. Nele vê-se que o modelo plastifica e têm tensões concentradas em áreas semelhantes as do teste anterior. Segundo a figura 112 a deformação máxima para este é de 0,59mm, semelhante à deformação máxima do modelo anterior, porém este com peso inferior. O modelo sanduíche com laterais de 1mm e barras de 32mm em alumínio tem 24,89 kg e o modelo todo em espuma pesa 17,77 kg.

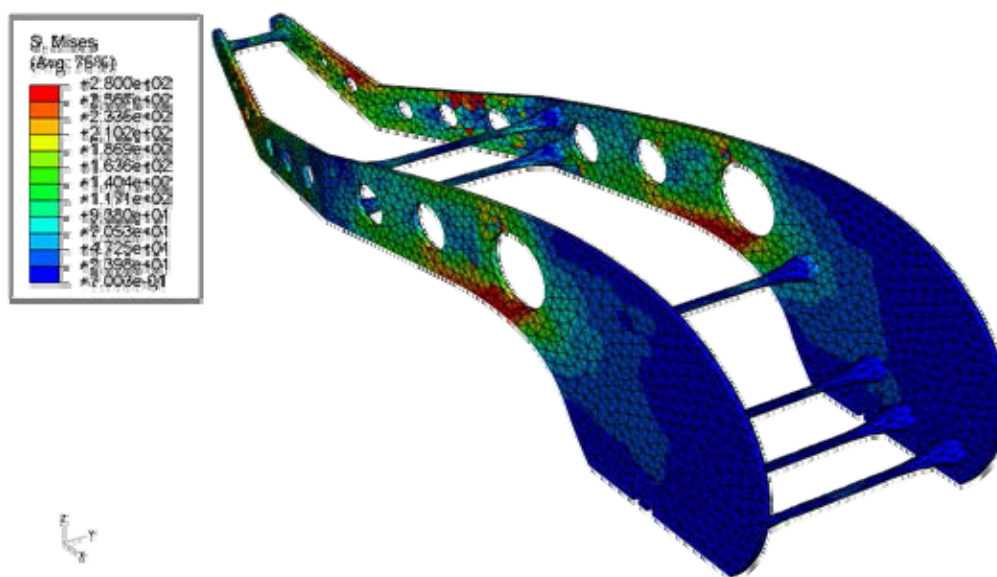


**Figura 111: Visualização das tensões de von mises (MPa) - deslocamento traseiro -30mm modelo todo em espuma metálica.**

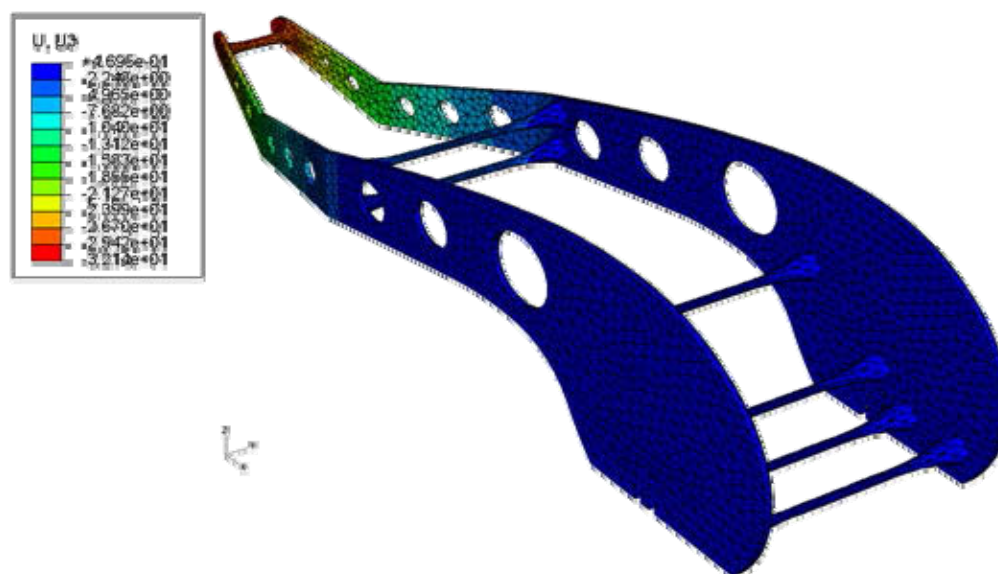


**Figura 112: Visualização da deformação (mm) - deslocamento traseiro -30mm modelo todo em espuma metálica.**

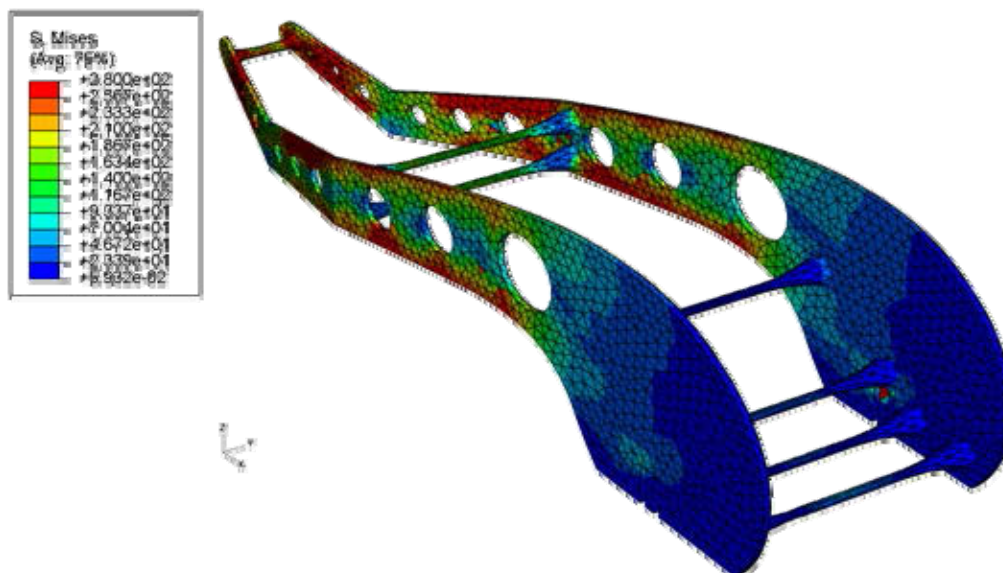
Na seqüência o mesmo modelo, porém em alumínio e após em aço, é submetido ao deslocamento traseiro de -30mm, conforme as figuras 113 e 114 (tensões e deformação para o modelo de 14mm em alumínio), 115 e 116 (tensões e deformação para o modelo de 14mm em aço) para comparação com o modelo todo em espuma metálica, conforme quadro 07.



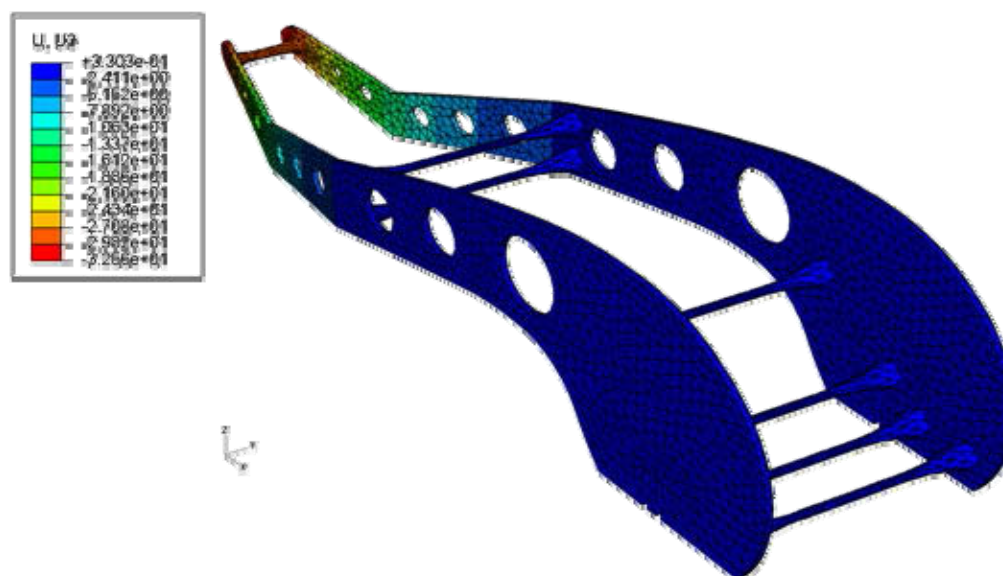
**Figura 113: Visualização das tensões de von mises (MPa) - deslocamento traseiro -30mm modelo 14mm todo em alumínio.**



**Figura 114: Visualização da deformação (mm) - deslocamento traseiro -30mm modelo 14mm todo alumínio.**



**Figura 115: Visualização das tensões de von mises (MPa) - deslocamento traseiro -30mm modelo 14mm todo em aço.**



**Figura 116: Visualização da deformação (mm) - deslocamento traseiro -30mm modelo 14mm todo em aço.**

Conforme as figuras 113, 114, 115 e 116, pode-se ver que tanto em alumínio quanto em aço, o modelo plastifica, evidenciando que para o deslocamento arbitrado e com a geometria utilizada qualquer um dos materiais aplicados demonstrou o mesmo comportamento, porém não com a mesma intensidade. Assim sendo, ambos plastificaram, porém, em áreas um pouco diferentes e com diferentes intensidades. Nota-se, nas figuras 106 (sanduíche 1mm) e 111 (todo em espuma) que quando há aplicação da espuma metálica, seja em parte ou em todo o modelo, o mesmo tem menor

concentração de tensões ao ser submetido ao deslocamento. Todavia, nestes mesmos casos é onde tem-se maior deformação, com deslocamentos de 0,59mm no modelo todo em espuma, enquanto no modelo em aço tem-se 0,33mm. Ou seja, a estrutura tem menores tensões, porém maiores deformações, o que já esperava-se da espuma metálica conforme suas propriedades mecânicas.

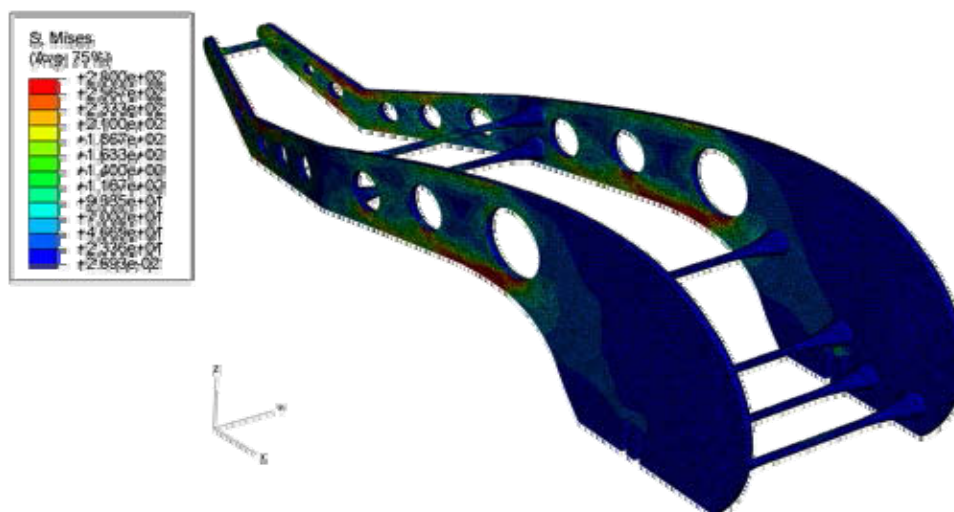
Material	Limite Elástico (MPa)	Peso Próprio	Tensões Máximas (Deslocamento Traseiro)	Custo Total de Material
Espuma Metálica Laterais 14mm / Barras 32mm	25 MPa	17,71 kg	Acima de 25 MPa	R\$ 3.543,12**
Alumínio AA 8011 Laterais 14mm / Barras 32mm	280 MPa	44,21 kg	Acima de 280 MPa	R\$ 1.370,59*
Aço 1020 Laterais 14mm / Barras 32mm	280 MPa	135,79 kg	Acima de 280 MPa	R\$ 638,21*

**Quadro 07: Quadro comparativo entre os diferentes modelos maciços submetidos ao teste Dinâmico.**

Fonte: \* Aços Brasileiro (aço - R\$ 4,70 / kg) e GSD Metals – SP (alumínio – R\$ 31,00 / kg).

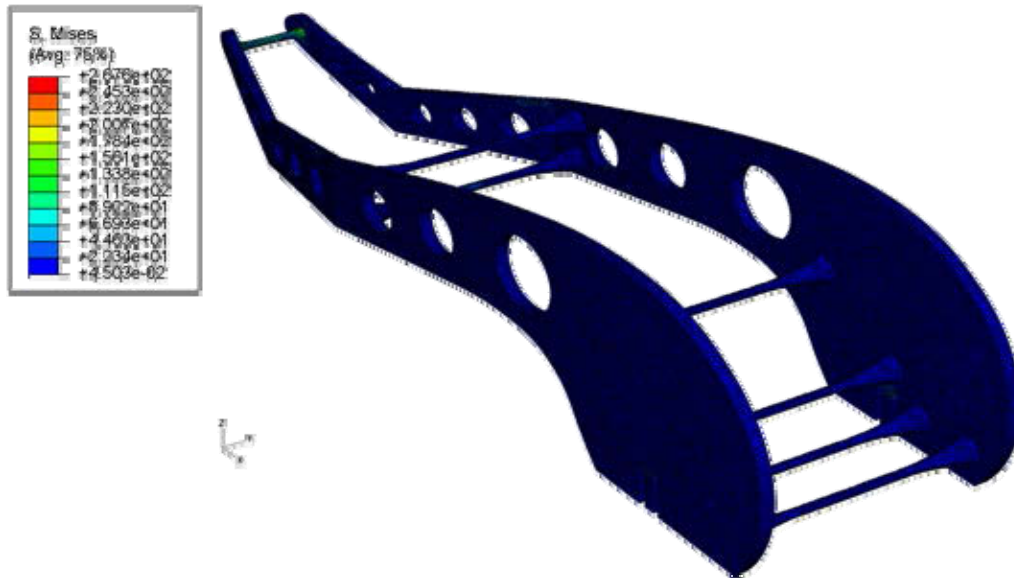
\*\* ERGAEROSPACE (2009), ERG Materials and Aerospace Corporation - Duocel®. ( $\$1.50/2,54\text{mm}^3$ )

Com objetivo de realizar novas comparações entre modelos com diferentes composições de materiais e geometrias, propõe-se mais três testes dinâmicos. O primeiro com o modelo tipo sanduíche, mas com laterais em alumínio de 2mm, depois o mesmo modelo, porém com laterais de 3mm e para contrapor aos anteriores, onde deixa-se o sistema cada vez mais rígido, propõe-se um modelo com a estrutura toda em espuma metálica (laterais com 25mm de espessura) e somente a barra traseira em alumínio.

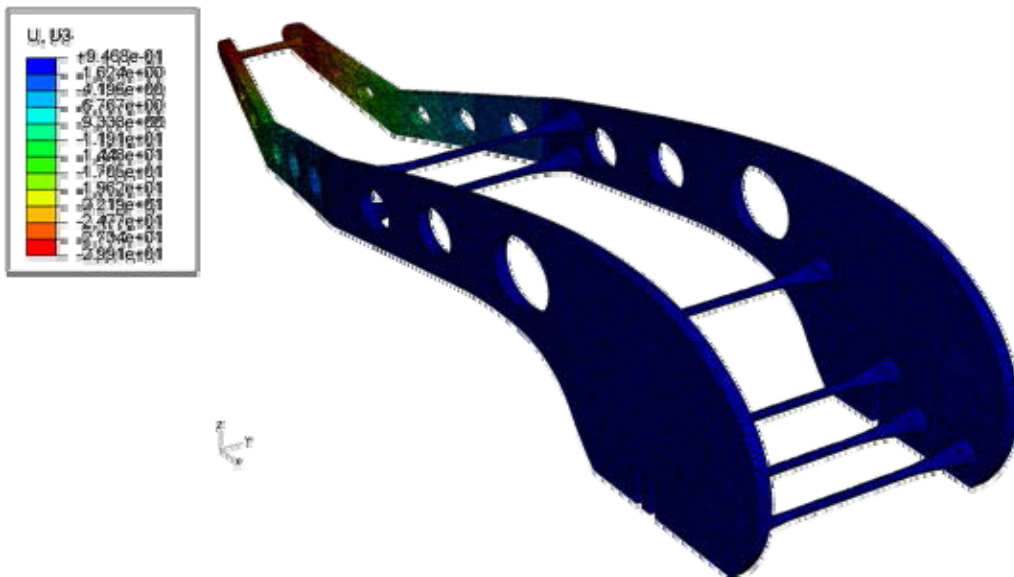


**Figura 117: Visualização das tensões de von mises (MPa) - deslocamento traseiro -30mm modelo sanduíche com laterais em alumínio 2mm e preenchimento em espuma metálica.**





**Figura 121: Visualização das tensões de von mises (MPa) - deslocamento traseiro -30mm modelo sanduíche com laterais em alumínio 2mm e preenchimento em espuma metálica.**



**Figura 122: Visualização da deformação (mm) - deslocamento traseiro -30mm modelo sanduíche com laterais em alumínio 2mm e preenchimento em espuma metálica.**

Conforme as figuras acima, observa-se que a estrutura toda em espuma, conforme visto anteriormente, apresenta menores valores para tensão e maiores valores para deformação. Neste caso somente a barra traseira foi feita em alumínio, mas até mesmo esta poderia ser testada continuamente para chegar-se em uma geometria que com menores tensões. A seguir apresenta-se o quadro 08 onde são estabelecidas comparações entre as tensões para o deslocamento traseiro, limite elástico, peso próprio

e custo para os diferentes modelos testados dinamicamente e sua respectiva composição de materiais.

Material	Limite Elástico (MPa)	Peso Próprio	Tensões Máximas (Deslocamento Traseiro)	Custo Total de Material
Aço 1020 Laterais 14mm / Barras 32mm	280 MPa	135,79 kg	Acima de 280 MPa	R\$ 638,21*
Alumínio AA 8011 Laterais 14mm / Barras 32mm	280 MPa	44,21 kg	Acima de 280 MPa	R\$ 1.370,59*
Espuma Metálica Laterais 14mm / Barras 32mm	25 MPa	17,71 kg	Acima de 25 MPa	R\$ 3.543,12**
Sanduíche com: Laterais em Alumínio 1mm Barras em Alumínio 32mm Preenchimento - Espuma Metálica 12mm	280 Mpa (Al) 25 MPa(Es. Mt.)	24,88 kg	Acima de 280 MPa Acima de 25 MPa	R\$ 2.970,05**
Sanduíche com: Laterais em Alumínio 2mm Barras em Alumínio 32mm Preenchimento - Espuma Metálica 12mm	280 Mpa (Al) 25 MPa(Es. Mt.)	30,05 kg	Acima de 280 MPa Acima de 25 MPa	R\$ 3.130,00**
Sanduíche com: Laterais em Alumínio 3mm Barras em Alumínio 32mm Preenchimento - Espuma Metálica 12mm	280 Mpa (Al) 25 MPa(Es. Mt.)	35,34 kg	Acima de 280 MPa Acima de 25 MPa	R\$ 3.293,98**
Espuma Metálica Laterais 25mm / Barras 32mm Barra traseira em alumínio 32mm	280 Mpa (Al) 25 MPa(Es. Mt.)	29,65 kg	267,60 MPa (Al) 22,30 MPa (Es. Mt.)	R\$ 5.927,75**

**Quadro 08: Quadro comparativo entre os diferentes modelos submetidos ao teste Dinâmico.**

Fonte: \* Aços Brasileiro (aço - R\$ 4,70 / kg) e GSD Metals – SP (alumínio – R\$ 31,00 / kg).

\*\* ERGAEROSPACE (2009), ERG Materials and Aerospace Corporation - Duocel®. (\$1.50/2,54mm<sup>3</sup>)

Conforme o quadro acima, pode-se ver que, entre os modelos testados, o que melhor atendeu às solicitações de carregamento, apresentando menores tensões e não plastificando foi o modelo em espuma metálica com 25mm de espessura e barra traseira em alumínio. Este, por sua vez, é um dos modelos mais leves e com valor do custo de material mais alto, em função de sua composição em espuma metálica. Isto, por sua vez, pode não ser um grande impedimento, visto a diferença que pode fazer em questões como desempenho e até mesmo segurança em caso de impacto, como apresentado a seguir, nos capítulos 4.5.5 – Crash test e 4.6 - Estudo de viabilidade do emprego de espumas metálicas no design automotivo.

Ainda em teste dinâmico, uma resposta muito importante que pode ser obtida é a rigidez dinâmica de uma estrutura através da avaliação de seus modos de vibrar e respectivos valores de frequências naturais (análise modal).

#### 4.5.3.1 Freqüências Naturais e Modos de Vibração

Segundo ABRAMS (2007), o chassi ideal é aquele que associa alta rigidez com baixo peso e custo. Este, se considerado em movimento, vibra e com isso aumenta a complexidade do sistema do veículo podendo comprometer sua performance.

Qualquer objeto material tem uma ou mais freqüências nas quais ele vibra. Se for um objeto simples, como um pêndulo ou uma corda de violão, essa freqüência é bem definida e só há um modo fundamental. Outros objetos mais complicados, como um tambor, uma mesa, um prédio, etc, podem vibrar em muitos modos, com muitas freqüências diferentes. Ao "tocar" em um objeto, com certa intensidade, ouve-se um som que é o resultado do conjunto de modos de vibração naturais deste objeto. Chamam-se freqüências naturais de um objeto as freqüências com que esse objeto vibra, quando excitado de alguma forma. Quando uma ação externa age sobre o objeto ele só vibra nessas freqüências naturais ou seus harmônicos. Não adianta forçar, se uma freqüência de vibração não for uma freqüência natural do objeto ele nunca vibrará nessa freqüência.

Para ABRAMS (2007), um chassi, assim como qualquer estrutura, possui um infinito número de freqüências ressoando, estas conhecidas como freqüências naturais. O fator que controla a amplitude da vibração é o amortecimento. Para cada uma das infinitas freqüências naturais de vibração existentes, uma diferente parte do chassi irá deformar enquanto existir a vibração. As partes deformadas do chassi vibrarão de acordo com os modos de vibração. Dos infinitos modos de vibração existentes em uma estrutura, somente as freqüências mais baixas são interessantes. Os baixos modos de vibração maximizam a energia cinética<sup>8</sup> e minimizam a tensão enquanto os altos modos agem de maneira oposta. Isto significa que as partes frágeis e rígidas do chassi serão semelhantes nos dois modos de vibração respectivamente. As freqüências naturais e seus modos de vibrar interferem significativamente nos parâmetros que medem a estabilidade e conforto em um veículo.

O veículo é um sistema dinâmico que excitado exhibe vibrações. Segundo Ferreira (2003), existem várias fontes excitadoras atuantes nos automóveis,

---

<sup>8</sup> Energia Cinética - Em física, a energia cinética é a quantidade de trabalho que teve que ser realizado sobre um objeto para tirá-lo do repouso e colocá-lo a uma velocidade "v".



normalmente, provenientes da rugosidade da pista e do conjunto roda/pneu, sistema de transmissão e motor.

A estrutura do veículo foi excitada continuamente no modelo virtual com sinais harmônicos de frequência. As frequências naturais foram obtidas e podem ser vistas no quadro 09. A frequência em Hertz é o número de onda multiplicado pela velocidade do veículo.

Modo	Material			
	Alumínio (14mm) Peso 44,21 kg	Espuma (14mm) Peso 17,71 kg	Alumínio + Espuma (1mm para cada lateral +12mm) Peso 24,88 kg	Epuma (25mm) Peso 29,65 kg
1º Modo	1.06 Hz	0.78 Hz	1.09 Hz	0.83 Hz
2º Modo	1.76 Hz	1.28 Hz	1.88 Hz	1.25 Hz
3º Modo	2.26 Hz	1.66 Hz	2.27 Hz	1.77 Hz
4º Modo	2.50 Hz	1.83 Hz	2.30 Hz	2.00 Hz
5º Modo	2.65 Hz	1.94 Hz	2.67 Hz	2.34 Hz

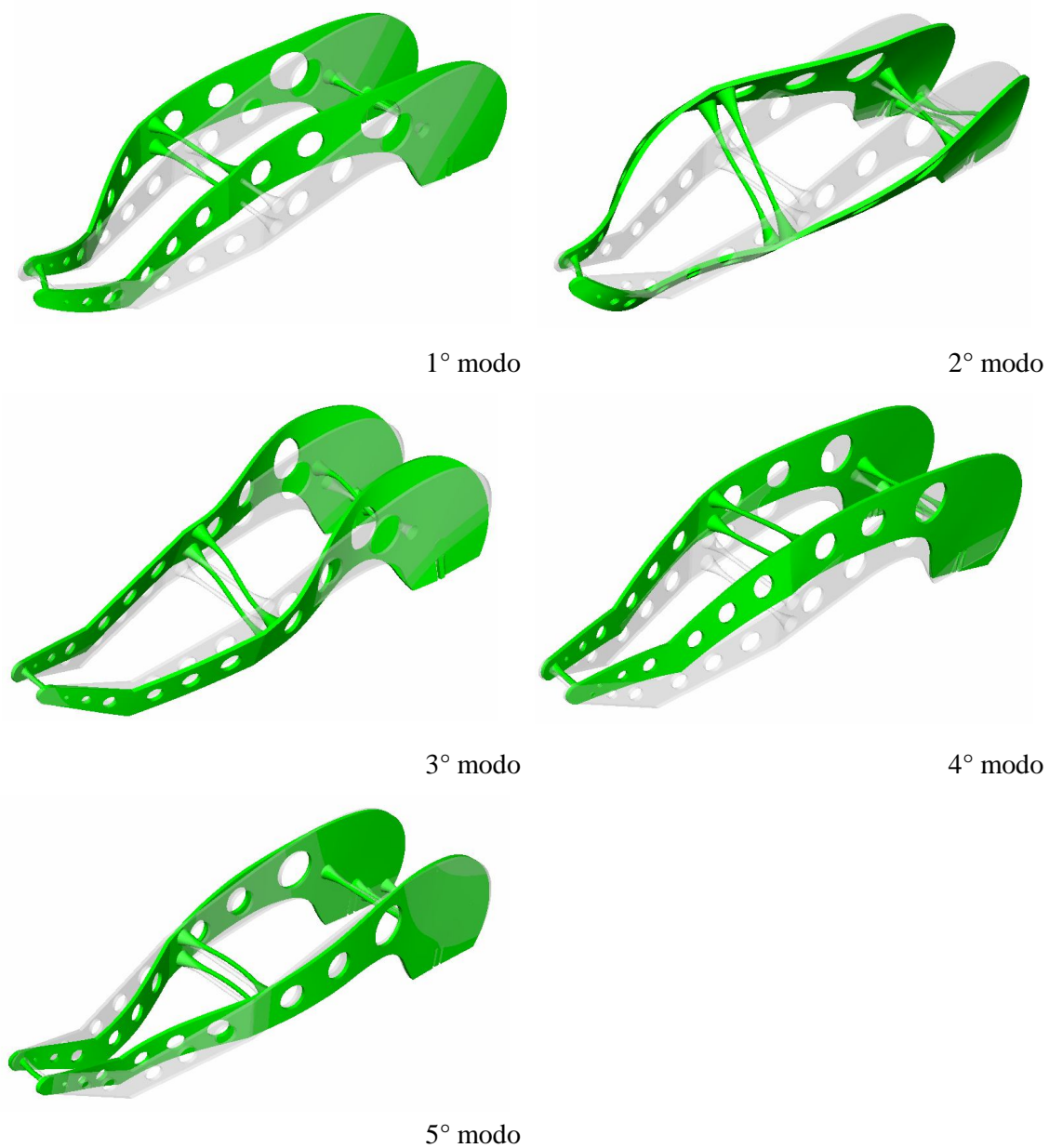
**Quadro 09: Modos de vibração do modelo em suas diferentes composições de materiais e geometrias submetidas ao teste dinâmico de frequências naturais.**

A malha de elementos finitos utilizada é do tipo tetraédrica, contendo 154.556 elementos e um total de 28.000 nós.

Os resultados de frequências apresentam baixos valores. Quanto aos modos de vibração (autovetores), o primeiro modo é caracterizado por uma flexão lateral, o segundo por torção, o terceiro por flexão com torção, o quarto por flexão vertical e o quinto é composto por flexão na traseira do veículo. Além disto, o engaste rígido aumenta a rigidez da estrutura, a qual deveria considerar componentes elásticas.

Através deste teste pode-se perceber que para a geometria utilizada, o modelo possui pouca rigidez estrutural. Isso pode ser devido ao fato de desconsiderar-se a rigidez fornecida por outros elementos como o motor, banco, etc e suas respectivas massas. Entre os modelos comparados, nota-se que o modelo todo em espuma metálica com 14mm de espessura possui pior desempenho (baixas frequências) e quando utilizada em composição com as laterais e barras em alumínio apresenta desempenho semelhante ao do modelo todo em alumínio. Isso mostra uma vantagem quanto a redução de peso no modelo tipo “sanduíche”, porém mantendo as frequências com valores semelhantes às do modelo maciço, ou seja, com o modelo tipo sanduíche consegue-se praticamente os mesmos valores de frequências porém com a metade do peso para a mesma geometria.

Os resultados finais, com condições de contorno conforme as utilizadas nas situações anteriores e com as propriedades da espuma metálica são apresentados a seguir na figura 123.



**Figura 123: Modos de vibração para o modelo de 25mm de espessura em espuma metálica.**

As frequências são proporcionais à relação entre rigidez e massa:

$$\{f_n\} \propto C \sqrt{\frac{[K]}{[M]}}$$

Onde  $M$  é a matriz de massa,  $C$  a matriz de amortecimento,  $K$  a matriz de rigidez.

Para comparações entre mesmas condições de contorno e geometria pode-se aproximar como proporcional à relação de elasticidade com o produto de densidade por volume:

$$\{f_n\} \propto C \sqrt{\frac{[E]}{[\rho V]}}$$

E sendo assim, os valores numéricos dos materiais utilizados concordam com as frequências encontradas com o software.

#### 4.5.4 Teste de impacto - Crash test

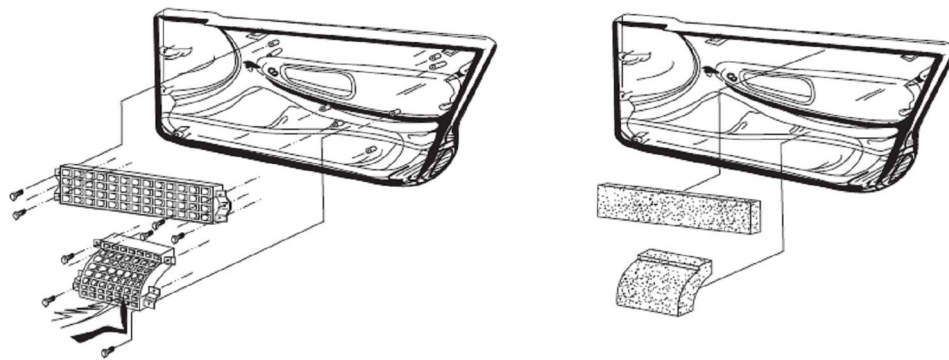
##### 4.5.4.1 Segurança veicular

A segurança dos automóveis tem sua importância reconhecida pelos consumidores em todo o mundo. Já há algumas décadas, esta característica dos veículos divide, juntamente com o design, o consumo, o conforto e a potência dos motores, as páginas das mais renomadas publicações automotivas.

O surgimento da engenharia de segurança veicular tem seu início efetivo no pós-guerra no século XX. Inicialmente, os esforços foram concentrados na indústria aeronáutica e posteriormente grande parte do conhecimento adquirido fora migrado para os centros de pesquisas automotivos, principalmente na Europa e nos Estados Unidos. Dos diversos ramos existentes dentro da segurança veicular, o desenvolvimento de cintos de segurança mereceu maior empenho nos primeiros anos de pesquisa. Paralelamente, atividades que diziam respeito a desenvolvimento de bancos, painéis de instrumentos, *airbags*, volantes e avanços na área estrutural, através da execução de *crash tests*, foram conduzidas e hoje a segurança veicular tem uma maior abrangência e atua praticamente em todo o veículo.

#### 4.5.4.2 A dinâmica das colisões veiculares

Segundo Bertocchi (2005), durante uma colisão veicular, toda a energia cinética tem que ser dissipada de alguma forma até que os corpos (veículo e ocupantes) cheguem à condição de repouso. No caso do veículo, a energia será dissipada através da deformação de sua estrutura e de seu deslocamento. No caso dos ocupantes do veículo, a energia será dissipada através do seu amortecimento pelos componentes do interior do habitáculo. Atualmente vários são os componentes no interior do veículo que agem passivamente de modo a proteger os ocupantes durante uma colisão veicular (Figura 124).



**Figura 124: Absorvedores de energia nos revestimentos de porta.**

Fonte: Bertocchi (2005).

O risco para os ocupantes de um veículo em caso de impacto está diretamente associado com o como e o quão rápido eles perdem a sua velocidade presente no momento da colisão. Segundo Bertocchi (2005), um veículo a 60km/h apresenta cerca de 44% a mais de energia do que um veículo de mesma massa a 50 km/h. Outro conceito importante é o da conservação de energia. Ele estabelece que a energia total de um sistema se mantém sempre constante a não ser que haja transmissão de energia para fora do sistema. No caso de sistemas mecânicos a energia transmitida equivale ao trabalho realizado pelas forças na superfície dos corpos que é igual a força vezes a distância em que ela atua.

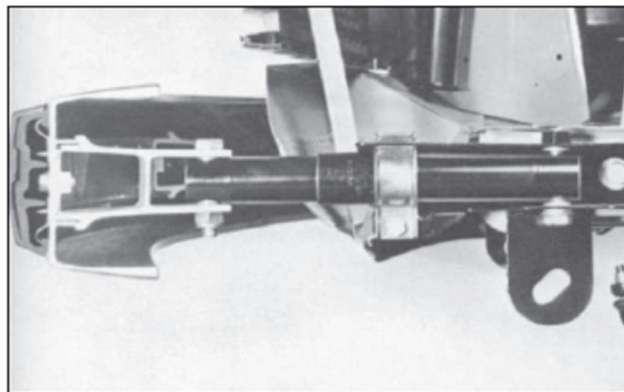
Para Bertocchi (2005), no caso de uma colisão, grande parte da energia será dissipada através da deformação da estrutura do veículo. Considerando-se dois veículos idênticos e na mesma velocidade, em ambos os casos (frenagem e colisão), o produto entre a força para parar o veículo e o tempo necessário para isso ( $F \times dt$ ) é igual. A grande diferença é o balanceamento dessas grandezas. Em uma frenagem tem-se um

tempo maior de desaceleração e, portanto, é necessária uma força menor para parar o veículo. No caso de uma colisão, o tempo para o veículo chegar ao repouso é muito curto e para isso é necessária uma força extremamente maior.

A parcela de contribuição do veículo e a do sistema de retenção para absorção (Figura 125) de toda a energia varia de veículo para veículo. Abordando sempre as colisões frontais, um veículo com estrutura dianteira mais rígida propicia maiores patamares de aceleração para o interior do habitáculo, pois deforma relativamente menos. Porém, é capaz de suportar uma severidade maior de impacto sem que haja danos ao habitáculo. O raciocínio inverso também é válido. Veículos com estruturas menos rígidas mostram, até uma faixa de severidade, o benefício de absorver mais energia e propiciar patamares menores de aceleração para os ocupantes.

*“Do ponto de vista do ocupante, um veículo ideal se deformaria progressivamente, com uma força constante necessária para deformar a estrutura e com o maior deslocamento possível, sem atingir o habitáculo do veículo. Se essa desaceleração fosse medida, ela seria ideal se constante e durasse o maior intervalo de tempo possível, assim, maximizar o tempo em que as forças atuam sobre o sistema para minimizar a magnitude das mesmas”.*

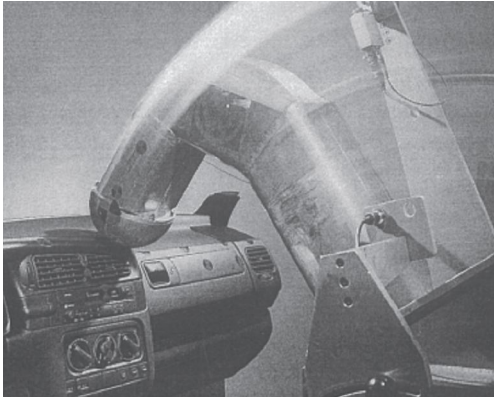
Bertocchi (2005)



**Figura 125 : Absorvedores de energia utilizados em para-choques dianteiros pela Volvo – 1960.**

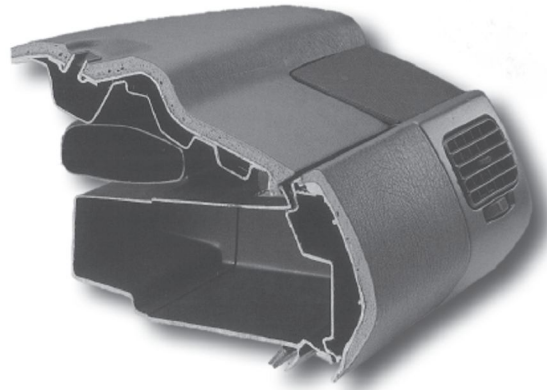
Fonte: Bertocchi (2005).

Nos EUA a norma FMVSS 201-U (2002) apresenta requisitos de HIC (*Head Injury Critereon*) para impactos de cabeça contra regiões do interior do veículo, localizadas acima do nível do painel de instrumentos. São impactos a 24 km/h que devem atender a valores estabelecidos. A cabeça é arremessada em vôo livre até o local de impacto, impulsionada por um propulsor (Figuras 126, 127 e 128).



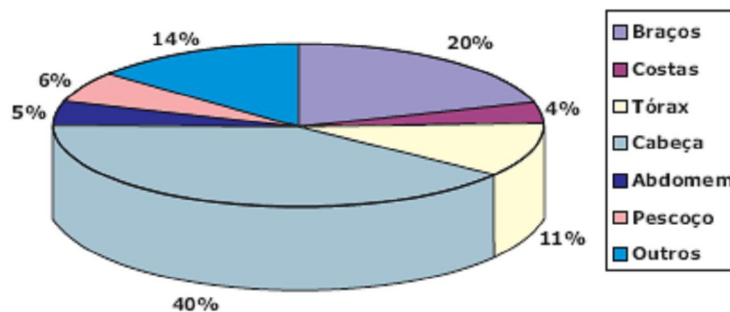
**Figura 126: Impacto contra a superfície de um painel de instrumentos de acordo com as normas européias e norte-americanas.**

Fonte: Bertocchi (2005).



**Figura 127: Painel de instrumentos revestido com material para absorver energia do impacto.**

Fonte: Bertocchi (2005).



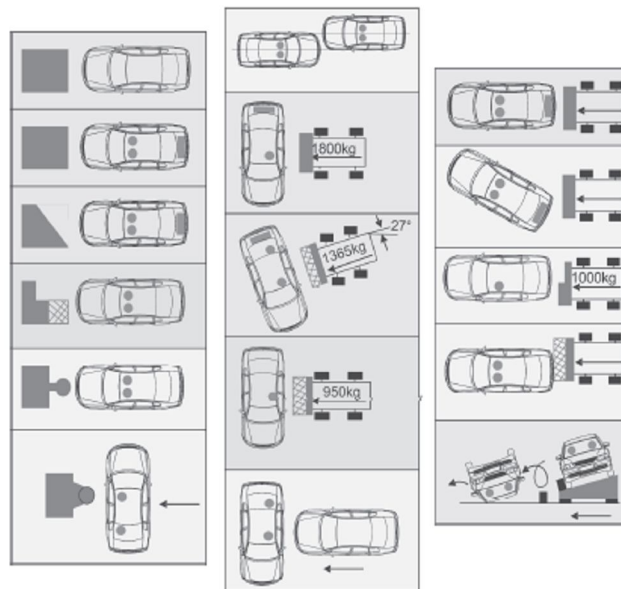
**Figura 128 : Percentagem das partes do corpo lesionadas em acidentes de trânsito.**

Fonte: Bertocchi (2005).

Segundo Bertocchi (2005), os principais mecanismos de lesão na cabeça em colisões veiculares frontais são devidos à aplicação de altos níveis de pressões positivas e negativas decorrentes do movimento relativo entre crânio e cérebro. Em impactos frontais, por exemplo, na medida em que ocorre a desaceleração do veículo, a cabeça acelera para frente em relação ao veículo e o cérebro tende a ficar parado provocando pressão positiva na região posterior da cabeça (fenômeno do golpe) e negativa na região anterior. Devido à ação do sistema de retenção, a cabeça passa a ser então desacelerada e o cérebro a ser deslocado para frente. Dessa forma é provocada pressão negativa na região posterior da cabeça e pressão positiva na região anterior, quando ocorre o fenômeno do contra golpe. Durante o fenômeno do contra golpe pode ocorrer o rompimento das ligações nervosas com a coluna cervical. Os níveis de pressão aumentam na medida em que houver maior deformação do crânio em caso de impacto da cabeça contra o interior do veículo.

#### 4.5.4.3 Crash test Virtual

Segundo EURONCAP (2009), quando fala-se em segurança veicular, os testes de impacto (*crash tests*) são os mais lembrados. Os critérios para se determinar quais as velocidades que serão empregadas, as direções de impacto e as barreiras contra as quais os veículos serão chocados dependem do objetivo do ensaio. Para ensaios de homologação de um produto são utilizadas as regulamentações vigentes no mercado em que o modelo será vendido. Segundo EURONCAP (2009), na Europa, por exemplo, é exigido o atendimento a um impacto frontal a 56 km/h contra uma barreira deformável de alumínio que atinge no mínimo 40% da frente do veículo, do lado do motorista (Figura 128). Também é uma exigência legal, na Europa, uma colisão de uma barreira móvel padronizada contra a lateral do veículo a 50 km/h (Figura 129). Existem também critérios definidos por institutos de consumidores e revistas especializadas. A revista alemã *Autobild*, por exemplo, realiza impactos frontais entre dois veículos, ambos a 50 km/h.

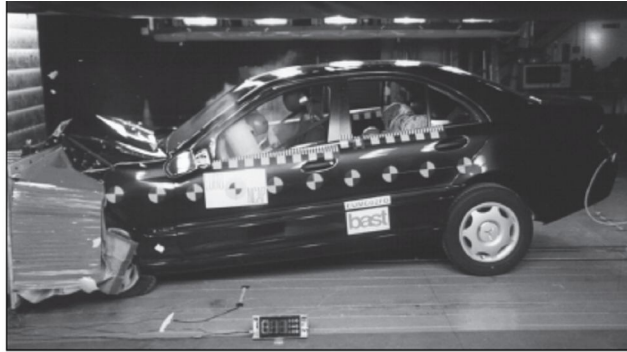


**Figura 129: Alguns ensaios de impacto de veículos mais comuns e seus procedimentos.**

Fonte: Bertocchi (2005).

Os ensaios de impacto, por serem considerados uma ferramenta poderosa de engenharia, constituem-se na melhor forma de se avaliar e propor soluções para avançar no processo de evolução técnica, no que diz respeito à proteção dos ocupantes em colisões veiculares. Este, por sua vez, antes de ser realizado com modelo físico, pode ser

feito em ambiente virtual, como propõe este trabalho, para as primeiras análises e otimizações possíveis antes dos testes reais. Com mais esta ferramenta computacional, o projetista e empresa investidora têm a possibilidade de economizar tempo e investimentos que seriam empregados em testes físicos (Figura 130).



**Figura 130: Ensaio de crash test real a 64km/h que conferiu ao Mercedes-Benz Classe C a graduação de 5 estrelas em ensaio no EuroNCAP – 2001 - 2002.**

Fonte: Bertocchi (2005).

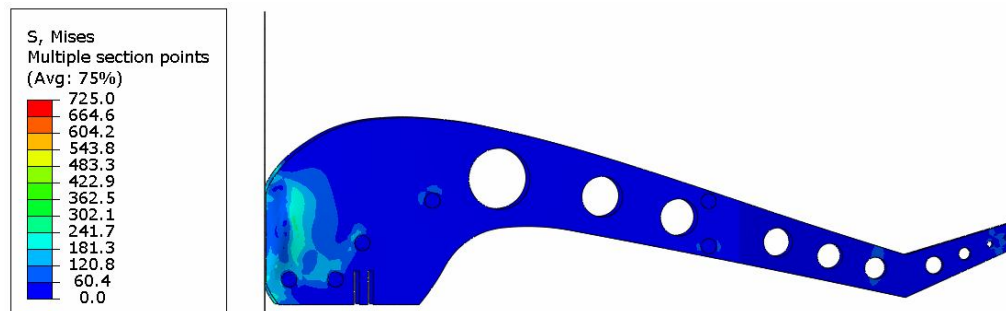
Além dos *crash tests*, ensaios dinâmicos em carrocerias, como *sled tests*, são muito comuns no desenvolvimento de sistemas de retenção. As carrocerias são fixadas sobre um trenó de impacto que através de um sistema de desaceleração controlada (hidráulico, pneumático ou através da deformação de estruturas metálicas) propicia aos componentes do habitáculo patamares de desaceleração similares aos encontrados nas colisões reais. O mesmo procedimento pode ser simulado virtualmente, assim como todos os outros ilustrados na figura 129.

Para realização do *crash test*, com o modelo do estudo de caso, foi determinada, a partir dos testes dinâmicos realizados anteriormente, a geometria composta por laterais (1mm) e barras de ligação (32mm) em alumínio e preenchimento de 12mm em espuma metálica (Figura 96). Esta mesma geometria foi testada posteriormente, porém, composta por um único material (primeiramente em alumínio e após somente em espuma metálica), tendo-se então 14mm de espessura nas laterais e a mesma geometria das barras, para comparação com o teste anterior.

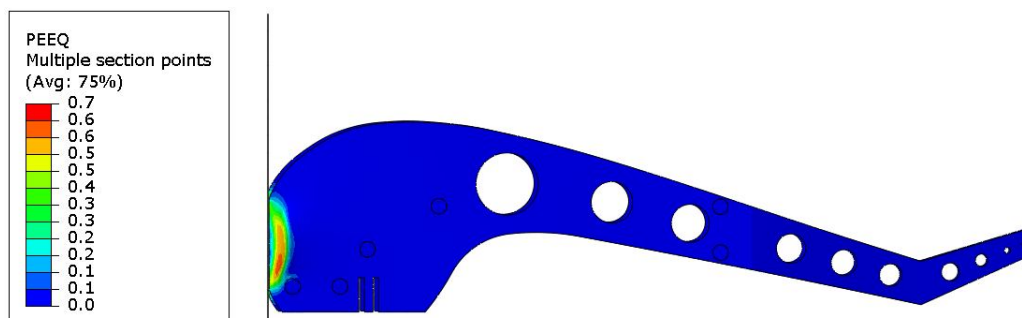
Nas figuras 131 e 132 pode-se ver os resultados do ensaio de *crash test*, para o modelo com composição de materiais tipo sanduíche. Em seguida, visualizam-se as tensões de von mises e a deformação plástica equivalente para o modelo todo em espuma metálica (Figuras 133 e 134) e para o modelo todo em alumínio (Figuras 135 e



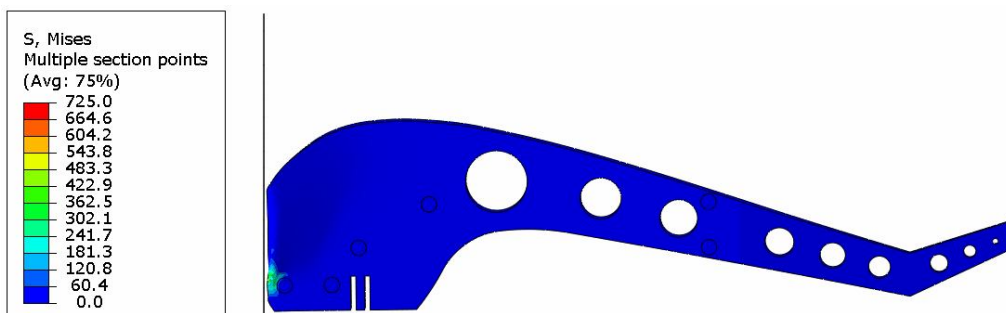
136). O veículo foi impulsionado contra uma barreira rígida a uma velocidade de 50km/h em todos os casos.



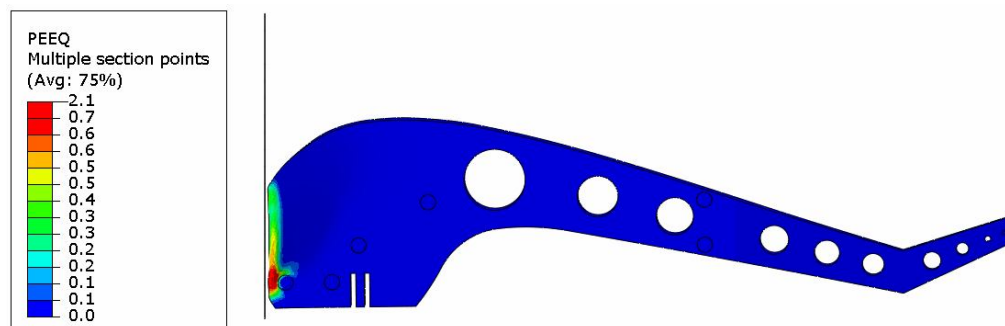
**Figura 131: Visualização das tensões de Von mises para o ensaio de *crash test* .  
Modelo com laterais e barras em alumínio e preenchimento em espuma metálica.**  
Fonte: Gerado em parceria com Smarttech – SP (2009).



**Figura 132: Visualização da deformação plástica equivalente para o ensaio de *crash test* .  
Modelo com laterais e barras em alumínio e preenchimento em espuma metálica.**  
Fonte: Gerado em parceria com Smarttech – SP (2009).

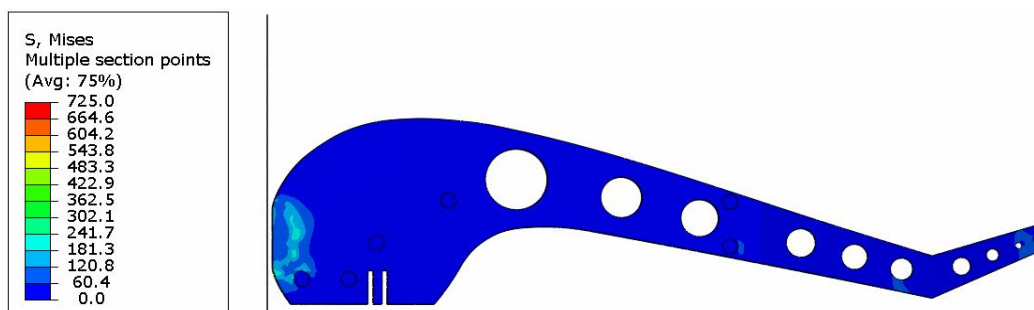


**Figura 133: Visualização das tensões de Von mises para o ensaio de *crash test* .  
Modelo todo em espuma metálica.**  
Fonte: Gerado em parceria com Smarttech – SP (2009).



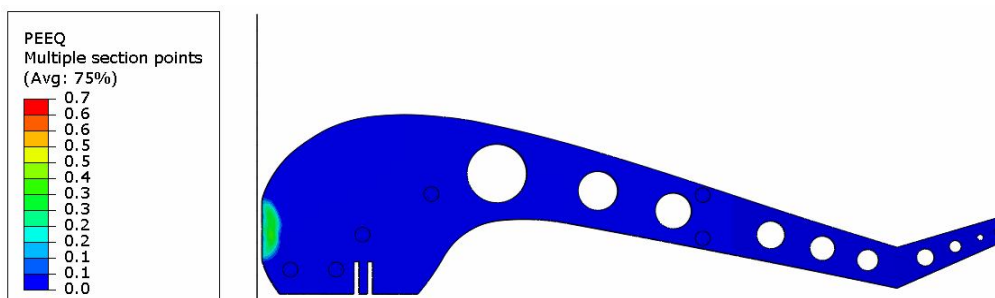
**Figura 134: Visualização da deformação plástica equivalente para o ensaio de *crash test* .  
Modelo todo em espuma metálica.**

Fonte: Gerado em parceria com Smarttech – SP (2009).



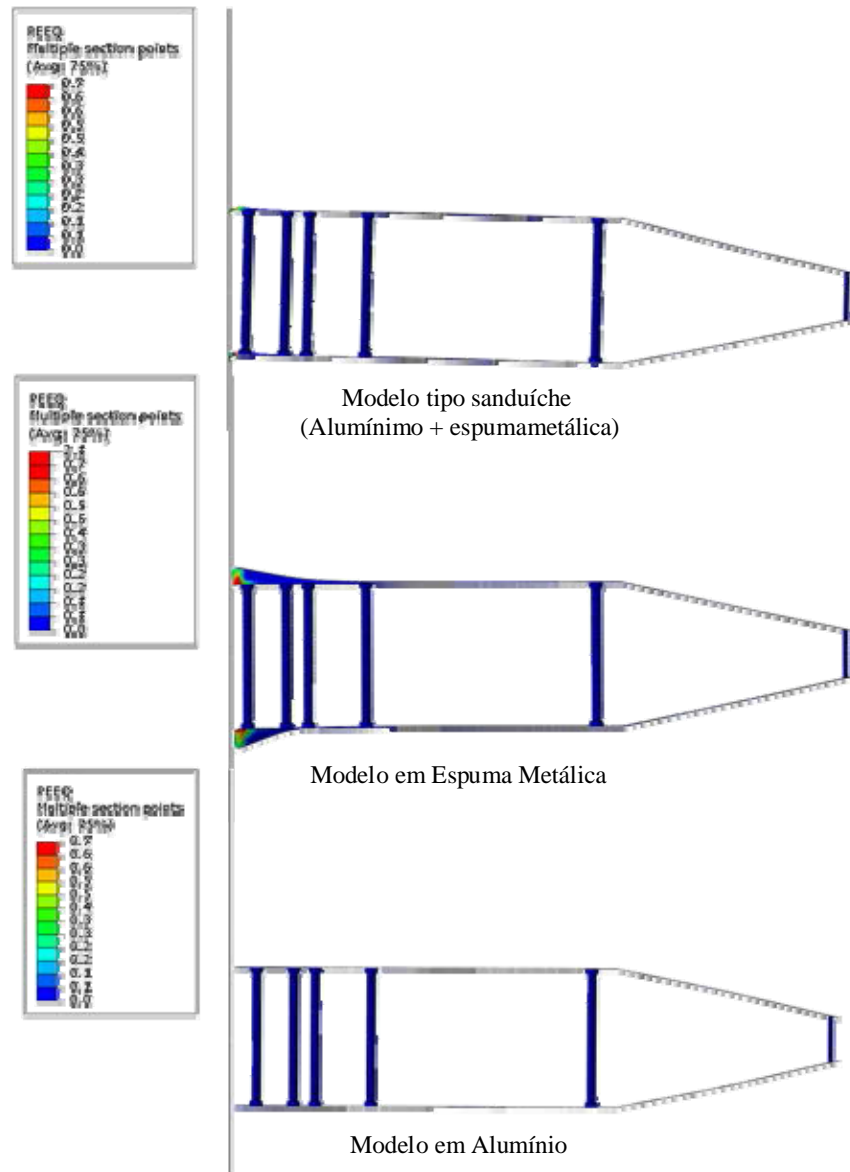
**Figura 135: Visualização das tensões de Von mises para o ensaio de *crash test* .  
Modelo todo em alumínio.**

Fonte: Gerado em parceria com Smarttech – SP (2009).



**Figura 136: Visualização da deformação plástica equivalente para o ensaio de *crash test* .  
Modelo todo em alumínio.**

Fonte: Gerado em parceria com Smarttech – SP (2009).

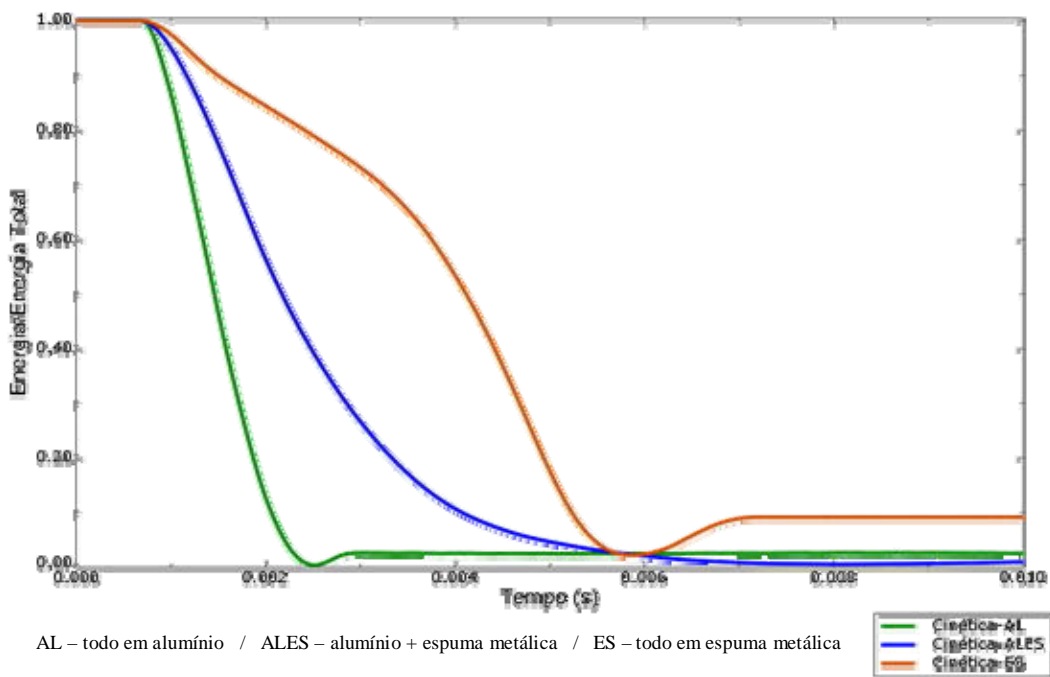


**Figura 137: Comparativo da distribuição da deformação plástica no sistema para o modelo em seus três tipos de composição de materiais.**

Fonte: Gerado em parceria com Smarttech – SP (2009).

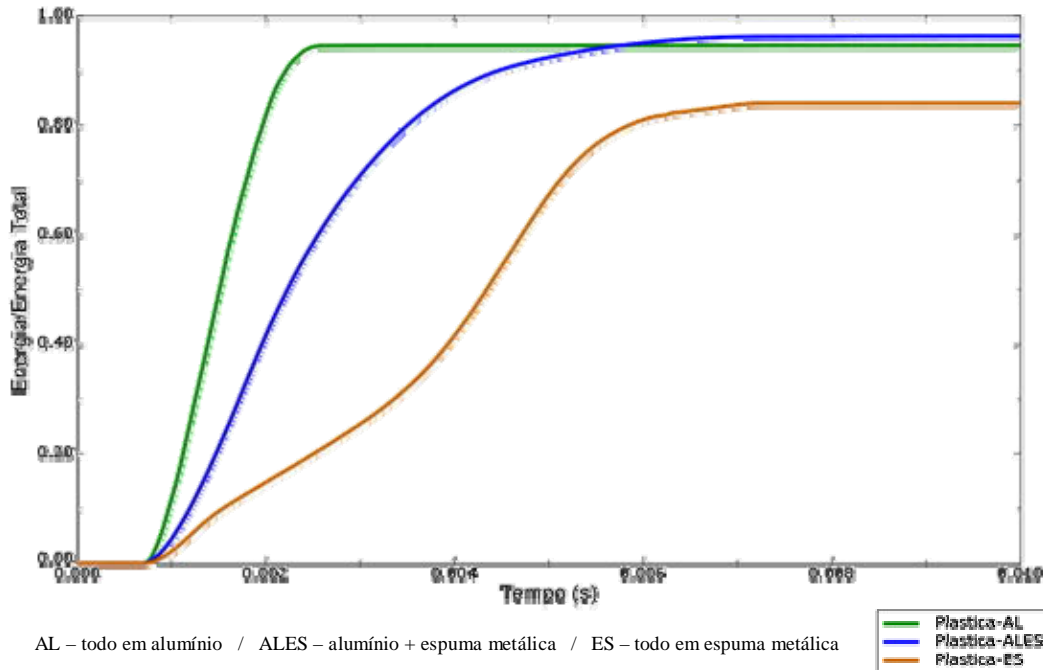
A figura 137 mostra a distribuição da deformação plástica equivalente para o modelo nas três diferentes composições de materiais. Assim como nos testes anteriores, o modelo de composição tipo sanduíche uniu as propriedades dos dois materiais (alumínio e espuma metálica) resultando em um conjunto mais rígido, com menor deformação, porém com melhor absorção da energia do impacto do que o modelo em alumínio maciço. Já o modelo todo em espuma metálica foi o que sofreu maior deformação plástica, porém, como mostram as figuras 138 e 139, foi o que desacelerou

mais lentamente, chegando a levar três vezes mais tempo para chegar ao mesmo ponto em que o modelo maciço em alumínio. Ou seja, com o *crash test*, fica evidente o comportamento da espuma metálica como um bom absorvedor da energia de impacto, uma vez que, conforme figuras 138 e 139, é o material que desacelera mais lentamente e conseqüentemente o que tem maior dissipação plástica (deformação), transferindo para o material maior parte da energia do impacto e não para o ocupante do veículo.



**Figura 138: Comparativo da energia cinética no sistema para o modelo em seus três tipos de composição de materiais.**

Fonte: Gerado em parceria com Smarttech – SP (2009).



**Figura 139: Comparativo da dissipação plástica no sistema para o modelo em seus três tipos de composição de materiais.**

Fonte: Gerado em parceria com Smarttech – SP (2009).

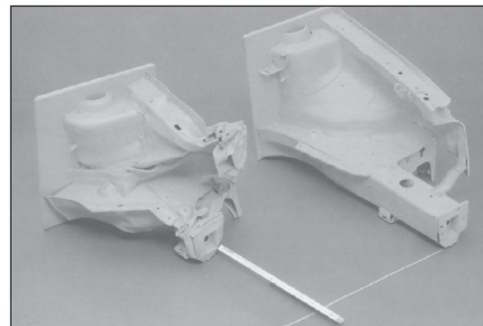
O importante no impacto, para que o habitáculo não seja atingido, é que a estrutura frontal seja capaz de absorver o máximo de energia cinética possível, para que esta não seja assimilada internamente ao veículo vindo a atingir os ocupantes. Para esta finalidade, segundo os *crash test's* realizados, a espuma metálica mostrou-se ideal.

Estruturas de materiais leves e resistentes, que não implicassem em aumento de massa, mas que servissem de reforço e fossem projetadas numa concepção adequada seriam mais eficientes em impactos.



**Figura 140: Exemplos de modos de dissipação da energia de impacto frontal na estrutura do veículo – *crash box*.**

Fonte: ERGAEROSPACE (2009).



**Figura 141: Longarinas dianteiras antes e após a deformação - otimização da absorção de energia do impacto.**

Fonte: Bertocchi (2005).

A participação da estrutura do veículo no processo de absorção da energia envolvida nas colisões é fundamental. O compromisso que deve ser encontrado no que diz respeito à rigidez da estrutura é de extrema importância. Tomando como exemplo as colisões frontais, pode-se dizer que veículos com baixa rigidez em sua região frontal deformarão mais rapidamente, diminuindo, portanto, o tempo que os ocupantes possuem para chegar ao repouso. Por outro lado, caso o veículo apresente a região frontal muito rígida, a desaceleração será maior, havendo a necessidade de uma compensação no sistema de retenção dos ocupantes, através da utilização de recursos como *airbags*, *crash Box* (Figuras 140 e 141), entre outros. Tudo é uma questão de gerenciamento da energia envolvida na colisão. Por este motivo, a aplicação de espuma metálica em estruturas veiculares torna-se tão atrativa, pois apresenta, como citado anteriormente, alta rigidez com boa absorção de impacto, o que é comprovado no *crash test* virtual realizado.

Como visto, segundo Bertocchi (2005), pode-se afirmar que a boa proteção dos ocupantes durante o impacto depende principalmente de três fatores: uma conversão eficiente da energia cinética em trabalho de deformação; baixos níveis de desaceleração para o ocupante e manutenção da integridade do habitáculo. De acordo com os testes realizados, segundo estes critérios, a espuma metálica apresenta bom comportamento para atender aos dois primeiros fatores, assim auxiliando muito para atender ao terceiro também.

#### **4.5.4.4 Reparabilidade veicular**

Para Bertocchi (2005), durante o desenvolvimento de um veículo, a performance do mesmo em colisões à baixa velocidade também é avaliada no que diz respeito ao custo de reparo que irá onerar ao cliente. O objetivo é que, após esse tipo de acidente, o menor número possível de peças sejam danificadas. Essa avaliação determina, em alguns mercados, os valores do seguro que serão aplicados aos diferentes modelos de veículos. O foco principal de desenvolvimento recai sobre os sistemas de pára-choques (dianteiros e traseiros) e longarinas (dianteiras e traseiras). A principal dificuldade reside em obter-se uma estrutura que atenda aos requisitos de baixo custo de reparo,

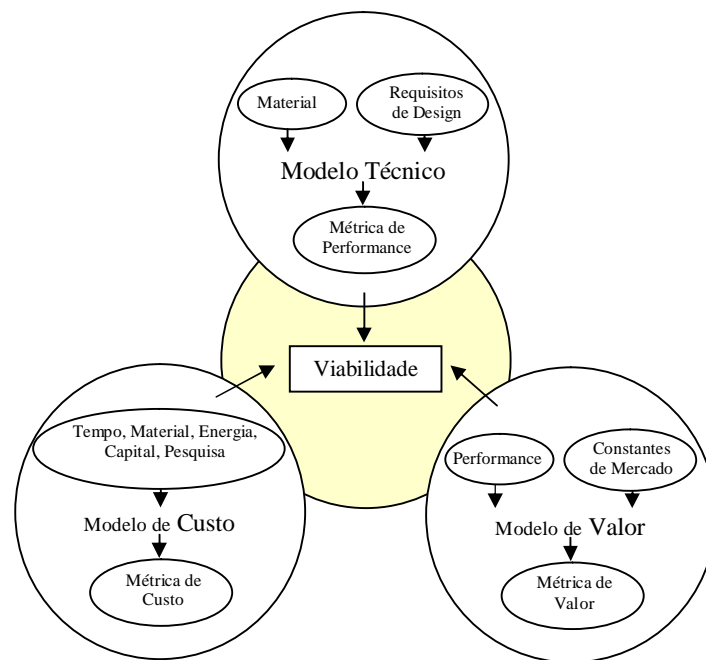
mas que ao mesmo tempo atenda também aos requisitos de boa performance em colisões em altas velocidades. Desta forma, assim como vê-se na figura 140, com a aplicação da espuma metálica além da estrutura, como em peças e sistema do veículo, pode-se desenvolver sistemas mais econômicos e de fácil reparabilidade. Assim, dependendo da intensidade do impacto, pode-se trocar apenas uma parte do sistema ou até ele todo. Este tipo de aplicação diferenciada para o material contribui também para a viabilidade do mesmo e sua inserção do mercado, como é destacado no capítulo a seguir.

#### **4.6 Estudo de Viabilidade do Emprego de Espumas Metálicas no Design Automotivo**

Segundo Cole e Sherman (1995), como resultado às necessidades de economia de combustível e impacto no ambiente natural, aumenta a tendência a substituir os materiais convencionais usados hoje em dia na indústria automotiva. Materiais leves, como o alumínio e suas ligas, por exemplo, podem ser empregados neste caso. No entanto, o maior desafio para estes novos materiais é a habilidade de poderem ser produzidos a um preço aceitável pelo mercado. Estes são aceitos pelo mercado quando os benefícios que trazem são proporcionais ao seu custo. Para Cole e Sherman (1995), o custo de um novo material é sempre comparado ao custo do material convencional atualmente em uso no mesmo produto e esta é uma das variáveis mais importantes no momento da seleção de um novo material para que ele tenha oportunidade de emprego em um componente de veículo. Entre estes novos materiais, destacam-se as espumas metálicas.

Atualmente as espumas metálicas são produzidas em pequena escala e comparada aos metais sólidos, dos quais deriva, ainda é onerosa. Mas, para Ashby (2000), não é o custo atual o mais relevante e sim o custo que terá quando produzido em larga escala e de forma automatizada para atender as demandas de suas aplicações específicas.

Assim sendo, quando as Espumas Metálicas serão viáveis? Entendendo viabilidade como o balanço favorável entre performance e custo, para Ashby (2000), a resposta tem 3 fatores: o modelo técnico da performance do material em dada aplicação, o modelo de custo gerando uma estimativa entre o material e seu custo de produção e, por fim, um modelo que compare custo e performance, feito pela construção de uma função de Valor (Figura 141). Quando fala-se em Valor, não pensa-se mais só em custo mas sim, em quanto o usuário está disposto a pagar pelo benefício (performance) que o produto e/ou material traz consigo (Valor).



**Figura 141: Relação entre os Modelos de Custo, Técnico e de Valor.**  
Fonte: Ashby (2000).

Dentro deste contexto, pesquisadores da área da administração de empresas desenvolveram ferramentas para minimizar os impactos negativos para novos empreendimentos sem o devido planejamento. Para tanto, a bibliografia sobre o assunto hoje é vasta e Modelos de Planos de Negócios (PN) são diariamente publicados.

O PN contém todos os conhecimentos gerados pelo empreendedor sobre seu setor de atuação, sobre si mesmo e sobre seu futuro empreendimento (Dolabela, 1999). Para Andreolla (2004), o PN, não é nenhuma receita de bolo, nem mesmo a garantia de sucesso da empresa. A técnica em si não basta, mas, sem ela, os riscos de um fracasso aumentam.



Nesta busca por informações, três macro-áreas, como visto anteriormente, necessitam de estudos e aprofundamento de conhecimento por parte do empreendedor: viabilidade mercadológica, viabilidade técnica e viabilidade financeira. Cabe ao empreendedor, após o levantamento de informações, tomar decisões sobre o início ou não de um empreendimento, ou ainda quando já na posição de empresário<sup>9</sup>, decidir se executa ou não o Plano de Negócios.

Busca-se assim, apresentar um checklist presente na maioria dos Planos de Negócio publicados, de acordo com a seguinte ordem:

- a) Aspectos Mercadológicos
- b) Aspectos Técnicos
- c) Aspectos Financeiros

#### **4.6.1 Aspectos Mercadológicos (Modelo do Valor)**

Trata da análise do Mercado em que o empreendimento será implementado. Fornecedores, intermediários, concorrentes, consumidores e públicos envolvidos compõem esse mercado.

Para tanto, torna-se necessária uma análise de mercado, através de:

- a) Pesquisas de mercado: Qualitativa, Quantitativa ou Mista.

Com o objetivo de verificar os interesses e necessidades por parte de potenciais consumidores dos produtos ou serviços a serem desenvolvidos.

- b) Análise do Macroambiente do empreendimento.

Listando quais as oportunidades e ameaças identificadas nas relações com fornecedores, intermediários, concorrentes, consumidores e todos os envolvidos nas relações empresariais.

Também torna-se fundamental a busca por identificação das barreiras de entrada<sup>10</sup> e barreiras de saída<sup>11</sup> do mercado.

- c) Definição de um Mercado-Alvo.

---

<sup>9</sup> Empreender não é uma ação restrita a abertura de um novo empreendimento. Pode-se empreender planos com empresas já montadas, como no caso de ampliação da atividade empresarial, por exemplo.

<sup>10</sup> Barreiras de entrada podem ser caracterizadas como os obstáculos que dificultam a entrada de uma empresa nova no mercado. Dentre os exemplos mais comuns de barreiras de entrada a um mercado pode-se citar: investimento inicial elevado, conhecimento técnico muito especializado, existência de marcas e patentes que dificultam a legalização da empresa, exigência de licenças especiais ou simplesmente dificuldade de obtenção de matéria-prima.

<sup>11</sup> Barreiras de saída podem ser caracterizadas como os obstáculos que dificultam a saída de uma empresa do mercado. Dentre exemplos temos: Grande especialização de ativos, Custos fixos de saída elevados, Inter-relação estratégica de negócios, Barreiras emocionais, Restrições governamentais e sociais, dentre outros.

Vários segmentos ou nichos de mercado apresentam-se quando iniciam-se as pesquisas e precisa-se ter foco de atuação, pois os esforços não devem ser dispersos.

d) Verificação do Potencial de Mercado, apurando-se;

d.1) Identificação dos Consumidores. - Onde moram; Como agem; Hábitos de consumo e de vida; Qual a percepção de qualidade que possuem.

d.2) Identificação dos Fornecedores. - Onde se localizam; São qualificados, certificados; São pontuais; Possuem capacidade para atender suas demandas; Quais as condições de crédito exigidas.

d.3) Identificação dos Concorrentes. - Quem são; Quantos são; Onde se localizam; São vulneráveis; Quais pontos fortes eles têm; Qual a estrutura produtiva e comercial dos concorrentes, é maior ou menor; Os preços e os custos dos concorrentes são competitivos; Qual a imagem dos concorrentes no mercado; Existe concorrência acirrada, equilibrada ou monopólio;

e) Estratégias e Plano de Marketing. - Quais os diferenciais do produto/serviço; Por quê tal preço será praticado; Onde, como e porquê será comercializado; Quais as estratégias de promoção? (comunicação a ser utilizada).

Algumas questões podem ficar sem uma resposta inicial neste momento do Plano de Negócios, porém com a execução da verificação da viabilidade técnica e financeira todas precisam estar respondidas. Principalmente questões vinculadas a preço do produto ou do serviço.

A partir do término da etapa de Viabilidade Mercadológica, encaminha-se para a segunda etapa que trata dos aspectos de Viabilidade Técnica do empreendimento.

#### **4.6.2 Aspectos Técnicos (Modelo Técnico)**

Segundo Ashby et al (2000), para construir o modelo técnico, a métrica de performance  $P_i$  é identificada e avaliada para espumas e materiais ou sistemas concorrentes.  $P_i$  é medida pela performance oferecida pelo material em uma aplicação em particular. Para utilização no Design de Veículos de baixo peso, a métrica  $P_i$  é a massa, ou seja, o material mais leve, mas que ao mesmo tempo atende as solicitações físicas, mecânicas, etc da situação proposta. Para o Design Sustentável, a métrica  $P_i$  são os recursos associados à manufatura, sua forma de uso e conseqüente impacto. Assim, cada métrica especificada define um objetivo, um atributo que a estrutura é solicitada a maximizar ou minimizar. A equação resultante de performance contém grupos de

propriedades dos materiais ou índices e o material que maximizar o resultado da métrica de performance tem o maior mérito. Mas para isto ser viável, a performance tem de ser comparada com o custo e seu Modelo de Custo.

#### 4.6.3 Aspectos Financeiros (Modelo de Custo)

A produção de Espuma Metálica, assim como outro material, consome uma série de recursos. O custo final é a soma destes recursos consumidos no processo e também para o processo. Segundo Ashby et al (2000), alguns recursos que podem ser listados são:

- Cm: Material (matéria-prima - \$/kg);
- Ct: Capital (equipamentos, ferramentas, etc que deve ser amortizado pelo volume total de produção - \$/unidade);
- Tl: Tempo necessário para produção - \$/hora;
- PCe: Custo de Energia consumida para produção - \$/Kw.hora;
- ACs: Espaço para produção, incluindo o custo de aluguel, etc - \$/m<sup>2</sup>.hora;
- Ci: Informação envolvendo custos de Pesquisa e Desenvolvimento ou ainda royalties e licenças - \$/hora.

Assim, a equação, segundo Ashby et al (2000), toma a forma:

$$C(\text{custo}) = \left[ \frac{m.Cm}{1-f} \right] + \left[ \frac{Ct}{n} \right] + \left[ \frac{CL}{n} \right] + \left[ \frac{PCe}{n} \right] + \left[ \frac{ACs}{n} \right] + \left[ \frac{Ci}{n} \right]$$

↑  
Materiais

↑  
Equipamentos

↑  
Tempo

↑  
Energia

↑  
Espaço

↑  
Informação

Onde  $n$  é a taxa de produção (kg/h) e  $f$  é o refugo gerado pelo processo de produção.

Porém é comum que um mesmo equipamento não seja dedicado apenas a uma função ou produto específico, assim este custo também dilui-se em outros produtos e processos. Assim, as variáveis tempo, energia, espaço e informação agrupam-se em um teto bruto por unidade ( $C_{L\text{Gross}}$ ) para o processo, resultando na equação:



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pode-se dividir as considerações finais deste trabalho em conclusões para o estudo de caso apresentado e em conclusões para a dissertação como um todo, levando em conta sua contribuição para a comunidade acadêmica, para o mercado, para a sociedade, para o autor e equipe envolvida na pesquisa, aproximando as ferramentas de auxílio ao projeto em design à realidade.

Para o primeiro caso, conclusões para o estudo de caso, pode-se afirmar que a metodologia apresentada para análise e simulação estrutural de veículos de transporte mostrou-se viável de acordo com resultados obtidos no desenvolvimento do trabalho para o modelo em estudo e que esta mesma metodologia pode ser aplicada como ferramenta no desenvolvimento de projeto de produto de outros tipos de veículos e sistemas. Ressalta-se ainda o caráter exploratório da metodologia desenvolvida neste trabalho, onde seu objetivo principal era relacionar estudo do emprego da espuma metálica no design automotivo com as ferramentas computacionais disponíveis de forma a evidenciar seu efetivo benefício ao designer no processo de desenvolvimento de produto. Assim, o trabalho não visa a proposta final de uma nova alternativa de projeto para o chassi do estudo de caso, mas sim uma série de estudos através da exploração das ferramentas computacionais utilizadas e análise dos resultados com elas obtidos. Então, de acordo com as simulações realizadas, pode-se afirmar que a alternativa que melhor atendeu às solicitações dos testes foi a com laterais (25mm) e barras principais (32mm tipo taça) em espuma metálica e barra traseira em alumínio. Para esta situação não ocorre plastificação na simulação dinâmica de deslocamento, possui baixo peso (29,65 kg), tendo peso total do veículo inferior ao do modelo real e, como visto na simulação de *crash test*, o modelo todo em espuma metálica foi o que demonstrou melhores condições em situação de impacto frontal. Porém, de acordo com a simulação das frequências naturais, a composição da estrutura em espuma metálica com uma fina chapa em alumínio nas extremidades das laterais do veículo auxiliaria na rigidez do conjunto, apresentando assim desempenho semelhante ao do modelo todo em alumínio, que possui maior rigidez.

Observa-se ainda que a aplicação da espuma metálica é bastante complexa, principalmente em virtude da geometria do modelo e da situação de simulação dinâmica. Porém os resultados das simulações apresentadas validam a metodologia empregada e explicitam os potenciais recursos das ferramentas computacionais

empregadas para o desenvolvimento de melhorias e otimização da estrutura, como a redução de peso do produto com ganho de performance.

Finalmente, através das simulações realizadas e da metodologia adotada, pode-se concluir que os testes feitos de forma isolada, como proposto pelo trabalho ao simular somente o chassi do veículo, demonstram que sistemas mais complexos devem ser simulados e entendidos primeiramente de forma independente e depois em conjunto com os demais sistemas do veículo para facilitar a posterior simulação a avaliação do produto completo, pois a partir dos testes realizados e para a continuidade dos mesmos teria-se que levar em conta sistemas integrados ao chassi, como amortecimento, rodas, direção, motor, entre outros que contribuiriam para estabilidade do conjunto.

Para o segundo caso, considerações para dissertação como um todo, entende-se que os objetivos deste trabalho foram atingidos, pois apresenta-se na revisão bibliográfica uma vasta caracterização e aplicações para o material pesquisado e com o apoio do estudo de caso desenvolvido mostra-se como a metodologia empregada pode tornar-se exaustiva como ferramenta de projeto até definição da solução mais adequada na seleção, modelagem, simulação computacional e aplicação da espuma metálica no design automotivo.

Pode-se destacar, ainda, que o setor automotivo proporciona constantes desafios para os profissionais e empresas que nele atuam, pelo seu expressivo volume, competição mundial, base tecnológica, capacidade de investimento e alto nível de exigência em aspectos como design, conforto, segurança e desempenho, tanto pela indústria quanto pelo consumidor. E ainda, através das simulações realizadas pode-se verificar que, atualmente e no futuro, o ponto chave em design automotivo é a possibilidade de explorar o maior número de alternativas possíveis no menor espaço de tempo para atender às demandas anteriormente citadas.

Através dos testes dinâmicos pode-se observar que os mesmos são essenciais, uma vez que as simulações estáticas, na prática, mostram-se corretas, porém estão distantes de representar a realidade. Ainda no capítulo 4.5.4 (Teste de impacto - Crash test), as propriedades de absorção de energia de impacto das espumas metálicas foram confirmadas pelo *crash test* realizado a partir do modelo do estudo de caso, mostrando-se mais eficiente para este fim dos que os demais materiais empregados. Assim evidenciando um nicho importantíssimo de mercado para este material em comparação aos outros materiais atualmente empregados na indústria automotiva.

Conforme capítulo 4.6 (estudo de viabilidade do emprego de espumas metálicas no design automotivo), conclui-se que são muitas as questões a serem respondidas pelo mercado, principalmente nacional e há a existência de fortes barreiras de entrada, principalmente para o setor automotivo e que podem ser minimizadas pelo estudo científico dos benefícios econômicos (para aplicação em larga escala), de desempenho, segurança e ambientais obtidos através da metodologia proposta para aplicação da espuma metálica como alternativa de um material inovador a contribuir para o desenvolvimento sustentável de produto em design automotivo.

### 5.1 Oportunidades, Desafios e Sugestões para Trabalhos Futuros

Como desafios e oportunidades, tem-se o estudo contínuo e sistemático a ser realizado das potenciais aplicações para as espumas metálicas, assim como estudo mais aprofundado sobre suas propriedades, limitações, métodos produtivos e caracterização detalhada para com isso possibilitar sua produção em larga escala e com devido controle de sua estrutura e morfologia para uma ampla gama de aplicações, tornando-se assim mais atrativa e competitiva comercialmente frente aos materiais disponíveis no mercado. Além disso, é necessária a identificação de empresas de base tecnológica com interesse em desenvolver pesquisas para este fim, em função da atual falta de interação e transferência de conhecimentos entre a indústria e a academia neste setor.

As sugestões para trabalhos futuros podem ser classificadas de duas formas: aplicadas ao trabalho desenvolvido com objetivo de melhorá-lo e na continuidade deste trabalho, ou seja, a partir dos resultados obtidos a fim de prosseguir a pesquisa em desenvolvimento.

Dentro da primeira forma classificada pode-se destacar:

- Procurar obter dados mais precisos da relação constitutiva do material, tal como gráficos representativos de sua tensão x deformação provenientes de ensaios experimentais, para melhor caracterização do mesmo na entrada de dados do *software* Abaqus CAE.
- Realizar testes com a mesma geometria empregada tridimensionalmente (*solid*), porém de forma bidimensional (*beam*), ou ainda com outro tipo de elemento finito, tal como superfícies 3D (*shell*), para validar este modelo em comparação ao anterior com objetivo de redução do custo computacional.

Dentro das propostas para continuidade do trabalho, destaca-se:

- Acrescentar novas análises dinâmicas, tais como frenagem, aceleração e desaceleração em reta e em curva, para estudar os carregamentos advindos de curvas, manobras e frenagens, além de elaborar uma metodologia para definição e análise dos pontos críticos da estrutura, a fim de propor soluções isoladas para cada caso conforme necessário.
- Realizar o ensaio de Bump levando em consideração maiores irregularidades do pavimento isoladamente e em toda estrutura ao mesmo tempo, levando, em consideração demais sistemas do veículo, como amortecimento.
- Empregar a mesma metodologia utilizada, porém em outros estudos de caso (modelos) como na proposta de um veículo ainda não fabricado, ou seja, na fase de projeto.
- Realizar os testes com outros *softwares* de simulação através do método dos elementos finitos, como ADAMS, NASTRAN, ANSYS, etc.
- Realizar estudo específico e detalhado da viabilidade do emprego de espumas metálicas no design automotivo através do Plano de Negócios proposto neste trabalho, certo de que a produção em massa poderá diminuir seu custo, mesmo não sendo uma alternativa de baixo valor. Todavia, a seleção para uma aplicação onde as propriedades específicas das espumas metálicas são realmente exploradas torna-se indispensável para sua utilização de forma viável financeiramente, nem que a longo prazo.



## 6 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMS, R. **Formula SAE race car analysis: Simulation & Testing of the engine as a structural member**. University of Western Ontario, Canadá, 2007.

Anfavea – Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. **50 anos da indústria automobilística no Brasil**, 2006.

ALVES, F. A. **Elementos Finitos, a base da Tecnologia CAE**. São Paulo, SP: Érica, 2000.

ALVES, F. A. **CAE – Entenda o método de análise por elementos finitos**. CAD Design, nº 118, Ibéria Editora, 2007.

ARBOR, A. **Driving Design**. Discovery Chanel, - EUA, 2003.

ASHBY, M. F. **Materials Selection in Mechanical Design**. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2nd ed, 1999.

ASHBY, Michael F. **Metal Foams: A Design Guide**. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000.

AYMONE, J. L. F.; TEIXEIRA, F. G. **Autocad 3D: Modelamento e Rendering**. Artliber Editora, São Paulo, SP, 2001.

AYMONE, J. L. F.; TEIXEIRA, F. G. **Animation of engineering process using virtual reality (VRML)**. VID – Virtual Design – UFRGS. SAE – Society of Automotive Engineers, 2007.

BABCSÁN, N., BANHART, J., and LEITLMEIER, D. **Metal Foams – Manufacture and Physics of Foaming**. Hahn-Meitner Institute, Berlin, Germany - ARC Leichtmetallkompetenzzentrum Ranshofen GmbH, Austria.

BANHART, J. **Deformation characteristics of metal foams**. Journal of Materials Science 33, Bremen, Alemanha, 1998.

BANHART, J. **Metal foaming by a powder metallurgy method: Production, properties and applications**. Fraunhofer Institute For Applied Materials Research, Bremen, Alemanha, 1998.

BANHART, J. **Manufacturing Routes for Metallic Foams**. Solidification Science ed, Bremen, Alemanha, 2000.

BANHART, J. **Manufacture, Characterization and Application of Cellular Metals and Metal Foams**. Fraunhofer-Institute for Manufacturing and Advanced Materials, Progress in Materials Science 46, Bremen, Alemanha, 2001.

BANHART, J. **On the road: metal foams find favor**. Physics Today, Bremen, Alemanha, 2002.

BANHART, J. **Aluminium foams for lighter vehicles**. Vehicle Design, vol. 37, Bremen, Alemanha, 2005.

BANHART, J. **Metal Foam – from fundamental Research to applications**. Solidification Science, Bremen, Alemanha, 2007.

- BERTOCCHI, M. **Segurança Veicular**. Skill Ed., Curitiba, Paraná, 2005.
- BONSIEPE, G. **Teoria e Prática do Design Industrial**, Centro Português de Design, 192.
- BONSIEPE, G. **Del Objeto a la Interfase**, Ediciones Infinito, Buenos Aires, 1999.
- BOTELHO, R. D., CÂMARA, J. J. D., GALANTE, H. A. **Design Automotivo e Ergonomia Veicular Aplicada a um Veículo de Competição Hiper- Econômico**. I Congresso Internacional de Pesquisa em Design - Brasil / V P&D Design - Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design, 2002, Brasília. Rio de Janeiro, 2002.
- BOTELHO, R. D., **Eco-Design e Seleção de Materiais como Ferramentas para o Transportation Design – Estudo de Processos**. Dissertação de Mestrado. REDEMAT – Rede Temática em Engenharia de Materiais, Minas Gerais, 2003.
- BOTELHO, R. D., CÂMARA, J. J. D., **Relatório: A Evolução dos Projetos Sabia** REDEMAT – Rede Temática em Engenharia de Materiais, Minas Gerais, 2008.
- CÂMARA, J. J. D.; RIBEIRO, T. M.; OLIVEIRA, L. G. R.; COSTA, R. O. O. E.; MATOS, C. C. **Sabiá: evolução e técnica**. In: P&E, 2005, Diamantina. P&E Anais do VII Seminário de Pesquisa e Extensão da UEMG, 2005.
- CÂMARA, J. J. D.; SCHIAVINI, R.; BOTELHO, R. D. **Design Automotivo, entre o desejo e a influência mundial**. ABC Design, v. 18, p. 21-22, 2006.
- CÂMARA, J. J. D. **Evolução do projeto Sabiá**. Disponível em: <jairo.camara@uemg.br>. Acesso em: 27 de setembro de 2008.
- COLE, G. S.; SHERMAN, A. M. **Lightweight Materials for Automotive Applications**. Ford Motor Company, Elsevier Science, Nova York, NY, 1995.
- CONDOTTA, A. S. **Melhoria do Processo de Desenvolvimento de Produto em uma Empresa do Setor Automotivo**. Mestrado Profissionalizante em Engenharia – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 2004.
- DENIS, R. C. **Uma Introdução à história do Design**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2000.
- DOLABELA, Fernando. **O segredo de Luísa: uma idéia, uma paixão e um plano de negócios: como nasce o empreendedor e se cria uma empresa**. São Paulo: Cultura Editores Associados, 1999.
- FARIA, E., LOUZEIRO, R. **História dos transportes terrestres no mundo**. Rio de Janeiro: 2003.
- FERREIRA, H.T. **Determinação das frequências naturais e modos de vibrar de um veículo de dois eixos através de um programa computacional em MatLab-Simulink**. Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, 2003.
- FONSECA, A. J., ARRUDA, A. C. F. **Espumas e Esponjas de Alumínio em Aplicações Automotivas**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 2008.

GOMES, J., **Ergonomia do objeto: Sistema Técnico de Leitura Ergonômica**. São Paulo: Escrituras Editora, 2003.

GONÇALVES, A., FERREIRA, N. **Inversão interna de tubos em alumínio – aplicação num chassis automóvel**. Instituto Superior Técnico – Mestrado em Engenharia da Conceção – Tecnologia Mecânica, 2005.

JORGE, A. F., ARRUDA, A. C. F. **Espumas e Esponjas de alumínio em aplicações automotivas**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2008.

LARICA, N. J. **Design de transportes – Arte em função da mobilidade**. Rio de Janeiro: 2ab ed, 2003.

LÖBACH, B. **Design Industrial: Bases para a configuração dos Produtos Industriais**. São Paulo: Edgar Blücher Ltda, 2001.

LJUNGBERG, L.Y. **Materials selection and design for development of sustainable products**. Materials & Design, Volume 28, 2007.

MALFANTI, I. S. **Introducción Práctica a la Realidad Virtual**. Ediciones U. Bío-Bío, Concepción, 2001.

MARQUES, A.C. **Análise de Similares: Desenvolvimento de uma Metodologia de Seleção de Materiais e Ecodesign**. Tese (Mestrado em Engenharia de Materiais) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais-PPGEM, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2008.

MEDINA, H.V.; NAVEIRO, R. **A gestão integrada de projeto de veículos automotivos: o caso da introdução de novos materiais na Renault**. Produto e Produção, vol. 4, n.3, 2000.

MODERNELL, R. **Cinco mil anos de loucuras no trânsito**. Revista Quatro Rodas, p.44-49. São Paulo: 1989.

MOREIRA, M. E. **CAE – Menos erros de projetos e mais lucro**. CAD Design, nº 118, Ibéria Editora, 2007.

NEVILLE, B.P. **Composite metal foams processed through powder metallurgy**.

Department of Mechanical and Aerospace Engineering, North Carolina State

University, Raleigh, USA, 2007.

OLIVEIRA, B. F.; CUNDA, L. A. B.; ÖCHSNER, A., CREUS, G. J. **Comparison between RVE and Full Mesh Approaches for the Simulation of Compression Tests on Cellular Metals**. In: ACE-X - 2007 Advanced Computational Engineering and Experimenting, Algarve 2007.

OLIVEIRA, B. F.; CUNDA, L. A. B.; ÖCHSNER, A.; CREUS, G. J. **Finite Element Simulation of Compression Tests on Cellular Metals**. Congresso Ibero Latino-Americano sobre Métodos Computacionais em Engenharia, 2007, Porto. Proceedings of the CMNE 2007 – Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia / XXXVIII CILAMCE – Congresso Ibero Latino-Americano sobre Métodos Computacionais em Engenharia, 2007.

OCHSNER, A. **On the uniaxial compression behavior of regular shaped cellular metals.** Mechanics Research Communications 30, Erlangen, Alemanha, 2003.

PIEMONT, R. **Shape Mission – Car Design in Turin and Piemont.** Margarf ed., São Paulo, 2004.

RIBEIRO, T.M.; OLIVEIRA, W. A.; CAMARA, J. J. D. **Análise Ergonômica do interior de automóveis através da ótica de Design.** In: P&E -Seminário de Pesquisa e Extensão, 2006, Campanha. P&E Anais do VIII Seminário de Pesquisa e Extensão da UEMG, 2006.

RICARDO, L. C. H. **CAE – tecnologia ajuda montadoras a aumentar segurança de automóveis.** CAD Design, nº 118, Ibéria Editora, 2007.

ROZENFELD, H. **Reflexões sobre a Manufatura Integrada por computador (CIM). Manufatura classe mundial: mitos e realidade.** 1996, São Paulo.

SIMULIA, DASSAULT SYSTEMES. **ABAQUS/CAE Version 6.5 User's Guide,** Providence, RI, USA, 2006.

SOUZA, A. F. **Tecnologia CAD/CAM - Definições e estado da arte visando auxiliar sua implantação em um ambiente fabril.** XXIII Encontro Nac. de Eng. de Produção - Ouro Preto, MG, 2003.

SOUZA, H. J. **Análise Estrutural do veículo terrestre Mini Baja utilizando o Método dos Elementos Finitos.** Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade Estadual do Maranhão – UEMA, São Luis, MA, 2006.

ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. Desenvolvida por Associação Brasileira do Alumínio. Apresenta informações Gerais sobre o mercado do Alumínio no mundo e no Brasil, extração, aplicações, impacto.<<http://www.abal.org.br/desenvsust/introducao.asp>> Acesso em 11 de outubro de 2008.

AGÊNCIA ESPACIAL EUROPÉIA. Desenvolvida pela Agência Espacial Euripéia. Apresenta Informações e Imagens sobre Espumas Metálicas e su comportamento. <<http://esamultimedia.esa.int/docs/issedukit/pt/html/t040605r2.html>> Acesso em 10 outubro de 2008.

Anfavea – Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. Desenvolvida pela Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. Apresenta informações Gerais sobre a produção do setor automobilístico no Brasil. <<http://www.anfavea.com.br/anuario2008/indice.pdf>> Acesso em 08 de novembro de 2008.

ALUSION METAL FOAMS. Desenvolvida por ALUSION. Apresenta informações técnicas, comerciais e sobre aplicações de Espumas Metálicas. <<http://www.alusion.com/product.html>> Acesso em 05 de outubro de 2008.

CYMAT METAL FOAMS. Desenvolvida por CYMAT. Apresenta informações técnicas, e comerciais sobre Espumas Metálicas. <<http://www.cymat.com/automotive.html>> Acesso em 05 de outubro de 2008.

COMBINO. Desenvolvido por Siemens. Apresenta informações e imagens sobre o sistema veicular COMBINO na Alemanha. <<http://www.transportation.siemens.com>> Acesso em 09 de novembro de 2008.

DAVE CURRAN METAL FOAMS. Desenvolvida por CURRAN, Dave. 2001. Apresenta informações sobre artigos e reportagens sobre Espumas Metálicas. <<http://www.msm.cam.ac.uk/mmc/people/old/dave/dave.html>> Acesso em 11 de março de 2008.

ERGAEROSPACE. Desenvolvida por ERGAEROSPACE. Apresenta informações técnicas e comerciais sobre Espumas Metálicas. <<http://www.ergaerospace.com/FAQ.htm#rawprice>> Acesso em 10 de janeiro de 2009.

EURONCAP. Desenvolvida por EURONCAP - European New Car Assessment Programme. Apresenta informações técnicas e legais sobre *crash test*. <<http://www.crash-network.com/Regulations/FMVSS/fmvss.html>> Acesso em 01 de janeiro de 2009.

M-PORE METAL FOAMS. Desenvolvida por M-PORE. Apresenta informações técnicas, comerciais e sobre aplicações de Espumas Metálicas. <[http://www.m-pore.de/english/e\\_index.html](http://www.m-pore.de/english/e_index.html)> Acesso em 05 de outubro de 2008.

METALFOAM.NET. Desenvolvido por MetalFoam.net. Apresenta Informações gerais sobre Espumas Metálicas, entre elas comerciais. <<http://www.metalfoam.net/commercial.html>> Acesso em 05/10/08.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO. Desenvolvido por Aloísio N. Klein para o Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Apresenta Informações Gerais sobre Novos Materiais. <[http://www2.desenvolvimento.gov.br/arquivo/sti/publicacoes/futAmaDilOportunidades/rev20011219\\_03.pdf](http://www2.desenvolvimento.gov.br/arquivo/sti/publicacoes/futAmaDilOportunidades/rev20011219_03.pdf)> Acesso em julho de 2008.

SCIENCEDAILY. Desenvolvida por Bublies, A. – Instituto Fraunhofer/ IFAM. Apresenta informações sobre aplicação da espuma metálica em implantes ósseos. <<http://www.sciencedaily.com/releases/2008/07/080708101129.htm>> Acesso em 15 de agosto de 2008.

TAC. Desenvolvida por TAC Motors (Tecnologia Automotiva Catarinense). Apresenta informações gerais sobre a empresa e sobre o veículo Stark. <[http://www.tacmotors.com.br/apresentacao\\_br14.html](http://www.tacmotors.com.br/apresentacao_br14.html)> Acesso em 20 de dezembro de 2008.

UNIVERSIA. Desenvolvida por UNIVERSIA. Apresenta informações gerais sobre a ShellEco-Marathon. <[http://www.universia.es/html\\_trad/portada/actualidad/noticia\\_actualidad\\_trad/params/anyo/2008/mes/Mayo/noticia/jggfa.html](http://www.universia.es/html_trad/portada/actualidad/noticia_actualidad_trad/params/anyo/2008/mes/Mayo/noticia/jggfa.html)> Acesso em 22 de dezembro de 2008.

WIKIPEDIA. Desenvolvida por WIKIPEDIA. Apresenta informações gerais sobre Design. <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Design>> Acesso em 10 de agosto de 2008.

WIKIPEDIA. Desenvolvida por WIKIPEDIA. Apresenta informações gerais sobre Design. <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Chassi>> Acesso em 08 de novembro de 2008.

## 7 ANEXOS

### Anexo 01: Lista de Fornecedores de Espumas Metálicas no Mundo

Fonte: <http://www.metalfoam.net/commercial.html>, acesso em 05/10/08.

Alulight (Austria): Aluminium foams (powder route).

Alusion (Canada): Provide aluminium foam products to the architectural and design industries (division of Cymat corporation).

Chand Eisenmann Metallurgical (USA): Porous sintered materials.

Cymat (Canada): Aluminium foams (liquid metal route).

Dunlop Equipment (England): Metal foam material.

ERG Materials and Aerospace Corporation (USA): Cast metal sponges with open cells.

Fraunhofer Institute (Germany): Aluminium foams by powder-metallurgy.

Gleich GmbH (Germany): European dealer for *Alporas* aluminium foams.

Hütte Klein-Reichenbach Ges.m.b.H (Austria): *Metcomb* aluminium foam (liquid metal route). Contact: Herbert Flankl

Inco (Canada): Nickel metal sponges with open cells.

IWE Greifswald: Aluminium foams (powder route).

Korea metal foam (Korea): Cast metal sponges with open cells.

Metafoam Technologies (Canada): Development and commercialization of open-cell metal foam.

Mitsubishi Materials (Japan): Supplier of open cell metal foams.

M-Pore (Germany): Cast metal sponges with open cells.

Porvair Advanced Materials (USA): Reticulated metal structures (Cu, Ni, Ti, Fe, Pt, Ag + many alloys).

RECEMAT Internationals (Netherlands): Supplier of open cell metal foams of Nickel and Nickel alloys. Sheets and products.

Research Center for Aluminum Foam (China): Research oriented aluminium foam company (liquid metal route).

Shinko Wire Company Ltd. (Japan): Aluminium foam, trade name ALPORAS (liquid metal route) (in Japanese, only a pdf file is available in english).

Spectra-Mat (USA): tungsten and molybdenum open cell sponge components. Contact: Bob Cronk

Solea (France): Porous metals and porous metallic surfaces (>more). Contact: Christophe Desnoyer

Ultramet (USA): Refractory ceramic and metal metal sponges with open cells.

#### Users of cellular materials / suppliers of foam components

Al Carbon, Bremen (Germany): Composites Al foam + CFRP [web site in German]

Karmann GmbH, Osnabrück (Germany): Aluminum Foam Sandwich (AFS) (use search tool and look for "AFS")