DANIEL MÜLLER SPINELLI

METODOLOGIA ENXUTA PARA DESENVOLVIMENTO DE
COMPONENTES ESTRUTURAIS, SUPORTADA POR
FERRAMENTAS DE PROJETO, PROCESSO DE MANUFATURA
E ENSAIOS DE MATERIAIS.

Tese apresentada à Escola de Engenharia de
São Carlos, da Universidade de São Paulo,
como parte dos requisitos para a obtenção do
título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Materiais

ORIENTADOR : Prof. Dr. Waldek Wladimir
Bose Filho

São Carlos
2012

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

S757m Spinelli, Daniel Müller
Metodologia enxuta para desenvolvimento de componentes
estruturais, suportada por ferramentas de projeto,
processo de manufatura e ensaios de materiais. / Daniel
Müller Spinelli ; orientador Waldek Wladimir Bose Filho.
-- São Carlos, 2012.

Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica e Área de Concentração Materiais)--
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São
Paulo, 2012.

1. Desenvolvimento de produtos. 2. Ferramentas de
engenharia. 3. Confiabilidade. 4. Análise de sinais. 5.
Fadiga de materiais. 6. Ensaios acelerados. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **DANIEL MÜLLER SPINELLI**

Título da tese: Metodologia enxuta para desenvolvimento de componentes estruturais, suportada por ferramentas de projeto, processo de manufatura e seleção do material.

Data da defesa: 05/10/2012

Comissão Julgadora:

Prof. Titular **Waldek Wladimir Bose Filho** - (Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Associado **Antonio Carlos Canale**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **Rodrigo Bresciani Canto**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Prof. Dr. **Ruis Camargo Tokimatsu**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP-Ilha Solteira)

Prof. Dr. **José Alexander Araujo**
(Universidade de Brasília)

Resultado:

APROVADO

APROVADO

APROVADO

APROVADO

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica:
Prof. Associado **Marcelo Areias Trindade**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

Aos meus pais Dirceu e Isa, pelo amor, incentivo e suporte para mais este desafio; a minha querida esposa Marcelle, pelo amor, dedicação e compreensão; aos meus amados filhos Gahbriel e Murilo pela alegria de existirem e a DEUS.

AGRADECIMENTOS

Meu maior agradecimento aos Professores Dr. Waldek Wladimir Bose Filho e Dr. Dirceu Spinelli, também pai, pela orientação e confiança durante anos de trabalho;

Aos Diretores de desenvolvimento da Mercedes-Benz do Brasil Sr. Bernd Voigt e Sr. Christian Flecksteiner, aos Gerentes Seniors de Desenvolvimento Srs. Sergio Simões, Paschoal Federico Neto e Marcos Argentino pela oportunidade de desenvolver este trabalho em conjunto com projetos concorrentes nas áreas.

Aos amigos e companheiros de trabalho da Mercedes-Benz do Brasil, Jose Roberto Saraiva, Roberto Sotelo, Nicolas Basile Valtas, Udo Ricardo Wildmann, Dirk Ulott pelas valiosas contribuições, informações e discussões técnicas realizadas ao longo de todo o trabalho,

Ao atual Trainee da Mercedes-Benz e aluno de Mestrado da USP Caio Scozzafave pelo suporte e cooperação prestados ao longo da fase final deste trabalho;

A mãe e Prof. Dr. Isa Maria Müller Spinelli, pelas valiosas correções realizadas neste trabalho;

Aos colegas e parceiros da Delga Piratininga Srs. Clovis, Diego Paris, José Paulo, pelo acesso a informações e cessão dos materiais para a confecção dos corpos de prova utilizados neste estudo para as distintas fases do processo de manufatura;

A todos os colegas, funcionários e profissionais do Departamento de Engenharia de Materiais - USP, Aeronáutica e Automobilística da Escola de Engenharia de São Carlos – USP e da Mercedes-Benz do Brasil que contribuíram diretamente e indiretamente para realização deste trabalho

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	19
MOTIVAÇÃO	19
OBJETIVOS	20
ESCOPO PRELIMINAR DO PROJETO	21
ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	22
CAPÍTULO 1 – PLANEJAMENTO DO PROJETO	27
1.1 REFERÊNCIAS PARA MODELOS DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS	27
1.2 GESTÃO DOS RISCOS E CONFIABILIDADE	32
1.3 PROCEDIMENTO PARA ELABORAÇÃO DO PLANO DO PROJETO	34
1.3.1 <i>Divisão de fases propostas para o projeto</i>	35
1.3.2 <i>Organização do projeto</i>	36
1.3.3 <i>Escopo detalhado do projeto e responsabilidades</i>	36
1.4 RESULTADOS DO PLANEJAMENTO NOS DIFERENTES CENÁRIOS	38
1.5 CONCLUSÕES	42
1.6 REFERÊNCIAS	43
CAPÍTULO 2 – QG5: FASE DE CONCEPÇÃO	45
2.1. FERRAMENTAS APLICADAS NA CONCEPÇÃO	45
2.1.1 <i>Especificação de um projeto</i>	45
2.1.2 <i>Definindo a arquitetura e concepção do sistema</i>	47
2.1.3 <i>Arquitetura do subsistema e sua árvore funcional</i>	48
2.1.4 <i>Premissas DFM</i>	48
2.2. FERRAMENTAS DE CONFIABILIDADE NA CONCEPÇÃO	49
2.2.1 <i>Árvore de falhas</i>	50
2.2.2 <i>Ferramentas CAD como apoio à confiabilidade</i>	51
2.2.3 <i>CAE na fase de concepção</i>	52
2.2.3.1 Método de Multicorpos (MBS) para análise dinâmica de mecanismos	52
2.2.3.2 Método dos Elementos Finitos para avaliação estrutural	53
2.2.4 <i>Testes do conceito</i>	54
2.3 SELEÇÃO DOS CONCEITOS	54
2.4 PROCEDIMENTO E RESULTADOS PARA A SELEÇÃO DA SUSPENSÃO	55
2.4.1 <i>Definição da arquitetura para o projeto da suspensão</i>	55
2.4.2 <i>Definição da árvore funcional do sistema de suspensão</i>	57
2.4.3 <i>Definição da modularidade para o sistema suspensão</i>	58
2.4.4 <i>Firmando as variantes para o sistema suspensão</i>	59
2.4.5 <i>Árvore de falha para o sistema</i>	60
2.4.6 <i>Avaliações em CAD do sistema de suspensão</i>	62
2.4.7 <i>Avaliações MBS do sistema de suspensão</i>	63
2.4.8 <i>Avaliações MEF da viga de sustentação para sistema de suspensão</i>	65
2.4.9 <i>Testes conceituais para os tipos de suspensão (posição do batente)</i>	68
2.4.10 <i>Consideração de fatores econômicos no processo de seleção</i>	69
2.4.11 <i>Conclusão do processo de seleção</i>	70
2.5 CONCLUSÕES	71
2.6 REFERÊNCIAS	72
CAPÍTULO 3 – QG4: FASE DE PROJETO	73
3.1 CICLO DE DETALHAMENTO	75
3.1.1 <i>DFMEA como ferramenta de confiabilidade na fase de projeto</i>	75
3.1.2 <i>Medições de deformações</i>	76
3.2 CICLO DE AQUISIÇÃO	78
3.3 CICLO DE OTIMIZAÇÃO	79
3.4 SELEÇÃO PRELIMINAR DO MATERIAL	80

3.5	APLICAÇÃO DAS FERRAMENTAS E RESULTADOS	81
3.5.1	<i>DFMEA para a viga da suspensão</i>	81
3.5.2	<i>Medições práticas nos sistemas atuais</i>	83
3.5.2.1	Determinação dos pontos de medição	83
3.5.2.2	Procedimento adotado para as medições	84
3.5.2.3	Resultado das medições	86
3.5.3	<i>Projeto da nova viga de suspensão</i>	88
3.5.3.1	Ciclo de projeto e simulações	89
3.5.4	<i>Definição do Fornecedor</i>	92
3.5.5	<i>Conceito de manufatura</i>	93
3.5.6	<i>Propostas de otimização do produto referente ao processo</i>	97
3.5.7	<i>Seleção do material para a Viga Global</i>	98
3.6	CONCLUSÕES	99
3.7	REFERÊNCIAS	100
CAPÍTULO 4 – QG3: FASE DE PROTÓTIPO		102
4.1	DETALHAMENTO DO PROCESSO DE MANUFATURA	102
4.1.1	<i>Definição da temperatura de conformação</i>	102
4.1.2	<i>Projeto detalhado do processo de conformação</i>	103
4.2	ENSAIOS DOS MATERIAIS EM CORPOS DE PROVA	104
4.3	SELEÇÃO DO MATERIAL QUANTO AO DESEMPENHO ESTRUTURAL	105
4.3.1	<i>Propriedades monotônicas dos materiais (S_e, S_u, E, RA, Dureza)</i>	106
4.3.2	<i>Filosofia de projeto com foco na análise de durabilidade</i>	109
4.3.3	<i>Projeto e análise de fadiga com base na deformação</i>	113
4.3.4	<i>Propriedades cíclicas dos materiais</i>	114
4.3.4	<i>Propriedades cíclicas dos materiais</i>	118
4.4	FERRAMENTAL E PROTÓTIPOS DA VIGA GLOBAL	121
4.4.1	<i>Resultados do projeto da ferramenta</i>	121
4.4.2	<i>Fabricação do primeiro lote protótipo</i>	123
4.5	RESULTADOS DE ANÁLISE DOS MATERIAIS	125
4.5.1	<i>Composição química dos Materiais</i>	125
4.5.2	<i>Análise Metalográfica</i>	126
4.5.2.1	Metalografia do material da Viga Importada (aço St52)	126
4.5.2.2	Metalografia do material da Viga Nacional (aço E380TM)	128
4.5.2.3	Metalografia do material Viga Global (aço LNE 700)	129
4.5.3	<i>Ensaio de Dureza</i>	131
4.5.4	<i>Propriedades mecânicas de tração</i>	132
4.5.5	<i>Propriedades de fadiga dos materiais</i>	134
4.5.6	<i>Análise Fractográfica dos materiais após ensaios</i>	139
4.5.6.1	Análise do material da Viga Importada (aço St52)	140
4.5.6.2	Análise do material da Viga Nacional	144
4.5.6.3	Análise do material da Viga Global	147
4.6	CONCLUSÕES	150
4.7	REFERÊNCIAS	152
CAPÍTULO 5 – QG2: FASE EXPERIMENTAL		155
5.1	PROPOSTA PARA UM PROCESSO DE HOMOLOGAÇÃO DA VIGA GLOBAL	155
5.1.1	<i>Análise estatística das medições estruturais</i>	156
5.1.2	<i>Análise Rainflow</i>	157
5.1.3	<i>Efeito da tensão média</i>	158
5.1.4	<i>Acúmulo do dano para sinais complexos</i>	160
5.1.5	<i>Fadiga biaxial</i>	161
5.1.6	<i>Carregamentos proporcionais</i>	163
5.1.7	<i>Critério das deformações principais para fadiga bi-axial</i>	164
5.1.8	<i>Critério da tensão máxima de cisalhamento para fadiga bi-axial</i>	165
5.1.9	<i>Critério de deformação combinado de Brown-Miller para fadiga bi-axial</i>	165
5.1.10	<i>Critério de deformação equivalente de Von Mises para fadiga bi-axial</i>	165

5.1.11	<i>Análise por meio dos planos críticos para fadiga bi-axial</i>	166
5.1.12	<i>Ensaio acelerado de durabilidade</i>	167
5.1.13	<i>Determinação de um sinal equivalente da história de deformação</i>	168
5.1.14	<i>Análise de Weibull para confiabilidade em ensaios</i>	169
5.2	ANÁLISE ESTRUTURAL RESULTANTE DAS MEDIÇÕES DE DEFORMAÇÃO	170
5.2.1	<i>Análise do sinal</i>	171
5.2.2	<i>Análise de proporcionalidade das medições</i>	173
5.2.3	<i>Análise pontos críticos com base método S-N</i>	175
5.2.3.1	Resultados do dano S-N para a Viga Nacional	177
5.2.3.2	Resultados dano S-N para a Viga Importada	179
5.2.3.3	Resultados dano S-N para a Viga Global	181
5.2.4	<i>Análise do dano considerando fadiga por deformação localizada ($\epsilon - N$)</i>	182
5.2.4.1	Resultados dano ϵ -N para a Viga Nacional	184
5.2.4.2	Resultados dano ϵ -N para a Viga Importada	185
5.2.4.3	Resultados dano ϵ -N para a Viga Global	186
5.2.5	<i>Análise do desempenho das vigas considerando os resultados S-N e ϵ-N</i>	186
5.3	DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA DE TESTES NO MATERIAL	189
5.3.1	<i>Obtenção do sinal equivalente ao dano no estado biaxial de tensão</i>	191
5.3.2	<i>Teste e resultados de durabilidade em corpos de provas</i>	193
5.3.3	<i>Avaliação de troca dos materiais</i>	198
5.4	CONCLUSÕES	200
5.5	REFERÊNCIAS	202
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES FINAIS		205
A1.1	VIGA NACIONAL	208
A1.2	VIGA IMPORTADA	209
A1.3	VIGA GLOBAL	210
ANEXO 2 – ROTINAS DE CÁLCULO E VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS		211
A2.1	FLUXOGRAMAS DO LABVIEW® PARA CÁLCULO DO DANO TENSÃO -VIDA	211
A2.2	VALIDAÇÃO DO FLUXOGRAMA: CÁLCULO DO DANO TENSÃO – VIDA	212
A2.3	ROTINA PARA CÁLCULO DO DANO DEFORMAÇÃO – VIDA	213
A2.4	ROTINA PARA CÁLCULO DO DANO DEFORMAÇÃO - VIDA	215
ANEXO 3 – PROCEDIMENTO DE ENSAIO DOS ESPÉCIMES		216

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Resumo do trabalho de Doutorado descrito nesta Tese.	26
Figura 1.1 – Modelo genérico para o Processo de Desenvolvimento de Produto (ROZENFELD, 2006), .	31
Figura 1.2 – Curva de falhas para componentes mecânicos (Dieter p. 538).....	33
Figura 1.3 – Integração da confiabilidade no processo de desenvolvimento (Dieter 1991)	34
Figura 1.4 – Divisão do desenvolvimento em fases.....	35
Figura 1.5 – Estrutura de projeto matricial aplicada ao projeto.....	36
Figura 1.6 – Cronograma com base na EAP – RACI para o método tradicional.....	39
Figura 1.7 – Cronograma com base na EAP – RACI destacando as entregas adicionais propostas.....	40
Figura 2.1 – Elementos para especificações (1904, apud DIETER, 1991)	46
Figura 2.2 – Processo de concepção segundo Pahl; Beitz (1988)	47
Figura 2.3 – Conceito de mapeamento da dimensão funcional para a dimensão física.	48
Figura 2.4 – Fluxograma de um cálculo MEF implícito (Spinelli, 2001)	54
Figura 2.5 – Arquitetura base para o sistema de suspensão em análise.	56
Figura 2.6 – Árvore funcional para o sistema de suspensão em estudo.	57
Figura 2.7 – Avaliação das medidas principais para que a sinergia seja garantida.	58
Figura 2.8 – Arquiteturas do sistema (1 e 2) para as montagens dos eixos contidos na legenda.	59
Figura 2.9 – Árvore de falhas para função de absorver vibrações.	61
Figura 2.10 – Árvore funcional para função de sustentar o eixo.....	61
Figura 2.11 – Situação de rolagem do veículo até atingir o batente da suspensão.	62
Figura 2.12 – Situação de movimentação vertical até os cilindros atingirem o batente da suspensão.....	63
Figura 2.13 – Veículo completo e modelos MBS para a suspensão dianteira e traseira.	64
Figura 2.14 – Resultados comparativos da dinâmica lateral para posição dos batentes.	64
Figura 2.15 – Considerações de projeto para análise MEF.....	65
Figura 2.16 – Modelo MEF e considerações de carga.	66
Figura 2.17 – Resultados MEF da Viga Importada (material St 52; $LE = 310N/mm^2$).....	66
Figura 2.18 – Resultados MEF da Viga Nacional (material E380TM; $LE = 320N/mm^2$).....	67
Figura 2.19 – Diferença de pesos das duas vigas de suspensão em análise.....	67
Figura 2.20 – Resultados práticos de avaliação de desempenho dinâmico da suspensão.	68
Figura 2.21 – Resultados comparativos de custo – com base de custo na Viga importada.	69
Figura 3.1 – Ciclos na fase de projeto segundo Rozenfeld (2000).	74
Figura 3.2 – Extensômetro arranjo tipo Roseta.....	77
Figura 3.3 – Propriedades do material e a relação entre estrutura e desempenho.	80
Figura 3.4 – Pontos críticos determinados em cálculo MEF para o posicionamento dos extensômetros .	83
Figura 3.5 – Posicionamento definitivo dos extensômetros para medições na Viga Importada.	84
Figura 3.6 – Posicionamento definitivo dos extensômetros para medições na Viga Nacional.....	85

Figura 3.7 – Premissas iniciais de projeto.....	89
Figura 3.8 – Projeto base da Viga Importada e resultado do projeto da Viga Global.....	90
Figura 3.9 – Resultados MEF em porcentagem do Limite de Escoamento do material E380TM para a Viga Nacional (a) e S460MC para Viga Global (b).	91
Figura 3.10 – Desenho detalhado da Viga Global.	92
Figura 3.11 – Conceito do processo considerando quatro operações na prensa hidráulica.	94
Figura 3.12 – Simulação do processo de estampagem para as duas metades (cortesia Empresa Delga) 94	
Figura 3.13 – Espessura resultante da simulação do processo (cortesia Empresa Delga).	95
Figura 3.14 – Processo confecção da Viga Global (cortesia Firma Delga).	96
Figura 3.15 – Solicitações de modificações devido às limitações do processo.....	97
Figura 4.1 – Esquema mostrando a posição da retirada dos corpos de prova utilizados nos ensaios mecânicos. a) na viga .b) formato dos corpos de prova.....	104
Figura 4.2 – Geometria e dimensões dos corpos de prova do material.	105
Figura 4.3 – Curva Tensão – Deformação para um mesmo material ensaiado a diferentes temperaturas.	106
Figura 4.4 – Principais parâmetros de resistência e ductilidade obtidos do ensaio de tração.	107
Figura 4.5 – Procedimento para ensaio de dureza tipo Rockwell – B.	108
Figura 4.6 – Quantidade de publicações sobre Fadiga no período de 1925 a 1945 (Schultz, 1996)	110
Figura 4.7 – Vida em fadiga baseada na reprodução das Tensões – Deformações localizadas.....	114
Figura 4.8 – Curva cíclica de tensão-deformação estabilizada (DRAPER, 2004).....	114
Figura 4.9 – Histereses monotônicas e cíclicas de Tensão – Deformação.	116
Figura 4.10 – (a) Gráfico de amplitude de deformação – amplitude de tensão (b) Gráfico de amplitude de tensão - n° reversos.....	116
Figura 4.11 – (a) Gráfico de amplitude de deformação – amplitude de tensão (b) Gráfico de amplitude de deformação - n° reversos.....	117
Figura 4.12 – Diagrama esquemático dos ensaios de fadiga controlado por deformação (LEE, 2005) ..	118
Figura 4.13 – Definições para determinação do σ_p , ISO 12106 / PrEN 3988 segundo KANDIL (1999).	120
Figura 4.14 – Ferramental de estampagem para as metades da Viga Global (cortesia Firma Delga). ...	122
Figura 4.15 – Estágios de fabricação dos primeiros componentes conformados a quente	123
Figura 4.16 – Dimensões dos corpos de prova para caracterização cíclica dos materiais.	124
Figura 4.17 – Microestrutura presente no aço St52.....	127
Figura 4.18 – Detalhe da microestrutura presente no aço St52.	127
Figura 4.19 – Microestrutura presente no aço E380TM.....	128
Figura 4.20 – Detalhe da microestrutura presente no aço E380TM.	129
Figura 4.21 – Microestrutura presente no aço da Viga Global.....	130
Figura 4.22 – Detalhe da microestrutura presente no aço LNE 700.....	130
Figura 4.23 – Curva Tensão – Deformação para aço E380TM aplicado na Viga Nacional.	132
Figura 4.24 – Curva Tensão – Deformação para aço St52 aplicado na Viga Importada.	133

Figura 4.25 – Curva Tensão – Deformação para aço LNE700 aplicado na Viga Global.	133
Figura 4.26 – Curvas deformação – vida para o aço E 380TM	135
Figura 4.27 – Curvas deformação – vida para o aço St52.....	136
Figura 4.28– Curvas deformação – vida para o aço LNE700.....	137
Figura 4.29 – Comparação das curvas tensão–vida obtidas experimentalmente para os aços das vigas.	138
Figura 4.30 – Macrofratografia da superfície de fratura do corpo de prova da Viga Importada.....	140
Figura 4.31 – Detalhe da figura 4.40, mostrando detalhe do sitio de inicio da trinca por fadiga.	141
Figura 4.32 – Microfratografia da superfície no estágio II para o material da Viga Importada. Mostrando estrias de fadiga.....	142
Figura 4.33 – Morfologia da superfície de fratura próxima à região de fratura final.	143
Figura 4.34 – Aspecto da morfologia da superfície de fratura que ocorre no Estágio III de propagação.	143
Figura 4.35 – Macrofratografia da superfície de fratura do corpo de prova da Viga Nacional	144
Figura 4.36 – Microfratografia da superfície no estágio I para o material da Viga Nacional	145
Figura 4.37 – Microfratografia da superfície no estagio II para o material da Viga Nacional	146
Figura 4.38 –: Microfratografia da superfície no final do estagio II para o material da Viga Nacional.....	146
Figura 4.39 – Microfratografia da superfície do estagio III para o material da Viga Nacional.	147
Figura 4.40 – Macrofratografia da superfície de fratura do corpo de prova da Viga Global.....	148
Figura 4.41 – Microfratografia da superfície no estagio I para o material da Viga Global.....	148
Figura 4.42 – Microfratografia na região de propagação do estágio II	149
Figura 4.43 – Microfratografia da superfície no final do estagio II para o material da Viga Global.	150
Figura 4.44 – Microfratografia da superfície do estagio III para o material da Viga Global.....	150
Figura 5.1 – Construção de ciclos de histerese pelo método de <i>Rainflow</i> [ASTM E1049 0 85 – R97].	158
Figura 5.2 – Modificação das curvas de fadiga devido à tensão média diferente de zero (Manson e Halford, 2006)	160
Figura 5.3 – Proposta de Macha para tratar o fenômeno multiaxial (Macha, 2011).....	162
Figura 5.4– Diagrama de Mohr para a deformação no estado plano de tensão.	163
Figura 5.5– Direções das deformações principais e de cisalhamento fora de fase.....	166
Figura 5.6 – Exemplo de dano nos diversos planos de tensão/ deformação.	167
Figura 5.7 – Edição do sinal com base no <i>Rainflow</i> do histograma e modelo SWT (Stephens,1997)	169
Figura 5.8: Diagrama sistematizado do procedimento de análise dos dados medidos em campo.....	170
Figura 5.9 - Estatística dos sinais ϵ_1 para a Viga Nacional.....	171
Figura 5.10 - Estatística dos sinais ϵ_1 para a Viga Importada.....	172
Figura 5.11 - História da deformação principal ϵ_1 e estatística dos sinais para Viga Global.	173
Figura 5.12 – Proporcionalidade do sinal ϵ_1 da Viga Nacional	174
Figura 5.13 – Proporcionalidade do sinal ϵ_1 da Viga Importada.....	174
Figura 5.14 – Proporcionalidade do sinal para medição da Viga Global	175
Figura 5.15 – Fluxograma da rotina para analise de dano no método S-N.	176

Figura 5.16 – Diagrama de blocos no LABVIEW® para cálculo do dano S-N.	177
Figura 5.17 – Resultados do dano para uma volta na pista de testes – Viga Nacional.	178
Figura 5.18 – Proporcionalidade dos sinais na Viga Nacional.	178
Figura 5.19 – Manipulação do sinal desconsiderando a plastificação como parte da entrada dos dados	179
Figura 5.20 – Resultados do dano para uma volta na pista de testes – Viga Importada.	180
Figura 5.21 – Proporcionalidade dos sinais na Viga Importada.	180
Figura 5.22 – Resultados do dano para uma volta na pista de testes – Viga Global.	181
Figura 5.23 – Proporcionalidade dos sinais na Viga Global.	182
Figura 5.24 – Fluxograma da rotina para análise de dano no método ϵ -N.	183
Figura 5.25 – Tela do programa ϵ -N e resultado do dano para a Viga Nacional.	185
Figura 5.26 – Tela do programa ϵ -N e resultado do dano para a Viga Importada.	185
Figura 5.27 – Tela do programa ϵ -N e resultado do dano para a Viga Global.	186
Figura 5.28 – Dados experimentais da falha da Viga Importada na pista padrão de homologação.	188
Figura 5.29 – Conceito do método para ensaio do material submetido ao carregamento de dano.	190
Figura 5.30 – Bloco de carregamento equivalente da Viga Nacional para o ponto R12.	192
Figura 5.31 – Bloco de carregamento equivalente da Viga Importada para o ponto R12.	192
Figura 5.32 – Bloco de carregamento equivalente da Viga Global para o ponto R1.	192
Figura 5.33 – Dimensões (mm) dos corpos de prova para os ensaios de durabilidade equivalentes	194
Figura 5.34 – Equipamento de ensaio durante o teste de um corpo de prova.	194
Figura 5.35 – Gráfico de Weibull para os resultados dos ensaios em laboratório.	197
Figura 5.36 – Fluxograma para análise do dano de determinado componente variando o material.	199
Figura A3.1 – Em (a) máquina de ensaio MTS LandMark , (b) detalhe do corpo de prova montado na garra hidráulica para o ensaio de AV.	216
Figura A3.2 – Arquivo em formato de texto .blk para o ensaio de nucleação de trinca.	218
Figura A3.4 – Detalhes das informações do cabeçalho do arquivo de texto.	218

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – EAP–RACI (Responsável – Aprova – Colabora – Informado) para a metodologia proposta.....	37
Tabela 1.2 – Comparativo de investimento em um desenvolvimento de uma viga de suspensão.....	41
Tabela 2.1 – Premissas DFM (DIETER, 1991).....	49
Tabela 2.2 – Especificações para suspensão de veículo comercial para o projeto de pesquisa.	56
Tabela 2.3 – Seleção da proposta de viga de suspensão para o conceito.....	70
Tabela 3.1 – Formas de reduzir os ciclos de projeto (COOPER, 2000)	73
Tabela 3.2 – Matriz de riscos Severidade x Probabilidade para aplicação DFMEA	81
Tabela 3.3 – Matriz DFMEA para a viga de suspensão	82
Tabela 3.4 – Arquiteturas consideradas na medição das vigas.	85
Tabela 3.5 – Propriedades estáticas dos materiais dos componentes.....	86
Tabela 3.6 – Resultados de Tensões Von Misses [MPa] para a Viga Importada.....	87
Tabela 3.7 – Resultados de Tensões Von Misses [MPa] para a Viga Nacional	87
Tabela 3.8 – Propriedades dos materiais empregados na análise MEF para comparativo de tensões.	91
Tabela 3.9 – Retorno dos fornecedores.	93
Tabela 3.10 – Limites de Escoamento para materiais submetidos a 800oC de aquecimento.....	98
Tabela 4.1 – Métodos para determinação da deformação plástica nas curvas de histereses.....	119
Tabela 4.2 – Tipos de testes de acordo com a porcentagem de replicação (ASTM E739-10).....	121
Tabela 4.3 – Variação da temperatura do componente durante as etapas do processo de conformação.	124
Tabela 4.4 – Composição química dos aços (% em peso).....	125
Tabela 4.5 – Tamanho de grão ferrítico no sentido longitudinal para aço Viga Importada.	127
Tabela 4.6 – Tamanho de grão ferrítico no sentido longitudinal.	129
Tabela 4.7 – Tamanho de grão ferrítico no sentido longitudinal.	131
Tabela 4.8 – Media da dureza levantada para os materiais das vigas existentes.....	131
Tabela 4.9 – Comparação das propriedades mecânicas para os aços	134
Tabela 4.10 – Resultados dos ensaios de fadiga de baixo ciclo para o aço E 380TM.....	134
Tabela 4.11 – Resultados dos ensaios de fadiga de baixo ciclo para o aço St52	135
Tabela 4.12 – Resultados dos ensaios de fadiga de baixo ciclo para o aço LNE700.....	136
Tabela 4.13 – Parâmetros de fadiga de baixo ciclo dos aços E 380TM, St52 e LNE700.....	137
Tabela 4.14 – Diferentes níveis de amplitude para os ensaios nos três materiais	139
Tabela 4.15 – Avaliação da replicação para os ensaios dos materiais	139
Tabela 5.1 – Quantidade de voltas previstas no trecho padrão segundo cálculos de dano por S-N e ϵ - N	187
Tabela 5.2 – Resultados dos ensaios para as amostras da Viga Nacional (material E380TM)	195
Tabela 5.3 – Resultados dos ensaios para as amostras da Viga Importada (material St52)	195
Tabela 5.4 – Resultados dos ensaios para as amostras da Viga Global (material LNE700).....	195
Tabela 5.5 – Curvas de Weibull para os ensaios em laboratório pelo método do Rank Médio.....	196
Tabela 5.6 – Parâmetros de Weibull para os resultados dos ensaios em laboratório	197
Tabela 5.7 – Quantidade de voltas previstas no trecho padrão segundo cálculos de dano por ϵ - N.....	199
Tabela A3.1. Formato dos sinais fornecidos para os ensaios em amplitude variável.....	217

LISTA DE SIMBLOS E ABREVIATURAS

ε – Deformação

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – Deformações principais

ε_{eq} – Deformação equivalente Von Mises

ε'_f – Coeficiente ductilidade a fadiga

ε_N – Deformação normal ao plano principal

$\Delta\varepsilon/2$ – Amplitude de deformação

$\Delta\varepsilon_t$ – Variação da deformação total

$\Delta\varepsilon_e$ – Variação da deformação no regime elástico

$\Delta\varepsilon_p$ – Variação da deformação no regime plástico

c – Expoente de ductilidade à fadiga

γ – Componente de cisalhamento

γ_{max} – Cisalhamento máximo

Φ – Ângulo principal de cisalhamento

σ – Tensão

σ_1, σ_2 – Tensão

σ_{eq} – Tensão equivalente Von Mises

σ'_f – Coeficiente de resistência à fadiga

σ_N – Tensão hidrostática

$\sigma_{max}, \sigma_{min}$ – Tensões máximas e mínima

σ_m – Tensão média

$\Delta\sigma/2$ – Amplitude de tensão

b – Expoente de resistência à fadiga

E – Módulo de elasticidade

S_e – Tensão de resistência ao escoamento

S_u – Limite de ruptura a tração

Al – Alongamento

RA – redução de área

K – Coeficiente de resistência

n – Expoente de encruamento

K' – Coeficiente de resistência cíclico

n' – Expoente de encruamento cíclico

μ – coeficiente de Poisson

F_1 – Força na direção principal

$N_f, 2N_f$ – Ciclos para falha, Reversos para falha

N_i – Número de ciclos para valhar em uma determinada amplitude de tensão ou deformação

N_i – Número de ciclos contados em uma determinada amplitude de tensão ou deformação

β – Coeficiente de Weibull

η – Expoente de Weibull

B_{10} – Vida para probabilidade de 10% de falha em um universo de amostras

T_m – Temperatura de fusão

R – Replicação das amostras

N_D – Número de níveis de deformação

N_A – Número de amostras

EAP – Estrutura analítica do projeto

QG – *Quality Gates* (Marco para medição da qualidade da fase do projeto)

FR – Requerimentos da função

PR – Requerimentos de projeto

DFM – *Design for Manufacturing* (Projeto focado na manufatura)

FTA – *Fault Tree Analysis* (Árvore de falhas)

CAD – *Computer Aided Design* (Ferramenta computacional de auxílio ao projeto)

CAE – *Computer Aided Engineering* (Ferramenta computacional de auxílio à engenharia)

MBS – *Multibody System* (Análise de multicorpos)

MEF – Método dos Elementos Finitos

G – Aceleração da gravidade ($9,8 \text{ m/s}^2$)

LE – Limite estático de desempenho

SSC – Sistemas, Subsistemas e Componentes

DFMEA – *Design Failure Mode Engineering Analysis* (Análise dos modos de falha no projeto)

$S - N$ – Teoria de fadiga aplicada às tensões

$\epsilon - N$ – Teoria da fadiga local aplicada às deformações

SWT – Correção tensão média pelo método de Smith-Watson-Topper

VBA – Programação em Visual Basic

PUBLICAÇÕES RELEVANTES

SPINELLI, D. Vehicle Suspension Beam Reliability Analysis, In: **Congresso SAE Internacional 2010**, publicado em meios eletrônicos (CD-ROM), p.1/11, v.1, São Paulo-SP, Brasil, 2010.

SPINELLI, D. M.; COSTA, A. Virtual Engineering Tools application and planning in a vehicle development context, In: **XVIII Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva SIMEA 2010**, publicado em meios eletrônicos (CD-ROM), p. 1/15, v.1, São Paulo-SP, Brasil, 2010.

RESUMO

SPINELLI, D. M. **Metodologia enxuta para desenvolvimento de componentes estruturais, suportada por ferramentas de projeto, processo de manufatura e ensaios de materiais**. São Carlos: Tese de Doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2012.

Diversas propostas para o desenvolvimento de novos produtos vêm sendo elaboradas com o objetivo de acelerar a homologação final e permitir o lançamento com a confiabilidade necessária para minimizar danos à sociedade e à empresa. Este trabalho explora de forma objetiva o contexto de projeto para um componente estrutural de suspensão, de elevado nível de segurança, propondo uma metodologia para sistematização de planejamento enxuto das fases, considerando as atividades técnicas que geram valor ao processo, aplicando as ferramentas disponíveis de engenharia desde a definição de uma arquitetura ótima, e a partir desta, realizar o detalhamento nas fases de projeto, protótipo e testes finais. O objetivo principal foi liberar a confecção de um ferramental definitivo de forma antecipada ao desenvolvimento tradicional, e, portanto foram avaliados os resultados fundamentais que podem ser entregues, por meio de modelagem, simulação e ensaios experimentais, de cunho tecnológico, manufatura e econômico, para servirem de informações em uma tomada de decisão que envolve grande quantia monetária. Adicionalmente, uma proposta de homologação da integridade estrutural para um novo produto foi explorada por meio da seleção de materiais, influência do processo de fabricação nas propriedades mecânicas, caracterização do novo material e ensaios de fadiga em amostras do componente submetidos aos carregamentos medidos em condições de serviço. Os resultados foram validados com dados de falhas em componente similar validado, e assim, a confiabilidade para o novo produto pôde ser verificada e aprovada dispensando testes adicionais em trechos de durabilidade.

Palavras-chave: Desenvolvimento de produtos, ferramentas de engenharia, confiabilidade, análise de sinais, fadiga dos materiais, ensaios acelerados.

ABSTRACT

SPINELLI, D. M. **Lean development methodology for structural components development supported by design tools, manufacturing process and materials testing**. São Carlos: Doctor Thesis - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2012.

Product development proposals have been proposed aiming to accelerate the final homologations and sign off the launch with the required reliability for minimizing the risks of damages for society and industry. This work explores a project context for a suspension structural component with high safety requirements in an objective manner, proposing a systematic lean planning approach, considering the value added thecnical deliverables, using available engineering tools from best architecture definition throughout the detailing design, prototype and testing phases. With the goal for releasing the final manufacturing tool production earlier as the traditional development method, all modeling, simulation and testing results for technological, manufacturing and economics purposes were evaluated to be used as information for a decision that must consider a high amount of monetary value. Also, a homologation proposal was explored for accessing the structural integrity for a new component considering materials selection, influence of manufacturing in the mechanical properties, characterization and fatigue testing on samples subjected to measured service loads, The results were validated with data from similar component evaluation and the reliability for the new product could be accessed and approved by dismissing additional on-road durability tests.

Key words: Product development, engineering tools, reliability, signal analysis, fatigue of materials, accelerated experiments.

INTRODUÇÃO

MOTIVAÇÃO

Atualmente, projetos técnicos de desenvolvimento para sistemas e componentes estruturais são conduzidos na indústria respeitando processos formais que incluem as macro-fases de concepção, projeto, testes de homologação e industrialização. De forma distinta, as organizações planejam estas atividades de forma sequenciada, que oneram o período total para disponibilização do produto no mercado.

A disponibilidade de informações avançadas, para orientar as decisões, é fundamental para elevar a confiabilidade das decisões, minimizando os riscos, e permitindo assim uma redução dos prazos dentro de cada macro-fase.

Estas informações podem ser obtidas por meio de modelos e simulações, virtuais ou físicas, realizadas em diversas frentes tecnológicas com o auxílio de computação e sistemas de ensaios que aplicam a matemática como base para obtenção de resultados relevantes.

A modelagem é uma idealização da realidade que ajuda o profissional a definir o sistema e as métricas para os resultados esperados, avaliando as entradas e saídas necessárias para posterior simulação e julgamento do desempenho. A modelagem preventiva é amplamente aplicada no desenvolvimento de produtos, uma vez que contribui para uma análise teórica possibilitando prever o comportamento do produto quando simulado em condições de serviço. Pode ser encontrada como modelagem virtual ou matemática e física ou ensaio dos sistemas, subsistemas e componentes.

A simulação é a aplicação de uma entrada em um modelo, buscando reproduzir as condições de serviço, para obtenção de resultados que possibilitam estimar o comportamento real do sistema. Os resultados da simulação são analisados pelo

engenheiro visando descobrir a natureza das saídas e fornecer conclusões sobre desempenho do sistema. Isto pode ser feito com base em modelos virtuais submetidos a dados numéricos e a modelos físicos em bancos de ensaio submetidos a carregamentos aplicados, ambos buscando representar o ambiente de trabalho real.

Esta investigação explora ferramentas de engenharia, computação e ensaios, em um contexto estruturado das fases do desenvolvimento, considerando os materiais e processo de manufatura, estabelecendo uma metodologia que forneça as informações consideradas relevantes para elevar a maturidade e reduzir o tempo de homologação de durabilidade em componentes estruturais, tornando o desenvolvimento enxuto definindo entregas que geram valor aos processos e fases.

OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver uma metodologia de desenvolvimento para componentes estruturais, definindo um pacote de trabalho considerando ferramentas de engenharia consagradas e uma proposta inovadora de homologação por meio de ensaios em corpo de prova do material selecionado.

As informações relevantes para que todos os aspectos de confiabilidade relacionados ao projeto, o processo de manufatura e a seleção do material de componentes estruturais são avaliadas de forma sistemática nas fases de desenvolvimento de um novo produto contribuindo para uma melhoria nos prazos e custos até o lançamento.

Para isto, são explorados aspectos nas especialidades de gerenciamento de projetos de desenvolvimento, concepção de produtos, aplicação de ferramentas de simulação em numérica, ferramentas de confiabilidade no projeto, seleção de processos para fabricação de componentes conformados, medições estruturais, análise de fadiga, ensaios mecânicos, seleção de materiais e correlações da teoria com a prática.

ESCOPO PRELIMINAR DO PROJETO

Como escopo preliminar, o projeto apresenta o seguinte conteúdo técnico de caráter inovador, que será detalhado ao longo do trabalho:

- Validação uma metodologia de desenvolvimento que permita acelerar a fase de testes de homologação fornecendo resultados de caráter técnico expressivos para as decisões de investimento antecipado para confecção de ferramentas definitivas de manufatura.

- Realização e avaliação de todas as ações tomadas para efetivar o método, apresentando as ferramentas fundamentais de conceituação, projeto e testes relevantes, distribuídas ao longo das diferentes fases do desenvolvimento de maneira multidisciplinar.

- Obtenção e comparação das propriedades de três materiais distintos, a partir de corpos de prova retirados diretamente dos componentes advindos de processos distintos de produção, considerando assim influência do processo de manufatura nos resultados;

- Análise e manipulação dos dados das medições no trecho para obtenção de histórias de deformação equivalentes o estado multiaxial de deformações, desenvolver algoritmos de simulação de vida em fadiga com base nas teorias de tensão e deformação e, por fim, determinar a vida e os ciclos que causam dano, para aplicação em uma proposta de ensaios de fadiga uniaxial em corpos de prova;

- Realização dos ensaios de durabilidade em corpos de prova e correlação com os resultados obtidos teoricamente para comprovar a viabilidade de utilização do método como ferramenta de homologação estrutural de novos componentes.

ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta tese foi elaborada em capítulos que demonstram a evolução do trabalho segundo planejamento proposto. Assim, a bibliografia utilizada, os resultados e conclusões serão respectivos a cada capítulo procurando manter uma sequência lógica da maturação de um desenvolvimento complexo para um componente estrutural.

Como já colocado em diversos trabalhos na literatura, o objetivo principal de aplicar teorias de gestão, confiabilidade, resistência dos materiais e fadiga, é a redução do tempo de desenvolvimento minimizando os ciclos de retrabalho ao longo do processo. Esta formatação permite dedicar os estudos respectivamente às especialidades utilizadas nas etapas do projeto, que é geralmente como um processo de desenvolvimento ocorre na prática.

Atualmente existem diversas práticas consolidadas na indústria com esta finalidade, e desconsiderando os potenciais de melhoria contínua destas práticas, o grande desafio da engenharia atual é conseguir representar os fenômenos físicos por meio de uma modelagem que forneça resultados que se correlacionem com o comportamento de um sistema quando utilizado em condições de serviço,

Enquanto isto não é viabilizado, seja por limitação de esforço humano, computacional, ou complexidade dos métodos que demandam conhecimentos especializados, o grande potencial de redução no tempo de lançamento de um produto se concentra na fase de validação prática do dimensionamento, empregando modernos métodos de simulação, medição e análise de sinais.

Sendo assim, esta tese além de percorrer um contexto estruturado de desenvolvimento para um produto, busca apresentar propostas de previsão local da durabilidade para um componente específico, considerando manipulações numérica por

meio de equações, e principalmente a possibilidade de homologação de todo o sistema considerando a posição mais crítica para ocorrência de uma falha.

A ideia segue o caminho teórico aplicado no Método dos Elementos Finitos, que torna discreto o meio físico contínuo em pequenos elementos que representam a teoria estrutural, e aplica numericamente carregamentos e restrições como meio para verificar os valores de tensão locais.

De maneira semelhante, a partir de um componente fabricado, é retirado um corpo de prova de dimensões menores que é submetido a carregamentos em equipamento servo-assistido até a determinação dos ciclos necessários para falha.

Desta forma, os fatores: propriedades do material, processo de fabricação e carregamento nas condições de serviço, todos muitas vezes complexos de serem modelados ou estimados, estariam também sendo considerados no ensaio e, portanto, espera-se obter uma maior correlação com os fenômenos apresentados em condições de serviço.

Não menos importante, o processo utilizado para se chegar até este ponto é apresentado de uma forma prática, descrevendo o processo realizado ao longo dos três anos de projeto.

No Capítulo 1 são apresentadas as modernas práticas de gestão no desenvolvimento de um produto, com base em estruturas matriciais e modelos tradicionais e enxutos para a condução do processo. A proposta de grupos multifuncionais trabalhando em paralelo é tida atualmente como a que mais integra e que promove a divisão das responsabilidades permitindo que as decisões sejam tomadas com base em dados de diversas especialidades e levando a uma avaliação madura dos riscos envolvidos. Este foi o modelo adotado para este desenvolvimento e as principais entregas descritas ao longo das macro-fases não são de exclusividade de

uma área funcional permitindo que a informação flua dentro do grupo e este possa atuar com autonomia sob a liderança de um coordenador. Os resultados se baseiam em um comparativo com o modelo tradicional quando uma atividade se inicia após a conclusão da outra.

No Capítulo 2 são descritas as principais ferramentas de projeto e conceitos de engenharia, para que uma especificação e a seleção de uma arquitetura adequada às necessidades da aplicação sejam realizadas de maneira sistemática, resultando em uma concepção madura para adentrar na fase de projeto detalhado com grandes chances de sucesso. Testes de variantes de arquitetura são propostos já nesta fase para que informações práticas auxiliem no processo decisório contribuindo para evitar ciclos de retrabalho que são os principais responsáveis por atrasos nos programas de desenvolvimento.

No Capítulo 3, o desenvolvimento alcança uma fase onde são realizados diversos ciclos que buscam o ótimo desempenho técnico, econômico e de manufatura. Ou seja, é quando o grupo multifuncional mais se comunica e trabalha com o objetivo de produzir um projeto que atenda as metas de cada especialidade chegando à forma final, aos custos estimados e a um conceito de manufatura viável. Cada competência contribui simultaneamente com o projeto até que os ciclos se fechem, liberando o projeto para a fase de prototipagem.

No Capítulo 4, as entregas da fase de prototipagem são sugeridas de forma que não somente os trabalhos de criação do primeiro modelo físico sejam abordados. A fase de protótipo é geralmente longa e custosa sendo que permanecer aguardando a confecção da peça, sem que haja efetivamente horas trabalhadas em atividades técnicas pode ser considerado um desperdício de tempo. Assim, a realização de investigações de caráter tecnológico deve ser incentivada e a sugestão é realizar uma investigação profunda das propriedades do material que se deseja aplicar representando o possível do processo de manufatura. Levantar dados de resistência mecânica e de fadiga para o material selecionado na fase de projeto, e com isto realizar

análises comparativas de desempenho a fadiga, fornecendo informações valiosas para atualização dos riscos do projeto.

O Capítulo 5 apresenta a fase experimental para homologação do componente apresentando rotinas e resultados dos cálculos teóricos de vida pelos métodos tensão-vida e deformação-vida. Também é detalhada a proposta de aprovação estrutural por meio de ensaios acelerados, de abordagem localizada, por meio da criação de um sinal equivalente de carregamento que represente a historia de deformações, elaborado com base na teoria de fadiga na posição de maior dano. O desafio é determinar este sinal para ser aplicado em um corpo de provas padrão, a fim de representar um estado biaxial de deformações, comumente encontrado em chapas finas. Este deve reproduzir os carregamentos aleatórios medidos, que, de uma forma localizada, quando aplicado nas amostras retiradas do componente após o processo de fabricação, represente os ciclos que causam dano na forma de blocos controlados. Estes ensaios suportarão a decisão da seleção de um material, que sustente o projeto do novo componente estrutural para a determinada aplicação.

Finalmente no Capítulo 6, é realizada uma conclusão geral do trabalho apresentando os benefícios e as dificuldades encontradas ao longo do processo, discutindo as correlações dos resultados com os esperados no início de todo o trabalho, bem como propostas de futuras linhas de pesquisa embasadas por esta Tese de Doutorado.

Um resumo do processo total proposto pode ser visualizado na Figura 1 abaixo, que sintetiza a proposta do programa desenvolvido neste trabalho de Doutorado.

CAP. 1	DEFINIÇÃO DO ESCOPO DE DESENVOLVIMENTO	
	Planejamento do projeto	Orçamento do projeto
	Grupo multifuncional	Método enxuto e tradicional
CAP. 2	SELEÇÃO DA ARQUITETURA FINAL	
	Diagrama funcional	Testes do conceito
	Modelagem e simulação digital	Matriz de seleção
CAP. 3	PROJETO DO COMPONENTE ESTRUTURAL	
	DFMEA	Ciclo de otimização
	Ciclo de projeto	Medição estruturais
	Ciclo de aquisição	Seleção do fornecedor
CAP. 4	PROTÓTIPO E SELEÇÃO DO MATERIAL	
	Detalhamento do processo	Propriedades cíclicas do material
	Caracterização do material	Comparação do desempenho dos materiais
CAP. 5	TESTES DE HOMOLOGAÇÃO	
	Caracterização das medições estruturais	Cálculo de vida ϵ - N
	Definição do modelagem localizada	Ensaio em corpo de provas
	Geração sinal equivalente localizado	Determinação da vida B10
	Cálculo vida S-N	Opcionalidade de materiais
CAP. 6	CONCLUSÕES FINAIS	
	Conhecimento técnico sugerido	Recomendações
	Correlação obtida teoria - prática	Validação

Figura 1 – Resumo do trabalho de Doutorado descrito nesta Tese.

CAPÍTULO 1 – PLANEJAMENTO DO PROJETO

1.1 REFERÊNCIAS PARA MODELOS DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS

Modelos para o processo de desenvolvimento do produto vêm sendo propostos nas últimas décadas considerando a evolução da indústria de bens de consumo e as necessidades de levar ao mercado produtos de sucesso no menor tempo possível contendo elevada maturidade técnica nos aspectos de confiabilidade.

Estes modelos de desenvolvimento têm como base fundamental o processo de desenvolvimento tradicional de produtos de produção em massa, amplamente utilizado pelas indústrias automobilísticas europeias e americanas, e o enxuto (*Lean Development*) recentemente introduzido com sucesso nas indústrias automobilísticas japonesas.

Uma forma de comparar as práticas de desenvolvimento do produto é focando nas quatro diferenças básicas em liderança, trabalho em equipe, comunicação e desenvolvimento simultâneo (WOMACK et al., 1992).

Para entender o que é a liderança, é importante apresentar as estruturas organizacionais na indústria de produção seriada, que podem ser de três tipos: Organização Funcional, Organização por Projeto e Organização Matricial (DIETER, 1991). Na estrutura funcional os especialistas estão agrupados nas unidades de negócio entregando trabalhos correlatos. Nas organizações por projeto, todas as competências necessárias para o projeto estão disponíveis em uma estrutura única, que se dissolve ao final do projeto. Já nas organizações matriciais, existe uma estrutura superposta à funcional em que se nomeiam especialistas para cooperar com o gerente de projeto, a fim de cumprir com as tarefas relativas ao programa.

Nas equipes de projeto matricial tradicional, o gerente de projeto é mais apropriadamente chamado de coordenador, cuja função é convencer os membros da equipe a cooperarem. Trata-se de um papel frustrante, devido à autoridade limitada do líder, de modo que poucos afirmam gostar da posição (WOMACK et al., 1992). Apesar desta desvantagem, esta é ainda a forma de gestão na maioria dos projetos de desenvolvimento da indústria brasileira, onde os programas de desenvolvimento são limitados em termos de recursos.

Como no projeto tradicional as entregas são fornecidas pelas distintas áreas de forma sequenciada, a comunicação gerencial fica prejudicada, pois neste modelo, um grupo faz o trabalho e toma decisões, e depois apenas comunica a entrega para área subsequente. Isto cria um problema de desperdício de tempo, falta de entendimento, e um fraco compromisso com as decisões passadas (CLAUSING, 1993). Além disto, as decisões críticas somente são tomadas em uma etapa adiantada do projeto gerando uma série de conflitos (WOMACK et al., 1992).

Esta desvantagem pode ser superada pela aplicação da prática do desenvolvimento simultâneo quando decisões de investimento podem ser tomadas em uma fase inicial, pois os membros estão trabalhando em conjunto, tem informações a respeito da situação do andamento do projeto e podem assim assumir riscos (WOMACK et al, 1992). A aplicação do desenvolvimento simultâneo, com base em equipes multidisciplinares, independe da forma de liderança e estrutura de projeto na empresa e deve, portanto, ser incentivada para trazer a informação e participação de todos os envolvidos.

Outra perspectiva é reduzir a situação para dois problemas: falha no processo e falha na cooperação. “Um super time com astros isolados sem um plano definido raramente vence uma partida contra um time unido com um plano estabelecido” (CLAUSING, 1993).

De forma geral, um projeto de desenvolvimento é uma atividade interdisciplinar que requer a contribuição de praticamente todas as especialidades da empresa. Considerando todas as áreas funcionais da organização, as áreas de vendas, engenharia e produção podem ser consideradas as principais e serem apoiadas por um time estendido, que pode incluir os fornecedores, que atuam conforme a demanda (URLICH; EPPINGER, 2004).

Para que os objetivos e metas não se percam ao longo do desenvolvimento, o planejamento do trabalho de forma estruturada passa a ser fundamental, principalmente em projetos complexos que tendem a se estender por um longo período e que demandam a participação das diversas especialidades funcionais como parte do time estendido.

O fundamento da divisão do trabalho em pacotes e a divisão do tempo em fases nascem com a aplicação dos *Stage Gates* no processo de desenvolvimento definidos por Cooper (1990). Neste modelo, grande ênfase é dada para as fases iniciais de descoberta, definição do escopo e elaboração do plano de negócio.

As características do desenvolvimento de um produto de bom resultado são, na visão dos investidores de uma organização lucrativa, as qualidades do produto com foco na satisfação do cliente, a robustez e confiabilidade; os custos de manufatura do produto incluindo os investimentos de fábrica; o tempo de desenvolvimento mostrando a capacidade da empresa em responder rapidamente às forças competitivas e desenvolvimento tecnológico; os custos de desenvolvimento; e a capacidade de desenvolvimento adquirida nos projetos anteriores (URLICH; EPPINGER, 2004).

Cooper (1990) considera que um jogo se vence ou se perde nas primeiras jogadas. As sementes do desastre são postas geralmente nas fases iniciais de um novo projeto de produto como lições de casa mal feitas, falta de orientação ao consumidor e baixa qualidade na execução. A chave para o sucesso de um novo produto está na linha

de frente ou nas atividades de pré-desenvolvimento que incluem a geração de idéias, o detalhamento do escopo e a elaboração do plano do projeto.

Na fase de elaboração do Planejamento do Projeto, o escopo e as suas fronteiras, a definição do mercado alvo, o conceito do produto informado contendo o que será e o que fará, bem como os benefícios a serem entregues, seus atributos e requerimentos de desempenho devem ser definidos (COOPER, 1990). Adicionalmente, dentro das premissas do *Total Quality Development*, além do trabalho simultâneo, são propostas as aplicações do EQFD (Matriz de Desdobramento da Qualidade Estendida) para o desdobramento das funções que geram qualidade na perspectiva do cliente e do projeto robusto para aumento na qualidade técnica (CLAUSING, 1993).

Uma enquadramento mais claro do projeto faz referência a quatro principais propostas como estratégia de desenvolvimento: 1) Criar, definir e selecionar os projetos que geram produtos superiores; 2) Integrar e coordenar tarefas funcionais e técnicas com as unidades organizacionais envolvidas nas atividades ao longo do tempo; 3) gerenciar os esforços de desenvolvimento; 4) criar e melhorar as capacidades necessárias para gerar um projeto com vantagem competitiva em um longo prazo. (WHEELWRIGHT; CLARK, 1993).

Uma referência genérica para o processo de desenvolvimento de produto constitui-se das fases de Projeto Informacional, com a criação das especificações meta; Projeto Conceitual realizando o estudo de alternativas para obtenção da melhor solução para atender às *Especificações-Meta* resultando na *Concepção do Produto*; de Projeto Detalhado que realiza a transformação da *Concepção do Produto* em *Especificações Finais* por meio de detalhamento que o compõe e os respectivos processos de fabricação; de preparação da produção que certifica o produto com base nos lotes piloto, comunicação da homologação do produto e início da produção em série; de Lançamento do produto que finaliza do processo de desenvolvimento com o registro da documentação oficial do lançamento para o mercado (ROZENFELD, 2006).

O modelo genérico do processo de desenvolvimento é utilizado como base para planejamento das atividades para este trabalho considerando a multidisciplinaridade existente internamente e com os parceiros externos à empresa, Figura 1.1.

Figura 1.1 – Modelo genérico para o Processo de Desenvolvimento de Produto (ROZENFELD, 2006),

A partir deste modelo genérico, é possível determinar as principais entregas para o projeto em estudo, considerando as atividades previstas dentro do período de desenvolvimento, mais interessa por ser motivada pelos ciclos de otimização, que estimula fortemente as discussões multidisciplinares, por ser o momento em que é possível obter os maiores benefícios por meio do compromisso entre os requerimentos de custos, manufatura, projeto e cronograma.

Finalmente, segundo Remensperger et al. (1997) o uso de ferramentas digitais durante as fases reorienta a estratégia do desenvolvimento na direção de procedimentos analíticos, denominada de Prototipagem Digital, que passa a ser de fundamental contribuição para o processo de desenvolvimento enxuto.

1.2 GESTÃO DOS RISCOS E CONFIABILIDADE

A competitividade, a pressão para com os cronogramas e prazos, o custo das falhas, a rápida evolução de novos materiais, métodos e sistemas complexos, a necessidade de reduzir os custos dos produtos, e as características de segurança podem gerar riscos para o desenvolvimento de um produto (O' CONNOR, 1991).

O gerenciamento dos riscos trata da definição das fontes de incertezas, da estimativa das consequências, da geração de respostas estratégicas refletindo sobre os possíveis acontecimentos e finalmente, com base no retorno dos fatos, identifica, analisa e deflagra respostas ao longo do ciclo de vida do produto (DIKMEN, 2008).

O planejamento foi determinado como sendo a fase mais crítica na condução do projeto, pois especifica uma série de decisões de como as coisas devem ser realizadas no futuro para que haja um bom desenvolvimento. Kerzner (2006) determina que a redução nas incertezas seja a base para o planejamento de um projeto.

Russel e Taylor (2003) identificaram sete passos para a realização de um planejamento: (1) definição dos objetivos do projeto, (2) identificação das entregas do projeto, (3) estabelecimento de relação de precedentes, (4) realização de estimativas de tempos, (5) determinação do tempo total do projeto, (6) comparação com os objetivos de prazos e (7) determinação dos recursos necessários para cumprimento dos objetivos.

De acordo com Shtub et al. (2005) os riscos podem ser classificados em três grupos: (1) relacionados ao desempenho técnico, (2) relacionados ao orçamento, (3) relacionados ao cronograma.

Os itens (2) e (3) são focados na gestão do projeto. Já o item (1) busca relacionar as incertezas quanto ao desempenho do produto durante seu ciclo de vida.

Esta medida é caracterizada pela sua confiabilidade, que é um aspecto de incerteza de engenharia definida como a probabilidade de um item realizar uma requerida função, sem falhas, sobre determinadas condições de operação, por um determinado período de tempo (O' CONNOR, 1991).

A forma geral de uma curva de confiabilidade apresentada por Dieter (1991) mostra os três principais estágios para confiabilidade de componentes mecânicos, Figura 1.2. Primeiramente, em um curto período de tempo, aparecem falhas infantis (I), vinda de erros de projeto, defeitos de fabricação ou defeitos de instalação. Quando estas falhas desaparecem, ocorre um fator que cresce continuamente em um período de falhas aleatórias oriundo de sobrecargas e eventos aleatórios (II). Finalmente, o que se espera após um longo tempo, materiais e componentes a envelhecem e se degradam rapidamente no período em que a taxa de falha acelera (III).

Figura 1.2 – Curva de falhas para componentes mecânicos (Dieter p. 538)

O método de segurança à falha (*fail-safe approach*) significa identificar os pontos fracos de um sistema e/ou permitir o monitoramento destes pontos fracos. Ainda segundo Dieter (1991), a confiabilidade deve ser definida durante as fases iniciais de concepção, conduzida através do projeto detalhado, mantida durante os diversos passos da manufatura e uma vez operacionalizada, a manutenção deve ser garantida ao longo da operação, conforme mostra o fluxo da Figura 1.3.

Figura 1.3 – Integração da confiabilidade no processo de desenvolvimento (Dieter 1991)

Adicionalmente, Dieter (1991) apresenta alguns métodos utilizados para minimizar as falhas aplicando práticas de projeto que aumentam a confiabilidade em sistemas mecânicos como: (1) fatores de segurança para sobrecargas, (2) durabilidade na seleção de materiais, (3) Tolerância ao dano nos processos produtivos, (4) simplicidade na construção, (5) especificações necessárias para materiais, tolerâncias, manufatura, manutenção e etc.

1.3 PROCEDIMENTO PARA ELABORAÇÃO DO PLANO DO PROJETO

Com base na revisão da literatura, os aspectos de gestão do projeto e dos riscos são considerados para elaborar a proposta metodológica de como abordar o tema em um contexto real de desenvolvimento.

A fase de planejamento do projeto, muitas vezes deixada em segundo plano pelos profissionais técnicos que desejam iniciar rapidamente as atividades, é fundamental para que todas as ideias sejam reunidas para que as fontes de informação e as razões do trabalho interno sejam claramente identificadas e organizadas.

Neste ponto, o escopo do projeto é detalhado, as entregas identificadas e os responsáveis definidos. Com base nesta Estrutura Analítica do Projeto (EAP), é

possível elaborar um planejamento no tempo, a definição dos recursos e quando são necessários, além de estimar os custos do projeto.

Neste capítulo são estudadas as diferenças entre uma abordagem tradicional e considerando a metodologia proposta. Aplicando os mesmos conceitos de gestão, porém alterando os pacotes de trabalho, é possível identificar os benefícios em termos de prazo e as consequências em termos de recursos que a abordagem proposta carrega ao processo de desenvolvimento.

1.3.1 Divisão de fases propostas para o projeto

A divisão de fases auxilia na elaboração dos pacotes que devem estar completos no momento de fechamento do período denominado *GATE*, indicado pela numeração nos losangos na Figura 1.4. É geralmente realizada de acordo com o tipo e a duração do desenvolvimento, e a soma de todas as partes deve no final resultar no que se esperava do projeto completo. Considerando este projeto de pesquisa em andamento, a data de conclusão é prevista para março/2012, sendo que para efeito de conclusão do desenvolvimento, será a data considerada para o lançamento do produto, Figura 1.4.

Figura 1.4 – Divisão do desenvolvimento em fases.

Com base nesta divisão, as entregas para cada fase são detalhadas de acordo com os objetivos descritos anteriormente para o projeto de pesquisa. Para efeito didático, a fase de lançamento é o período compreendido pela validação do método e sua documentação em formato de Tese.

1.3.2 Organização do projeto

Considerando o modelo de organização comumente encontrado em indústrias de bens de consumo de médio e grande porte com sendo aquela por função, esta metodologia foi testada em uma estrutura matricial de projeto com as entregas sendo geridas por um coordenador ou líder de projeto, que será responsável por todo planejamento, integração e interfaces entre os membros participantes que podem também estar alocados em projetos distintos, Figura 1.5.

Figura 1.5 – Estrutura de projeto matricial aplicada ao projeto.

1.3.3 Escopo detalhado do projeto e responsabilidades

A parte mais complexa na criação de uma metodologia de desenvolvimento é a de prever todo o conteúdo necessário do desenvolvimento, ou que grande parte dele, seja detalhada na forma de entregas que serão processadas em distintas áreas. Ou seja, trata-se da divisão de um empreendimento em pequenas partes que serão trabalhadas por diferentes grupos de distintas competências e cultura.

Para elaboração do escopo detalhado, a ferramenta de Estruturação Analítica do Projeto (EAP) é a maneira mais adequada para representar as entregas segundo cada fase do projeto. Quando associada a colunas que definem as responsabilidades, demonstra uma visão organizada do trabalho a ser realizado durante todo o projeto.

Na EAP da Tabela 1.1 são mostrados os dois cenários, com o método proposto substituindo os pacotes de trabalho tradicionais em vermelho, que servem de comprovação física para a montagem e a integridade do componente, por avaliações técnicas, virtuais e ensaios em laboratório, em azul, que representam o fenômeno estrutural com a confiança necessária para uma decisão de aprovação.

Tabela 1.1 – EAP–RACI (Responsável – Aprova – Colabora – Informado) para a metodologia proposta.

EAP - RACI		Engenharia Avançada	Engenharia Funcional	Engenharia Testes	Compras	Manufatura	Qualidade	Líder Projeto
5. Concepção								
5.1	Definição da arquitetura do sistema	R	C	C				A
5.2	Definição do grau de modularidade do sistema	R	C					A
5.3	Definição dos fatores de qualidade funcional para o sistema	R	C	C	C	C	C	A
5.4	Análise de riscos para o sistema	R	C	C		C		A
5.5	Descrição da árvore funcional do sistema	C	R/A	C				I
5.6	Modelagem geométrica virtual do sistema (DFx)	C	R/A	C		C		I
5.7	Descrição da árvore de falhas para o sistema	C	R/A	C		C		I
5.8	Seleção de fornecedores preliminares para componentes long lead	C	C		R	C	C	A
5.9	Modelagem e simulações do conceito para previsão de performance	R/A	C	C				I
5.10	Testes do conceito para coleta de informações de desempenho	C	C	R				A
4. Projeto								
4.1	Modelagem geométrica virtual dos componentes estruturais	C	R/A			C		I
4.2	DFMEA para o sistema e componentes	C	R/A	C		C	C	I
4.3	Modelagem e simulação dos componentes estruturais	R/A	C	C				I
4.4	Projeto detalhado dos componentes estruturais	C	R/A		I	C	C	I
4.5	Medições e análise estrutural dos componentes equivalentes	C	C	R/A				I
4.6	Ensaio experimental dos materiais dos componentes equivalentes	C	C	R/A				I
4.7	Seleção preliminar do material do componente	C	R/A	C	I	C	C	I
4.8	Coleta de preços e seleção do fornecedor		C		R	C		A
4.9	Concepção do processo de manufatura	C	C	I	C	R/A	C	I
4.10	Definição tolerâncias segundo processo de manufatura		C	I	I	R/A	C	I
4.11	Documentação final dos componentes estruturais	I	R/A	I	I	I	I	I
3. Protótipo								
3.1	Assinatura contrato com fornecedor	I	I	I	R/A	I	I	I
3.2	Detalhamento do processo de manufatura		C		C	R/A	C	I
3.3	Confecção do ferramental provisório		I		I	R/A	C	I
3.3	Confecção do ferramental definitivo				I	R/A	C	
3.4	Fornecimento de amostras		I	I	C	R/A	C	I
3.5	Avaliação qualidade das amostras		I	I	I	C	R/A	I
3.6	Avaliação da montabilidade estática em veículo	I	C	R/A	I	I	I	I
3.7	Levantamento das propriedades e comportamento a fadiga							
2. Testes								
2.1	Avaliação dinâmica em veículo	I	I	R/A		I		I
2.2	Medições e análise estrutural do componentes final	C	C	R/A				I
2.3	Simulação da previsão de fadiga (S-N e e-N)	I	I	R/A	I	I	C	I
2.5	Ensaio experimental dos materiais dos componentes	I	R/A	C	I	I	C	I
2.4	Banco de provas dos componentes	I	I	R/A		I	I	I
2.5	Durabilidade do sistema completo em veículo	I	I	R/A		I	I	I
2.6	Início da documentação do projeto	I	R/A	I		I	I	I
1. Industrialização								
1.1	Confecção do ferramental definitivo		C			R/A	C	I
1.1	Acerto do processo de manufatura para produção seriada		C			R/A	C	I
1.2	Homologação qualidade dimensional e material		C			C	R/A	I
1.3	Qualificação do projeto		R					A
0. Lançamento								
0.1	Produção seriada		I			R/A	C	I
0.2	Conclusão do projeto		R	C		C	C	A
0.3	Registro das lições aprendidas	C	C	C	C	C	C	R/A

A grande diferença é mostrada no processo de desenvolvimento do ferramental, que no método tradicional utiliza-se de uma versão provisória e parte para a definitiva somente após comprovação nos testes, sendo que o método proposto se apóia na confiabilidade das etapas anteriores para permitir o desenvolvimento da ferramenta definitiva logo após a conclusão da fase de projeto.

Com o foco do projeto no desenvolvimento de uma metodologia que agrega ferramentas de confiabilidade, processo de manufatura e seleção de materiais, para minimizar os riscos de modificações no projeto, grande parte das entregas está concentrada nas fases iniciais, sendo que a fase de validação por ensaios e desenvolvimento do processo de manufatura é consequência dos trabalhos realizados em fases anteriores,

O detalhamento das ferramentas utilizadas no processo de criação das entregas será discutido nos capítulos subsequentes dedicados ao detalhamento de cada uma das fases. Os resultados obtidos serão também objeto de discussão como parte desta Tese de Doutorado.

1.4 RESULTADOS DO PLANEJAMENTO NOS DIFERENTES CENÁRIOS

A EAP auxilia na elaboração do cronograma de entregas específico para o projeto em estudo e detalhar ainda mais o tempo necessário para cada fase. Além disto, de acordo com os recursos exigidos para completar cada entrega, um levantamento de horas e recursos financeiros possibilita estimar pela primeira vez o investimento total do desenvolvimento e alocar corretamente os recursos no período estipulado pelo cronograma.

Nas Figuras 1.6 e 1.7 são apresentados os cronogramas pelo método tradicional e o proposto respectivamente, com seus respectivos *Gates* ao final de cada fase, com o projeto iniciando na mesma data.

Comparando com o cronograma da Figura 1.6, no cronograma da Figura 1.7, as entregas destacadas são as que inovam o processo, mostrando as necessidades de trabalhos adicionais considerando as ferramentas de confiabilidade estrutural, a análise da influência do processo de manufatura e seleção de materiais.

O tempo de desenvolvimento para o método proposto foi reduzido em cerca de um ano. Estes ganhos originaram-se inicialmente pelo adiantamento das atividades de projeto do ferramental definitivo devido à maturidade do conceito e projeto do componente nas fases iniciais, e dos períodos dos testes de homologação que foram substituídos por ensaios em corpos de prova. Para que isto seja concretizado, informações maduras e relevantes para a tomada de decisão são fundamentais para minimizar os riscos do projeto.

Figura 1.6 – Cronograma com base na EAP – RACI para o método tradicional.

Figura 1.7 – Cronograma com base na EAP – RACI destacando as entregas adicionais propostas.

O orçamento do projeto, apresentado pela Tabela 1.2, considerando o cenário com e sem as entregas propostas pelo método, foi gerado a partir dos cronogramas, alocação dos recursos considerando as horas de desenvolvimento de cada membro da equipe de projeto estimadas em R\$100,00/hora e o orçamento previsto para os ferramentais. Este orçamento considera que os recursos tecnológicos estão disponíveis

e que os recursos humanos estão capacitados a realizar as entregas necessárias para o desenvolvimento.

Tabela 1.2 – Comparativo de investimento em um desenvolvimento de uma viga de suspensão.

FASES PROJETO - CUSTOS ÚNICOS	MÉTODO PROPOSTO		MÉTODO TRADICIONAL	
	Esforço (hs)	Custos (R\$)	Esforço (hs)	Custos (R\$)
QG5	1.400	156.800,00	640	64.000,00
QG4	1.960	200.800,00	1.040	97.600,00
QG3	3.120	302.400,00	1.920	278.400,00
Ferramental e Amostras	0	2.000.000,00	0	2.800.000,00
QG2	800	97.600,00	2.880	102.400,00
Protótipo e rodagem	0	0,00	0	300.000,00
Banco de provas - laboratório	0	100.000,00	0	200.000,00
QG1	160	14.400,00	2.000	14.400,00
QG0	2.160	288.000,00	1.920	249.600,00
Total	9.600	3.160.000,00	10.400	4.106.400,00

Os resultados econômicos e de esforço de desenvolvimento, mostram que para a proposta considerando o novo método, houve acréscimo de horas nas fases iniciais do desenvolvimento e um decréscimo na fase de testes, pois a homologação por durabilidade em um veículo protótipo e os testes em banco de provas foram substituídos pelos ensaios em laboratório, utilizados agora para a homologação estrutural da peça.

Este balanço e a eliminação do ferramental provisório resultaram em uma redução significativa nos custos do projeto, o que suporta financeiramente a aplicação do método. Considerando a evolução da maturidade do projeto, que será mostrada nos próximos capítulos, e no tempo menor de lançamento, a proposta mostra-se viável, tanto no aspecto de econômico, como no técnico, por sistematizar as diversas ferramentas de apoio à engenharia, consideradas fundamentais para aplicação da metodologia, e colocadas à disposição dos profissionais no ramo automobilístico.

1.5 CONCLUSÕES

Este capítulo apresentou a teoria sobre planejamento de projeto e como a integração multidisciplinar em um ambiente de projeto pode ser construtiva em um contexto de desenvolvimento de um produto. Estes modelos estão difundidos na literatura e aplicados em processos de desenvolvimento na indústria de bens de consumo. Porém nesta avaliação procurou-se determinar concretamente as entregas fundamentais para viabilização de uma proposta focada no desenvolvimento de componentes estruturais.

Além disto, a organização de um projeto partido das fases planejadas junto com as entregas e responsabilidades, e conseqüentemente o plano de tempo e orçamento, permite concentrar esforços e realizar comparações de diferentes métodos de trabalho.

Os cenários mostraram resultados que justifica a aplicação do método para um projeto multifuncional com entregas baseadas em ferramentas de confiabilidade, processo de manufatura e seleção de materiais, inseridas antecipadamente nas fases. Apesar de elevar o esforço técnico em horas na fase de projeto, é plenamente justificado por elevar a maturidade do produto, podendo-se reduzir o tempo de lançamento, e reduzir os custos de desenvolvimento nas tarefas que demandam equipamentos e protótipos físicos complexos.

O fato de antecipar atividades críticas, como a autorização para o projeto do ferramental, validar o sistema tratando o problema de forma localizada, e acesso constante das informações multifuncionais sobre o risco no desenvolvimento, gera valor aos elementos fundamentais de decisão ao longo do tempo, permitindo ganhos em termos de investimento e tempo de lançamento do produto no mercado.

1.6 REFERÊNCIAS

CLAUSING, D. Building better products. In: **Total Quality Development**. New York: ASME, 1993.

COOPER, Robert G. **Winning at new products**: Accelerating the process from idea to launch, 3rd edition, Cambridge: Perseus Books, 2001.

DIETER, G. E. **Engineering Design**, 2nd edition, New York: McGraw Hill, 1990.

DIKEMEN, M.T.; BIRGONUL, J.H.M.; TAH, G.; AOUAD, A. A learning based approach for risk management, In: **International symposium towards the formation of theory for the built environment**, Salford: p. 21 – 36, 2007.

KERZNER, H. **Project Management**: A Systems Approach to Planning, Scheduling and Controlling, 9th edition, New Jersey: John Wiley and Sons, 2006.

O'CONNOR, PATRICK, D. T. **Practical Reliability Engineering**, 3rd edition, Chichester: John Wiley & Sons, 1991.

RUSSEL, R.S.; TAYLOR, B.W. **Operations Management**, 4th edition, New Jersey: Pearson Education, 2003.

REMMENSPERGER, R.; KLAMSER, H.; SCHELKLE, E. **Digital Prototyping: A successful Development Strategy applied in the design of the Boxter structure**. Stratford-Upon-Avon, 1997.

ROZENFELD, H. et al. **Gestão de Desenvolvimento de Produtos**: Uma referência para a melhoria do processo. São Paulo: Saraiva, 2006.

SHTUB, A.; BARD, J.F.; GLOBERSON, S. **Project Management**: Process, Methodologies and Economics, 2nd edition, New Jersey: Pearson Prentice-Hall, 2005.

URLICH, K.; EPPINGER S. (2004). Capítulo 5: Product Specification, In: **Product Design and Development**, 3rd edition, New York: McGrawHill, 2004.

WOMACK, J.P.; JONES, D.T; e ROSS, D (1992). Projetando o automóvel. In: **A máquina que mudou o mundo**, Rio de Janeiro: Ed. Campus, 1992.

WHELLRIGHT, S.C.; CLARK, K.B. The concept of development strategy, In: **Managing new product and process development: text and cases**. New York: Free Press, 1993.

CAPÍTULO 2 – QG5: FASE DE CONCEPÇÃO

2.1. FERRAMENTAS APLICADAS NA CONCEPÇÃO

Grande parte das decisões, que irão nortear o desenvolvimento e a tecnologia do produto, é estabelecida na fase de concepção. A partir de uma idéia, são desenvolvidos modelos mentais aplicando conceitos físicos para chegar a soluções que serão detalhadas na fase de projeto. Os modelos mentais são comunicados por meio da definição da arquitetura do produto e podem ser subdivididos em sistemas que combinados devem realizar as funções esperadas pelo usuário. O desempenho de cada um dos subsistemas determina o grau de satisfação que este usuário terá para determinada função que o produto realiza.

Desta forma, é importante correlacionar a arquitetura dos subsistemas com os fatores que geram qualidade na visão do cliente e medir o desempenho o mais breve possível para que possíveis falhas na função sejam sanadas no início do projeto.

Adicionalmente, uma política empresarial de sinergia entre diferentes produtos, deve buscar fatores que incrementem a modularidade e intercambiabilidade de sistemas e itens, para permitir uma vasta aplicação de projetos robustos a fim de maximizar a escala e minimizar esforços futuros de desenvolvimento.

2.1.1 Especificação de um projeto

A especificação de um projeto consiste de uma lista de requerimentos a ser cumprida para a produção de um produto de sucesso e a maneira formal de comunicação entre um vendedor e um comprador (DIETER, 1991).

Quando preparando uma especificação detalhada, é importante afirmar quando os itens são uma necessidade (N), que devem ser atendidas em quaisquer circunstâncias, ou são meramente desejos (D) que devem ser considerados quando possível (PAHL; BEITZ, 1988).

O desenvolvimento de uma especificação parte de pesquisa de mercado, seguida de um comparativo com os concorrentes, busca por patentes, e examinando a literatura técnica (DIETER, 1991). Segundo a *Institution of Production Engineers - London* os 28 elementos primários de uma especificação que podem fazer parte de uma lista estão descritos na Figura 2.1, sendo que os destacados em verde são abordados neste projeto de pesquisa.

Figura 2.1 – Elementos para especificações (1904, apud DIETER, 1991)

Geralmente engenheiros demonstram dificuldades em elaborar sua primeira especificação, assim, recomenda-se que cada item contenha uma tarefa e algumas características técnicas associadas, pois ajuda a firmar a natureza e escopo do problema (PAHL; BEITZ, 1988).

Mesmo em projetos em que o princípio da solução já é conhecido, é importante descrever as especificações para que permaneçam registradas e se tornem fonte de informação para ações diretas internas ou de fornecedores (PAHL; BEITZ, 1998).

2.1.2 Definindo a arquitetura e concepção do sistema

A concepção de um produto ou processo assume a definição do problema e várias soluções são geradas na forma de uma arquitetura inicial. É a fase que demanda maior criatividade dos engenheiros, pois é quando ciência, prática, métodos de produção e aspectos comerciais precisam ser agrupados (DIETER, 1991).

Em um processo de concepção o ponto final será sempre a decisão por uma das alternativas de arquitetura criadas a partir de uma ideia ou de uma nova meta estipulada para um sistema conhecido, Figura 2.2.

Figura 2.2 – Processo de concepção segundo Pahl; Beitz (1988)

2.1.3 Arquitetura do subsistema e sua árvore funcional

Considerando um projeto adaptativo, que é o foco do projeto de pesquisa, o ponto de partida é a estrutura de função para a solução existente obtida da análise dos elementos que a compõe auxiliando a desenvolver variantes como outras soluções, otimizações e na criação de produtos modulares (PAHL; BEITZ, 1988).

A proposta é partir da função principal, derivar até a função de cada elemento e determinar os parâmetros do projeto. Este procedimento cuida da correlação entre estes dois domínios em toda hierarquia do processo, Figura 2.3.

Os objetivos do projeto estão definidos em termos dos requerimentos de função – FRs e para realizar estes requerimentos, uma construção física deve ser criada em termos de parâmetros do projeto - PRs (DIETER,1991).

Figura 2.3 – Conceito de mapeamento da dimensão funcional para a dimensão física.

2.1.4 Premissas DFM

Uma das mais importantes avaliações possíveis do projeto na fase conceitual, no início da transformação das funções em parâmetros de projeto, são as premissas de

DFM (*Design for Manufacturing*) que formaliza a relação entre projeto e manufatura (DIETER, 1991).

O método DFM consiste de premissas de boa prática de projeto que foram derivadas empiricamente através de anos de experiência (STOLL, 1986). O uso deste método minimiza a gama de possibilidades para que a grande parte dos detalhes que devem ser considerados estejam dentro da competência dos engenheiros (DIETER, 1991). A Tabela 2.1 apresenta o resumo das premissas DFM.

Tabela 2.1 – Premissas DFM (DIETER, 1991)

PREMISSAS DFM
1. Minimizar o número total de partes
2. Desenvolvimento de um projeto modular
3. Minimizar diversidade de componentes
4. Projetar partes multifuncionais
5. Projetar componente para multiuso
6. Projetar componente com foco na fabricação
7. Evitar uso de fixações parafusadas
8. Minimizar a direção de montagem
9. Aplicação correta das tolerâncias sem onerar a fabricação
10. Minimizar a movimentação na montagem

Algumas das premissas de DFM possuem aplicabilidade intensa na fase de projeto. No entanto cuidar desde a fase de concepção para que grande parte do roteiro seja cumprida, aplicando de imediato as premissas em uma montagem virtual, auxilia na passagem de um conceito maduro para a próxima fase.

2.2. FERRAMENTAS DE CONFIABILIDADE NA CONCEPÇÃO

A confiabilidade de um produto é extremamente influenciada pelas decisões realizadas durante o processo de desenvolvimento (O'CONNOR, 1991). Desta forma,

ter em mão ferramentas que auxiliem e suportem as decisões pode ser uma forma de minimizar os riscos de um projeto. Sua aplicação desde a fase de concepção minimiza problemas futuros de desempenho quanto aos requerimentos da função principal.

Segundo Dieter (1991) a primeira etapa para uma análise de confiabilidade é ter de forma clara o problema e a definição do sistema em estudo. Esta informação deve conter o critério para o sucesso ou falha de projeto, o desempenho esperado, os fatores ambientais, os ciclos de trabalho, e todas as condições de contorno e restrições físicas de um projeto. A partir disto, realizar uma análise com base nos conceitos de projeto sem falha, como margens de segurança adequada, proteção contra sobrecargas e conta degradação por tensão.

Além disto, O'Connor (1991) coloca outros fatores que podem afetar a confiabilidade como os métodos de produção, uso e manutenção, e falhas não relacionadas às cargas de trabalho. Assim, engenheiros devem produzir projetos que não devem falhar com base na manufatura e no uso.

As ferramentas apresentadas a seguir são básicas para a prevenção e disseminação da maturidade do conceito para a próxima fase de projeto, onde outras ferramentas serão consideradas como sequência das atividades referentes à confiabilidade do produto em executar as funções dentro do especificado.

2.2.1. Árvore de falhas

A análise da árvore de falhas (FTA) constitui uma técnica que fornece uma descrição sistemática da combinação de possíveis ocorrências em um sistema que pode levar à falha ou a um acidente enfatizando em como pode ser a falha em serviço (DIETER,1991).

Esta análise inicia-se pelas considerações dos efeitos na falha do sistema e continua com a determinação de como podem ter sido causados por falhas individuais ou combinadas nos níveis inferiores (O'CONNOR, 1991).

Cada árvore trata de um evento específico que inicia como sendo o principal e depois desce ao nível inferior determinando as contribuições que levarão à ocorrência esperada (DIETER, 1991).

Da fase de concepção, o engenheiro sabe quais as funções que devem ser satisfeitas, sendo que a conclusão de uma árvore de falhas auxilia a re-examinar as soluções concebidas ou modificar métodos de produção, montagem, operação e manutenção (PAHL; BEITZ, 1988).

Uma árvore de falhas é montada a partir de regras de simbologia que representam os eventos e o fluxo de informação.

2.2.2 Ferramentas CAD como apoio à confiabilidade

Ferramenta amplamente difundida atualmente no meio técnico é aplicada hoje praticamente em todos os desenvolvimentos como ferramenta de apoio na fase de projeto para criar geometrias complexas tri-dimensionais e desenhos destinados à fabricação. É o nome genérico de sistemas computacionais utilizados para facilitar o projeto e desenho técnicos.

Sua aplicação na fase de concepção é ainda restrita a grandes corporações, que investem em análises virtuais do produto, para confirmação de montagem, análises cinemáticas, verificação de acessos para manutenção, estilo e outras técnicas que permitam avaliações no uso ou na fabricação em uma fase inicial do projeto.

2.2.3 CAE na fase de concepção

As ferramentas CAE (Engenharia com Auxílio da Computação) são bastante poderosas como forma de prever o desempenho do sistema e mostrar antecipadamente os riscos de não satisfazer os requisitos das funções (SPINELLI, 2010).

2.2.3.1 Método de Multicorpos (MBS) para análise dinâmica de mecanismos

O método dos multicorpos encontra grande aplicação na simulação cinemática e dinâmica para análise de mecanismos. Devido à complexidade mecânica que caracteriza um veículo, Rill (1986) separou-o em conjuntos de massas e subsistemas, como suspensões e trens de força. Em seguida aplicou os princípios de d’Alambert e as equações de Lagrange para modelar e simular, através de computadores, as respostas dinâmicas do veículo a alguma entrada, simulando manobras ou trafegando sobre pista irregular.

Simultaneamente, Gillespie (1985) elaborou um material completo sobre modelagem de veículos comerciais. Utilizando uma abordagem no plano, foram dados os mesmos tratamentos de corpos rígidos para o quadro, a cabina, rodas e carreta, e os subsistemas suspensões e quinta roda, modelados de acordo com sua função mecânica.

Seguindo a mesma tendência, Costa et al. (1993) modelaram uma suspensão veicular tipo 5-barras em detalhes, utilizando como ferramenta um código gerado a partir de uma linguagem computacional o qual foi direcionado para a aplicação e executado em máquinas tipo Workstation. A partir de uma modelagem pela técnica de multicorpos o sistema foi representado como um modelo linear e a entrada por deslocamento representando um obstáculo do solo. As saídas são as histórias no tempo de diversas informações sobre a cinemática e dinâmica dos pontos de interesse

para futura análise. A técnica demonstrada apresentou aspectos de modelagem para sistemas mecânicos tridimensionais proporcionando um entendimento de uma metodologia eficaz para uma simulação computacional de suspensões veiculares. Este trabalho inspirou a utilização de um sistema de corpos rígidos para a determinação das respostas dos elementos que compõem um sistema de suspensão.

Atualmente existem muitos códigos comerciais como ADAMS® e SIMPACK®, que facilitam a modelagem e simulação de sistemas complexos para determinação de curvas e gráficos que auxiliam o engenheiro a desenvolver um conceito maduro para a fase de projeto (SPINELLI, 2010).

2.2.3.2 Método dos Elementos Finitos para avaliação estrutural

O Método dos Elementos Finitos Implícito (MEF) propõe estudar a solução para a equação do movimento e aplicar os resultados em uma equação estrutural as quais se iniciam após a obtenção das matrizes K(rigidez) e M(massa). O contínuo é dividido em um número finito de elementos que se interligam por um número discreto de nós situados nas suas fronteiras. Para deformação dos corpos elásticos, os deslocamentos nodais são as incógnitas básicas do problema. Os deslocamentos nodais (u) são determinados por funções as quais definirão o estado de tensão no elemento. Um sistema de forças nodais equilibra as tensões e possíveis cargas distribuídas, resultando em uma relação de rigidez. Neste ponto o conjunto de equações levará à obtenção de K e M, que serão utilizadas na equação a seguir, sendo $P(t)$ a carga no instante t :

$$\{P(t)\} = K\{u\}_n + M\{\ddot{u}\}_n \quad (2.1)$$

Para o desenvolvimento do método, é necessário o entendimento do equacionamento dos elementos, o que dependerá do tipo de problema a se resolver; da

montagem da matriz global, da geração das funções de forma e da integração numérica conforme explicados por Hughes (1987).

O fluxograma da Figura 2.4 mostra o procedimento de um cálculo MEF implícito para o caso estático, e pode ser extrapolada para cada passo de um caso dinâmico (SPINELLI, 2001).

Figura 2.4 – Fluxograma de um cálculo MEF implícito (Spinelli, 2001)

2.2.4 Testes do conceito

Medições e avaliações em sistemas existentes ou testes em modelos suportados por uma análise de similaridade estão entre as mais importantes fontes de informações para o engenheiro na fase de concepção (PAHL; BEITZ, 1991).

2.3 SELEÇÃO DOS CONCEITOS

O processo de concepção finaliza com a seleção do conceito que melhor atenda aos requerimentos das funções para o sistema, por meio de uma matriz que avalia as arquiteturas propostas.

O princípio básico da seleção compreende a identificação dos critérios de avaliação, determinação do peso de cada critério, determinação da régua para avaliação, quantificar cada conceito em um grupo multifuncional com conhecimento, determinação do resultado final e comparar os conceitos (PAHL; BEITZ, 1988).

2.4 PROCEDIMENTO E RESULTADOS PARA A SELEÇÃO DA SUSPENSÃO

A seguir estão descritas as etapas realizadas, aplicando as ferramentas já mencionadas, de maneira ordenada segundo o método proposto, até a seleção definitiva do melhor conceito. Os resultados da aplicação para cada ferramenta são apresentados para que sirvam de base para a próxima etapa do procedimento.

Assim é possível mostrar o processo lógico utilizando ao aplicar ferramentas consideradas especialistas, em um contexto multidisciplinar, com o objetivo de integrar o conhecimento e obter todas as informações fundamentais para uma boa seleção da arquitetura final da suspensão em estudo.

2.4.1 Definição da arquitetura para o projeto da suspensão

Para este trabalho, os requerimentos que o sistema de suspensão deve atender, sendo N necessário e D o desejado, estão listados no formato definido por Pahl e Beitz (1988), Tabela 2.2.

A definição dos requerimentos foi realizada em um grupo multifuncional com a presença das áreas técnicas de projeto, testes e pós-vendas. A reunião de informações, experiências e expectativas dos usuários consolida valores metas para a realização do projeto definindo assim o ponto de partida para o desenvolvimento do sistema.

Tabela 2.2 – Especificações para suspensão de veículo comercial para o projeto de pesquisa.

SPINELLI	ESPECIFICAÇÃO PARA SUSPENSÃO ÔNIBUS PESADO		ID
MODIFICADO	N - D	REQUERIMENTOS	RESP.
30/5/2009	N	Suspensão ar quatro foles - barras paralelas inferiores - barras V superiores	Eng. Avançada
	N	Intercambiabilidade produtos chassis e integrais	Eng. Avançada
	D	Possível montagem três tipos de eixos: HO4 (11,5t); HO6 (12,5t); HO7 (13t)	Eng. Avançada
	N	Aplicação rodoviária e urbana	Eng. Projeto
	D	Controle altura por válvulas pneumáticas	Eng. Projeto
	D	Viga sustentação fabricação estampada a quente (processo europeu)	Eng. Projeto
	N	Manter no mínimo dirigibilidade e conforto da versão atual	Eng. Projeto
	D	Reduzir custos em 5%	Compras
	N	Atender premissas testes do Check-List Experimental	Eng. Testes
	N	Capacidade máxima de carga: 13t	Eng. Projeto
31/7/2010	D	Curso total: 100mm	Eng. Projeto
	D	Curso livre: 70mm	Eng. Projeto
	D	Manter folga demais componentes em 20mm	Eng. Projeto
	D	Peso: Igual a suspensão atual	Eng. Projeto
	N	Durabilidade estrutural: 1.000.000km	Eng. Testes
	N	Durabilidade componentes elásticos: 250.000km	Eng. Testes
	D	Proteção corrosão: 1.000.000km	Eng. Testes

O sistema de suspensão em estudo compreende um conceito aplicado a eixos traseiro de veículos para transporte de passageiros com característica pneumática. A Figura 2.5 mostra o conceito para este tipo de suspensão com quatro bolsas de ar (1), o eixo motriz (2), quatro amortecedores (3), duas vigas de sustentação (4), dois batentes (5) e duas barras inferiores paralelas e barras superiores em “V” (6).

Figura 2.5 – Arquitetura base para o sistema de suspensão em análise.

Um sistema de suspensão veicular tem como função principal a absorção das vibrações oriundas do pavimento, e assim, agir como um sistema para modificar a transmissibilidade das acelerações dinâmicas geradas pelas irregularidades do solo.

As massas do sistema de suspensão são consideradas como não suspensa, absorvendo e transferindo as vibrações do pavimento para o veículo. Merece ser extensivamente estudada, pois o não atendimento de sua função principal gera desconforto e afeta a segurança, pois é também o agente de sustentação dos eixos com o veículo.

2.4.2 Definição da árvore funcional do sistema de suspensão

A árvore funcional para o sistema em estudo é apresentada na Figura 2.6 de acordo com as características principais dos sistemas, subsistemas e seus componentes.

Figura 2.6 – Árvore funcional para o sistema de suspensão em estudo.

Seguindo a numeração dos componentes da Figura 2.5, as sub-funções do sistema foram detalhadas, permitindo assim um entendimento maior do problema a ser abordado. A função principal foi desdobrada, com base na arquitetura definida para o projeto, buscando identificar as funções dos componentes que formam os subsistemas descritos nas caixas de texto em branco.

2.4.3 Definição da modularidade para o sistema suspensão

A modularidade e as sinergias indicadas como necessidade na tabela de requerimentos referem-se à possibilidade de montagem de diversos produtos, bem como a possibilidade de fixação de distintos eixos em distintas aplicações com diferentes cargas.

Considerando aspectos de sinergia nas medidas principais, uma montagem virtual do sistema considerando os componentes atuais foi realizada para verificação das diferenças de ambas as versões, no sentido de orientar os próximos passos. Na Figura 2.7 são mostradas as medidas avaliadas para as diferentes aplicações do conceito nos veículos considerados.

Figura 2.7 – Avaliação das medidas principais para que a sinergia seja garantida.

As medidas dadas destacadas na Figura 2.7 possuem uma harmonização e não necessitam ser modificadas ou trabalhadas, enquanto que as em branco necessitam ser investigadas para que se permita o intercâmbio dos componentes, especialmente do quadro e do eixo que formam as principais fronteiras do sistema de suspensão.

De uma análise da situação inicial, é possível observar a maioria das medidas que influenciam o projeto, como da viga de suspensão e as interfaces com os elementos do veículo e eixos. Grande esforço técnico será empenhado na regularização das medidas por serem importantes para a montagem, esforços e comportamento da cinemática da suspensão.

2.4.4 Firmando as variantes para o sistema suspensão

Como a arquitetura se distingue pouco entre as propostas, detalhes construtivos foram abordados de forma intensa por serem importantes na realização dos requerimentos e na determinação das condições mais favoráveis aos componentes quando operando em serviço. Basicamente, as variantes se distinguem pelo posicionamento dos batentes e nas mínimas diferenças de altura H das fixações superiores segundo a montagem dos diferentes eixos, Figura 2.8.

Figura 2.8 – Arquiteturas do sistema (1 e 2) para as montagens dos eixos contidos na legenda.

Firmando estas variantes, o próximo passo é prever o comportamento funcional, de operação para que um sistema confiável do ponto de vista conceitual siga em desenvolvimento. Também, custos serão levantados para as versões para que sejam utilizados como critério de seleção.

2.4.5 Árvore de falha para o sistema

Para que a árvore de falhas seja determinada, foi necessário voltar à árvore de funções da Figura 2.6, e utilizar as principais funções do sistema como ponto de partida.

Foram elaboradas duas árvores de falhas de acordo com as principais funções do sistema de suspensão. A primeira função determinada de absorver vibrações causadas pelas irregularidades do pavimento é detalhada na Figura 2.9. A segunda função de sustentação do eixo motriz, considerada fundamental em um aspecto de confiabilidade para a segurança dos passageiros está detalhada na Figura 2.10.

Para ambas as análises, a viga de sustentação aparece como um elemento de função estrutural com relativa importância para as funções primárias do sistema, ou seja, absorver vibração e sustentar o eixo. Assim é de extrema relevância e por isto justifica ser estudada com maior profundidade ao longo do desenvolvimento do trabalho.

Este componente de ligação irá se tornar o foco principal deste projeto de pesquisa, pois demonstra ser um elemento estrutural que recebe carregamentos aleatórios, estando sujeito a falhas por fadiga estrutural. Além disto, seu processo de fabricação é tecnologicamente complexo, tal que motiva uma avaliação das possibilidades de materiais de construção mecânica que resultem em um projeto de elevada confiabilidade.

Figura 2.9 – Árvore de falhas para função de absorver vibrações.

Figura 2.10 – Árvore funcional para função de sustentar o eixo.

2.4.6 Avaliações em CAD do sistema de suspensão

As primeiras avaliações em CAD realizadas para a determinação do comportamento cinemático da interface suspensão/veículo foram realizadas considerando os movimentos verticais e laterais dos corpos.

Para o comportamento lateral, observou-se na rolagem do veículo até o contato com o batente, que possui rigidez maior que as bolsas, uma diferença expressiva nos ângulos para as duas versões de batente. Isto sinalizou o risco de que a versão com batente no eixo poderia apresentar um pior comportamento em curvas do que com batente dentro das bolsas de ar, Figura 2.11.

Figura 2.11 – Situação de rolagem do veículo até atingir o batente da suspensão.

Para o comportamento vertical, observou-se grande proximidade dos cilindros de freios com a estrutura do veículo mostrando que o curso de 100 mm poderia causar dano ao sistema e consequentemente, comprometer a segurança, Figura 2.12.

Figura 2.12 – Situação de movimentação vertical até os cilindros atingirem o batente da suspensão.

As duas informações analisadas são importantes para a avaliação do melhor conceito na definição da arquitetura final do sistema.

2.4.7 Avaliações MBS do sistema de suspensão

Como a ferramenta de CAD não fornece dados de desempenho para o sistema de suspensão, uma análise dinâmica comparativa do comportamento lateral do veículo é recomendada para a compreensão do efeito do posicionamento dos batentes. Conforme antes mencionado, este posicionamento pode comprometer o desempenho dinâmico e consequentemente o não cumprimento dos requisitos estabelecidos.

Desta forma, o veículo completo foi modelado por meio da técnica de multicorpos (MBS), no programa comercial SIMPACK® representado pela Figura 2.13, que considera as massas suspensa e não suspensas, bem como a geometria e juntas entre os componentes da suspensão dianteira e traseira respectivamente, além de todas as curvas de rigidez e amortecimentos relacionadas aos elementos elásticos e amortecedores.

Foram realizadas duas simulações de desempenho lateral a partir de carregamentos de entrada considerando a aplicação de gradientes de aceleração lateral – trajetória em círculo - e manobra de mudança da pista a 60km/h.

Figura 2.13 – Veículo completo e modelos MBS para a suspensão dianteira e traseira.

Observando os resultados para a inclinação lateral nas manobras de trajeto em círculo (a) e mudança de pista a 60km/h (b) verificam-se valores menores do ângulo de inclinação para a versão com batente nos foles, que proporciona um comportamento mais estável e confortável para os passageiros. Assim foi possível prever que existe uma diferença de comportamento favorável à versão com batente nas bolsas conforme observado na Figura 2.14.

Figura 2.14 – Resultados comparativos da dinâmica lateral para posição dos batentes.

Esta informação comprova a tendência dos estudos cinemáticos no sistema CAD, que já indicava uma diferença de comportamento para as duas arquiteturas de sistema de suspensão.

2.4.8 Avaliações MEF da viga de sustentação para sistema de suspensão

Das árvores de falha determinadas nas Figuras 2.9 e 2.10, o componente mais crítico encontrado foi a viga de sustentação, que é um elemento estrutural importante de transmissão de carga.

Para os conceitos existentes são encontradas duas vigas de geometrias distintas denominadas de Viga Nacional e Viga Importada, fazendo referência ao projeto nacional e europeu, de desempenho estrutural conhecidos nas referidas aplicações.

Para verificar a diferença de desempenho estrutural destas vigas atuais e suas limitações, quando são consideradas as condições de contorno para os conceitos em análise, partiu-se inicialmente para uma análise estática simples pelo Método dos Elementos Finitos, com o objetivo de comparação dos resultados estruturais teóricos.

Ambos os projetos foram modelados de acordo com a geometria e o material empregado, sem considerar os efeitos do processo de fabricação na análise estrutural segundo descrito na Figura 2.15.

Figura 2.15 – Considerações de projeto para análise MEF.

Dispondo do modelo de elementos finitos para o veículo completo gerado no programa comercial MEDINA® segundo a Figura 2.16, foram realizadas análises estáticas utilizando o programa de cálculos PERMAS®, considerando a condição de batente no eixo e aceleração de entrada 2G (G = Aceleração da Gravidade) vertical junto com a pré-carga de torque nos grampos de fixação da viga ao eixo de 750 Nm.

Figura 2.16 – Modelo MEF e considerações de carga.

Os resultados de desempenho estrutural comparativo entre os projetos atuais são apresentados em termos de valores de von Mises percentualmente ao Limite Estático (LE) do material empregado. Estes mostram que a Viga Nacional, Figura 2.18, supera a Viga Importada, Figura 2.17, em termos de desempenho estrutural, indicando que para a carga requerida, existe um risco da Viga Importada não atender à durabilidade esperada quando comparado com a Nacional em aplicações mais severas.

Figura 2.17 – Resultados MEF da Viga Importada (material St 52; LE = 310N/mm²)

Figura 2.18 – Resultados MEF da Viga Nacional (material E380TM; $LE = 320\text{N/mm}^2$)

Para equalizar os valores percentuais, é necessário modificar o material da Viga Importada para outro de maior resistência mecânica, e assim, validar um processo de fabricação que mantenha as características estruturais necessárias para garantir um desempenho estrutural semelhante ao da Viga Nacional.

É importante também observar que a quantidade de material na Viga Importada é menor que na Viga Nacional, ou seja, existe uma diferença de massa que influi no desempenho estrutural equivalente a aproximadamente 5,5kg (cerca de 9%), Figura 2.19.

Figura 2.19 – Diferença de pesos das duas vigas de suspensão em análise.

Para garantir a equivalência das massas, foi considerado desenvolver um novo componente que atenda desde o início aos requerimentos estruturais e funcionais, compensando a diferença de rigidez geometricamente e, além disto, buscar vantagens em termos de custo e peso. Este componente foi denominado de Viga Global.

2.4.9 Testes conceituais para os tipos de suspensão (posição do batente)

Para comprovação prática do comportamento do sistema, ambas as versões de suspensão, com batente nas bolsas e batente nos foles, dois veículos foram montados com as vigas Importada e Nacional, e submetidos a avaliações dinâmicas subjetivas para investigação do comportamento funcional de ambas as arquiteturas. Os resultados desta avaliação estão mostrados na Figura 2.20.

Figura 2.20 – Resultados práticos de avaliação de desempenho dinâmico da suspensão.

Nesta avaliação dinâmica, realizada de forma subjetiva e valorizada por meio de notas, ficou evidente que o comportamento lateral do veículo demonstrou ser satisfatório com a versão de batente nas bolsas conforme previsto pelas análises geométricas e simulações de multicorpos. Com isto, fica demonstrado que estas

ferramentas exibem correlações com a realidade e podem auxiliar nas decisões no início da fase de concepção.

2.4.10 Consideração de fatores econômicos no processo de seleção

No processo de seleção de um conceito é fundamental considerar fatores econômicos para que este seja viável também do ponto de vista financeiro, trazendo vantagens também para a organização que pretende introduzir um novo sistema no mercado. Isto é, para o cliente as medidas são funcionais e para os produtores as medidas são econômicas, que podem ser incluídas como aspectos implícitos ao processo de seleção (PAHL; BEITZ, 1988).

Para este caso, foi proposta uma avaliação da nacionalização da Viga Importada, atualmente fabricada apenas na Europa. Considera-se, porém a necessidade de aplicação de um material de maior resistência mecânica, a fim de manter o peso do componente no menor nível e que no caso de um novo desenvolvimento fosse considerado também como uma meta de desempenho.

O desenho detalhado deste componente existente foi fornecido para cotação em fornecedores e os resultados estão apresentados na Figura 2.21, com uma base de referência no valor do componente existente importado da Europa.

Figura 2.21 – Resultados comparativos de custo – com base de custo na Viga importada.

O resultado comparativo mostra que para os preços das versões existentes, haveria um potencial de redução no caso do desenvolvimento de uma nova viga em termos de custos, pois foi o menor valor obtido preliminarmente junto aos fornecedores e, do ponto de vista econômico, motiva o desenvolvimento de um componente nacional de geometria e conceito de produção semelhantes.

2.4.11 Conclusão do processo de seleção.

Para a avaliação foram definidas as arquiteturas com batente nas bolsas, conforme teste em conceito, por ser a que satisfaz o requerimento técnico de manter no mínimo a dirigibilidade da versão atual.

O processo de seleção foi direcionado para qual seria o destino do desenvolvimento da viga de suspensão. Com base nos conhecimentos gerados por análises estruturais, teste dos conceitos e cotação em fornecedores, foi possível elaborar a matriz de seleção, Tabela 2.3, e selecionar o projeto de uma nova versão como sendo a melhor alternativa considerando os fatores de seleção, seu peso e as notas dada para cada alternativa em uma avaliação multifuncional.

Tabela 2.3 – Seleção da proposta de viga de suspensão para o conceito.

MATRIZ DE DECISAO															
FATORES DE AVALIAÇÃO	CUSTOS BRASIL		CUSTOS EUROPA		SINERGIA		HARMONIZAR GLOBAL		COMPRAS GLOBAL		CAPACIDADE 13t		CAPACIDADE 11,5t		TOTAL
PESO QUESITO (1-3)	3		1		3		3		2		2		3		
RESULTADO (1-5)	NOTA	PESO x NOTA	NOTA	PESO x NOTA	NOTA	PESO x NOTA	NOTA	PESO x NOTA	NOTA	PESO x NOTA	NOTA	PESO x NOTA	NOTA	PESO x NOTA	NOTA
VERSAO IMPORTADA	3	9	3	3	5	15	5	15	5	10	0	0	5	15	26
VERSAO NACIONAL	4	12	4	4	5	15	0	0	0	0	5	10	5	15	23
IMPORTADA REFORCADA	2	6	3	3	5	15	4	12	4	8	5	10	5	15	28
NOVA VERSAO	5	15	5	5	5	15	3	9	3	6	5	10	5	15	31

75

2.5 CONCLUSÕES

Este capítulo mostrou como a organização no início da concepção, o uso de ferramentas virtuais e a possibilidade de avaliação prática, podem trazer importantes informações para um processo de seleção da alternativa, que após julgamento dos fatores chaves para atender aos requisitos do cliente e da empresa, tende a se tornar a melhor escolha ou compromisso para início da fase de projeto.

O congelamento de uma concepção madura, com base em uma arquitetura, já incorporando componentes relevantes em uma fase antecipada, minimiza a possibilidade de retrabalhos em uma próxima fase, que deve ser amplamente focada em otimizações e não mais em definições básicas de como o produto deve ser.

Para realização deste congelamento, o engenheiro dispõe atualmente em mãos, diversas ferramentas para a organização das ideias e para modelagem e simulação dos conceitos a fim de prever o desempenho em vários aspectos da mecânica.

Estas ferramentas demonstraram ser úteis em uma análise prévia da confiabilidade dos requisitos funcionais mais relevantes, determinados a partir de um conjunto de requerimentos com a priorização do que realmente gera valor ao cliente.

No caso em estudo, a definição da posição dos batentes para garantir a estabilidade lateral do veículo, e a decisão pelo desenvolvimento de uma nova viga de sustentação contendo metas de desempenho e massa, orienta o trabalho da próxima fase do projeto.

2.6 REFERÊNCIAS

COSTA, A., JONES, R. P., CHERRY, A. **Modelling and Simulation of a Five-Point Vehicle Suspension Using Multibody Systems (MBS) Techniques**, São Paulo: SAE Brasil 93, no. 931697, 1993.

DIETER, G. E. **Engineering Design**, 2nd edition, New York: McGraw Hill, 1990.

GILLESPIE, T. D. **Fundamentals of Vehicle Dynamics**, 1st edition, Warrendale: SAE, 1993.

HUGES, T. J. R. **Finite Element Method**: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis, Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1987.

PAHL, G.; BEITZ, W. **Engineering Design**: A Systematic Approach, London: The Design Council, 1988.

O'CONNOR, PATRICK, D. T. **Practical Reliability Engineering**, 3rd edition, Chichester: John Wiley & Sons, 1991.

RILL, G. Fahrdynamik von Nutzfahrzeugen im Daimler- Benz Fahrsimulator. In: **Berechnung im Automobilbau**, VDI-Bericht 613. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1986.

SPINELLI, D. M. **Simulação e Análise no auxílio do desenvolvimento de veículos**, Dissertação (Mestrado e Engenharia Mecânica), São Carlos: EESC, Universidade de São Paulo, 2001.

SPINELLI, D. M.; COSTA, A. Virtual Engineering Tools application and planning in a vehicle development context, In: **XVIII Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva SIMEA 2010**, publicado em meios eletrônicos (CD-ROM), p. 1/15, v.1, São Paulo-SP, Brasil, 2010.

STOLL, H.W. **Design for Manufacture**: An Overview, **Applied Mechanics Reviews**, vol. 39, n. 9, p. 1356-1364, 1986.

CAPÍTULO 3 – QG4: FASE DE PROJETO

A fase de projeto tem como premissa ser o período no qual ocorrem os ciclos de detalhamento, aquisição e otimização; desdobrando, criando, detalhando e documentando o produto no nível dos componentes unitários (ROZENFELD, 2006).

É nesta fase também que grande parte dos recursos efetivos da empresa passa a tomar conhecimento e a trabalhar efetivamente no projeto. Ou seja, é o período em que um desenvolvimento multifuncional deve ser incorporado e incentivado para que as barreiras departamentais não se tornem obstáculos, causando atrasos no planejamento inicial em função de uma ineficiência organizacional.

Algumas formas de manter ou reduzir os ciclos no período de projeto são colocados por Cooper (2000) segundo Tabela 3.1:

Tabela 3.1 – Formas de reduzir os ciclos de projeto (COOPER, 2000)

Atitudes	Consequências
Procure fazer correto nas primeiras vezes	A melhor forma de garantir os prazos é não voltar ao início do processo
Definições claras das tarefas	Colocar as metas claramente ao grupo para evitar interpretações erradas
Organizar um time multifuncional e dar poder a ele	Cria a oportunidade de discussões paralelas entre os membros e evita a verticalização das propostas
Processamento paralelo das informações	O desenvolvimento seqüencial está atualmente morto, mais deve ser realizado no mesmo período de forma multifuncional
Priorização e foco	Concentrar recursos nas entregas que realmente geram valor ao projeto

Classicamente, o processo de desenvolvimento de produtos é definido pelos ciclos: Projetar – Construir – Testar – Otimizar. Estas serão refinadas em três ciclos que integram as atividades na fase de projeto, dão flexibilidade ao modelo e alerta as

empresas para o trabalho em time multifuncional, de forma paralela, para obtenção dos benefícios da Engenharia Simultânea (ROZENFELD, 2000).

Ciclo de detalhamento: Tarefas que envolvem a criação e detalhamento dos sistemas, sub-sistemas e componentes (SSCs). Os ciclos de aquisição e otimização estão integrados ao de detalhamento e depois de esgotadas todas as possibilidades as últimas atividades deste ciclo são realizadas.

Ciclo de aquisição: Acionado durante o ciclo de detalhamento e envolve as atividades de decisão *make or buy* (fabricar ou comprar) e, após definido, o desenvolvimento nos fornecedores.

Ciclo de otimização: Também ocorre durante o ciclo de detalhamento, quando os protótipos são avaliados e quando necessário, tem os SSCs otimizados por meio de mais um ciclo de detalhamento e aquisição.

As atividades de planejamento do processo de fabricação ocorrem de forma paralela e integrada na atividade de planejamento de recursos. A visão geral desta fase é então formada e apresentada como na Figura 3.1, mostrando os ciclos da fase de projeto, que serão detalhados com base em ferramentas de confiabilidade, seleção de materiais e processos de fabricação para o projeto da viga de suspensão.

Figura 3.1 – Ciclos na fase de projeto segundo Rozenfeld (2000).

3.1 CICLO DE DETALHAMENTO

Um grande número de pequenos, mas importantes pontos necessitam ser decididos no ciclo de detalhamento e a eficiência e precisão que são trabalhados determina a velocidade que o produto é disponibilizado ao mercado e os referentes custos (DIETER, 1991).

Ainda, segundo Dieter (1991) quatro fatores que influenciam o projeto detalhado são: (1) normas, (2) componentes normalizados, (3) tolerâncias e (4) materiais e processos de manufatura.

Ou seja, partindo de um conceito de produto ou sistema, o objetivo do projeto detalhado é fornecer informações relevantes para a produção dos componentes, de forma que quando integrados fisicamente, são capazes de reproduzir as funções especificadas na fase de concepção.

A confiabilidade na reprodução das funções está diretamente ligada a fase de detalhamento com relação à contribuição do desempenho individual de cada componente ao do sistema.

3.1.1 DFMEA como ferramenta de confiabilidade na fase de projeto

A ferramenta mais utilizada para realizar uma análise detalhada do mau funcionamento que podem ser produzidos nos componentes de um sistema é o FMEA (Análise de Engenharia dos Modos de Falha), que enfatiza como projetar adequadamente para elevar a confiabilidade (DIETER, 1991). Com base nesta ferramenta serão definidas as ações de projeto para o novo componente definido na fase de concepção.

Um DFMEA é a aplicação da ferramenta FMEA em um contexto de projeto. De modo a ser eficiente, deve ser conduzido no início desta fase por um time de engenheiros multidisciplinares com experiência no sistema (O'CONNOR, 1991).

Ainda segundo O'Connor (1991), a primeira etapa para a aplicação do DFMEA é a obtenção de dados do sistema, o que inclui a especificação, o diagrama de funções, a geometria CAD, dados de tensões – MEF e resultados de testes disponíveis até o momento.

A disponibilidade de informações relevantes vindas da fase de concepção é mais um fator que justifica o investimento realizado no início do projeto, pois assim munido, torna-se possível avaliar os possíveis modos de falha e trabalhar fortemente nos pontos importantes que geram a confiabilidade do produto, minimizando o retrabalho ao longo da fase de projeto.

3.1.2 Medições de deformações

Uma forma de obtenção de dados para a fase de projeto é por meio de medições em sistemas similares por meios de instrumentos que forneçam dados em condições de serviço para deformações, acelerações e forças (SPINELLI, 2010).

Um estado de deformação pode ser caracterizado pelas seis componentes cartesianas da deformação, ou da mesma forma, pelas três componentes principais com as três principais direções associadas (DALLY, RILLEY, 1991).

A medição correta das deformações, a partir das quais as tensões podem também ser determinadas, é uma das maiores fontes significativas de dados para uma avaliação estrutural e análise de confiabilidade com relação à fadiga de um componente (LEE, et al, 2005).

As deformações ϵ são definidas como sendo a variação no comprimento de uma linha paralela ao seu eixo dividido pelo seu comprimento original, enquanto que a componente da deformação por cisalhamento γ é definida como a variação no ângulo formado pelas linhas ortogonais.

Para a maior parte dos casos, a aplicação de extensômetros está confinada à superfície de um corpo, e assim, o estado de tensão bidimensional pode ser expresso na forma de três deformações cartesianas ϵ_{xx} , ϵ_{yy} e γ_{xy} (DAILLY; RILLEY, 1991).

Extensômetros modernos são equipamentos resistivos que medem experimentalmente as deformações que um corpo experimenta. Para medição das deformações foi utilizado no projeto o arranjo do tipo Roseta, Figura 3.2.

Figura 3.2 – Extensômetro arranjo tipo Roseta.

Este arranjo é utilizado quando a direção da carga é desconhecida ou é variável e permite medir as grandezas necessárias para uma análise de deformações com base no Diagrama de Mohr para identificação das deformações principais e também a deformação de cisalhamento e distorções segundo orientação do sensor.

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{(\varepsilon_x + \varepsilon_y)}{2} \pm \frac{\sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2}}{2} \quad (3.1)$$

$$\tan 2\phi = \frac{\gamma_{xy}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y} \quad (3.2)$$

$$\gamma_{xy} = 2\varepsilon_{45} - \varepsilon_x - \varepsilon_y \quad (3.3)$$

Para obtenção das tensões principais, aplica-se a relação linear de tensão – deformação que estão relacionadas pelo do Módulo de Elasticidade (E) e o coeficiente de Poisson (μ).

$$\sigma_1 = \frac{E}{(1 + \mu^2)} (\varepsilon_1 + \mu \varepsilon_2) \quad (3.4)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{(1 + \mu^2)} (\varepsilon_2 + \mu \varepsilon_1) \quad (3.5)$$

Desta forma, a partir de uma instrumentação e relações elementares, é possível obter o estado de tensão-deformação localizado, na posição do extensômetro.

3.2 CICLO DE AQUISIÇÃO

Segundo Rozenfeld (2000), as empresas se preocupam em fabricar somente os itens estratégicos, essenciais e importantes para manter a qualidade de seus produtos, fazendo com que os fornecedores se concentrem nos grandes volumes permitindo um custo menor para todos os parceiros da cadeia de suprimentos.

O ciclo de aquisição se inicia com uma análise interna de valor para determinar a meta de custo do componente com base em modelos econômicos de custos de matéria prima e mão de obra, e, desta forma, realizar uma negociação com base em um valor alvo.

Mais adiante, dispondo das cotações oficiais do componente e dos investimentos associados, é possível realizar uma comparação do custo total do projeto e selecionar a melhor opção (DIETER, 1991).

3.3 CICLO DE OTIMIZAÇÃO

O ciclo de otimização foca, neste caso, em uma melhoria no processo de conformação, atualmente a frio para a Viga Nacional, que eleva sua resistência mecânica devido ao encruamento nas regiões conformadas. Porém se o metal for aquecido a uma determinada temperatura, este endurecimento por deformação não ocorre, e ao contrario, novos grãos são formados livres de deformações e o material se comporta como um aço que não sofreu o trabalho mecânico (GROOVER, 2007).

A recristalização é uma característica dos metais dependente da temperatura que pode ser explorada nos processos de manufatura aquecendo o material antes de sua deformação. Assim, a quantidade de deformação que o material recebe poderá ser substancialmente maior e as forças e potência necessárias para realização do processo são significativamente reduzidas (GROOVER, 2007).

Desta forma, mesmo estando o processo de seleção de material dentro do processo de otimização, sugere-se que este seja tratado em um tópico a parte, por se tratar de um importante aspecto no contexto do projeto.

Assim, é recomendado que as principais propriedades do material sejam avaliadas e colocadas de forma comparativa, respeitando as necessidades do projeto detalhado, do ciclo de aquisição - impactando na disponibilidade e custos - e do processo de manufatura - pois modificam a estrutura cristalina que causa desvios nos valores originais considerados no dimensionamento do componente.

3.4 SELEÇÃO PRELIMINAR DO MATERIAL

Os requerimentos de desempenho de um material são usualmente expressos em termos de suas propriedades físicas, mecânicas, térmicas, elétricas ou químicas e são o elo entre a estrutura básica e composição do material e o desempenho em serviço do componente (DIETER, 1990), Figura 3.3.

Figura 3.3 – Propriedades do material e a relação entre estrutura e desempenho.

Usualmente são utilizadas propriedades que são facilmente medidas e associadas a uma resposta como a Tensão Limite de Escoamento (DIETER, 1991), que para o projeto em estudo é uma medida de desempenho estrutural simples como critério de seleção inicial.

A essência do processo de seleção de materiais não é a competição de um versus os outros, mas sim do processo de fabricação com determinado material competindo com o processo de outro.

3.5 APLICAÇÃO DAS FERRAMENTAS E RESULTADOS

3.5.1 DFMEA para a viga da suspensão

Para o caso em estudo, a grande maioria das avaliações foi realizada na fase de concepção, e dispondo ainda de uma montagem física em veículo, mesmo que conceitual, torna ainda possível uma avaliação das vigas atuais importada e nacional em um programa de medições de tensões, para identificação dos critérios de desempenho a serem adotados para o novo componente.

Para a viga de suspensão foi elaborada uma análise tipo DFMEA considerando as premissas mencionadas e também uma avaliação dos riscos durante as etapas do projeto, Tabela 3.2. O risco de uma falha define-se pela multiplicação da probabilidade P de ocorrência (linha cinza) e da severidade S (coluna preta), sendo os valores em ordem crescente de intensidade.

Tabela 3.2 – Matriz de riscos Severidade x Probabilidade para aplicação DFMEA

$\begin{matrix} s \\ \backslash \\ p \end{matrix}$	1	2	3	4	5
1	1	2	3	4	5
2	2	4	6	8	10
3	3	6	9	12	15
4	4	8	12	16	20
5	5	10	15	20	25

O resultado da avaliação por DFMEA está apresentado na Tabela 3.3 onde foram analisados diversos modos de falha, que podem ser minimizados para uma condição de baixo risco com ações de projeto, com exceção da vida do componente em fadiga, os quais demandam testes de confiabilidade mais sofisticados para garantir baixa probabilidade de falha.

Tabela 3.3 – Matriz DFMEA para a viga de suspensão

SISTEMA		SISTEMA SUSPENSÃO - VIGA										12/12/2009			
FUNÇÃO		Movimentar e conectar eixo ao veículo												Daniel Muller Spinelli	
FMEA															
ID	Item	Função	Modos de Falha	Efeito da Falha	Severidade	Causas	Ocorrência	Risco	Controle Prevenção	Prevenção	Risco	Controle Detecção	Risco		
1	Viga de sustentação	Transmitir movimento vertical do eixo para o sistema de suspensão	Deformação plástica da viga	Desalinhamento geométrico		3	Dimensionamento estático inadequado	5	15	Cálculo FEA + Seleção correta material	2	6	Testes Durabilidade	1	
						3	Processo produção altera propriedades estáticas do material	4	12	Ensaio no material	3	9	Testes durabilidade	1	
			Movimento fora do especificado			3	Tolerâncias projeto não suficientes	5	15	Definir tolerâncias apertadas quando necessário	3	9	Testes Funcionais com peça homologada	2	6
						3	Processo definido não mantém as tolerâncias	5	15	Prever calibração das tolerâncias no processo produtivo	3	9	Homologação produto e processo	2	6
		Manter eixo preso ao veículo	Fratura por fadiga	Trinca e posterior falha		5	Dimensionamento a fadiga inadequado	5	25	Dimensionamento considerando cargas dinâmicas	3	15	Testes durabilidade	2	10
						5	Processo produção altera propriedades de fadiga do material	4	20	Ensaio no material	3	15	Testes durabilidade	2	10
					5	Corrosão afeta propriedades material	4	20	Aplicar acabamento anti-corrosivo	2	10	Ensaio corrosão	1	5	

Desta forma, investir em técnicas de confiabilidade do componente e material associado torna-se fundamental para minimizar os riscos de falha por fadiga, e, portanto, é um fator diferencial na fase de projeto, o tratamento dos dados existentes e correlações por meio de cálculos, assumindo coeficientes de segurança mínimos para o sucesso do projeto em desenvolvimento.

3.5.2 Medições práticas nos sistemas atuais

3.5.2.1 Determinação dos pontos de medição

A necessidade de obtenção dos dados de deformação, acelerações e forças são fundamentais para análise do desempenho estrutural e dinâmico do sistema. Na maioria dos casos, estas informações são utilizadas para uma nova seqüência de análise que permita a obtenção de resultados de confiabilidade com base em dados obtidos em campo, e não mais somente em hipóteses de carregamentos aplicados nos métodos numéricos.

Figura 3.4 – Pontos críticos determinados em cálculo MEF para o posicionamento dos extensômetros

Do resultado obtido em 2.17 e 2.18, foram detectados pontos de tensão elevados em ambas as vigas Importada e Nacional. Para efeito de comparação e verificação do desempenho estrutural de forma experimental, ambas foram submetidas a medições segundo recomendação mostrada na Figura 3.4.

3.5.2.2 Procedimento adotado para as medições

De acordo com o posicionamento sugerido pelos resultados da simulação numérica, foram posicionados extensômetros resistivos na forma de rosetas (R) e lineares (SG) dependendo da região e orientação das tensões, para a Viga Importada, Figura 3.5 e para a Viga Nacional, Figura 3.6.

Nota-se que a quantidade de pontos na Viga Importada foi maior que na Viga Nacional. Isto ocorre, pois as medições são realizadas em momentos distintos, por restrições dos equipamentos de medição (disponibilidade de canais). E ainda, pelo motivo que nos resultados de simulações a Viga Importada apresentar tensões elevadas em um número maior de regiões.

Figura 3.5 – Posicionamento definitivo dos extensômetros para medições na Viga Importada.

Figura 3.6 – Posicionamento definitivo dos extensômetros para medições na Viga Nacional.

Os componentes instrumentados foram montados em veículo e as medições realizadas na pista de durabilidade acelerada padrão, a uma taxa de aquisição de 700Hz. Esta pista corresponde ao padrão para ensaio acelerado, definido pela área de testes para validação estrutural de componentes, sendo o critério de aprovação estabelecido em 50.000km de rodagem sem falhas, que equivale a 1.000.000km em condições de serviço.

Tabela 3.4 – Arquiteturas consideradas na medição das vigas.

Viga	Medição	Carga	Posição batentes	Altura das bolsas [mm]
Importada	1	13t	Eixo	260
	2	13t	Bolsas	243
	3	11,5t	Bolsas	243
Nacional	4	13t	Bolsas	243
	5	11,5t	Bolsas	243

Para estas medições, foram consideradas as versões de montagem dos batentes com o objetivo de realizar uma análise conclusiva do desempenho estrutural da Viga Importada nas diferentes arquiteturas, enquanto que para a Viga Nacional foi realizada somente a variação de carga na arquitetura de batente nas bolsas conforme Tabela 3.4.

3.5.2.3 Resultado das medições

Para o pós-processamento dos resultados, foram consideradas frequências até 40Hz e os limites dos materiais dos componentes da Tabela 3.5, como forma de verificação da existência de tensões acima do regime elástico Tabelas 3.6 e 3.7.

Tabela 3.5 – Limites Tensão Estáticas dos materiais dos componentes.

Viga	Material	Limite de resistência [Mpa]	Limite de escoamento [Mpa]
Importada	St52	490	355
Nacional	E380 TM	450	380

A tensão equivalente de von Mises foi utilizada como critério para a comparação dos limites de escoamento para avaliar a presença de deformações plásticas. Considerando o estado plano de tensões a equação 3.6 é válida quando as componentes de deformação plástica são pequenas.

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + \sigma_2^2 + \sigma_1^2} \quad 3.6$$

Os valores de von Mises para as duas medições mostram de imediato um desempenho inferior da Viga Importada, por conter mais eventos de deformação plástica, para todos os trechos medidos, Tabela 3.6. Para a Viga Nacional, os eventos ocorrem em maior frequência quando é aplicada a carga de 13t, Tabela 3.7.

Estes resultados não são conclusivos na determinação da vida dos componentes, porém pode ser utilizado como forma de comparação da expectativa de durabilidade da Viga Importada caso seja utilizado o seu projeto, sem modificações, em uma aplicação nacional, onde a durabilidade da Viga Nacional é satisfatória em campo.

Tabela 3.6 – Resultados de Tensões de von Mises [MPa] para a Viga Importada

VIGA IMPORTADA	Carga 13 t - batente eixo - altura bolsas 260 mm		Carga 13 t - batente bolsas - altura bolsas 243 mm		Carga 11,5 t - batente bolsas - altura bolsas 243 mm	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
R1	0	196	0	187	0	198
R2	0	276	0	256	0	249
R3	Deformação plástica		Deformação plástica		0	105
R4	Deformação plástica		Deformação plástica		Deformação plástica	
R5	0	206	Deformação plástica		0	206
R6	-----	-----	-----	-----	-----	-----
R7	0	185	Deformação plástica		0	191
R8	0	252	Deformação plástica		0	269
R9	Deformação plástica		Deformação plástica		0	330
R10	0	209	Deformação plástica		0	203
R11	Deformação plástica		Deformação plástica		Deformação plástica	
R12	Deformação plástica		Deformação plástica		Deformação plástica	
R13	0	245	Deformação plástica		0	237
R14	0	139	Deformação plástica		0	130
R15	Deformação plástica		Deformação plástica		Deformação plástica	
R16	0	234	0	240	0	238
R17	0	222	Deformação plástica		0	211

Tabela 3.7 – Resultados de Tensões de von Mises [MPa] para a Viga Nacional

VIGA NACIONAL	Carga 13 t - Batente bolsas - altura bolsas 243mmr		Carga 11,5 t - batente bolsas - altura bolsas 243 mm	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
R1	Deformação plástica		Deformação plástica	
R2	0	341	0	261
R3	0	208	0	167
R4	Deformação plástica		0	339
R5	Deformação plástica		0	288
R6	Deformação plástica		0	249
R7	0	166	0	157
R8	0	238	0	187
R9	0	290	0	228
R10	Deformação plástica		0	340
R12	Deformação plástica		Deformação plástica	
R13	Deformação plástica		0	351

Como forma de definir um critério de aprovação para o novo desenvolvimento, foi assumida que a confiabilidade da Viga Nacional, atualmente há mais de 15 anos no campo sem apresentar falhas. Esta foi a meta de desempenho estrutural considerada para o novo componente, que deve além disto, possuir uma menor massa e garantir a modularidade com a Viga Importada de aplicação atualmente na Europa.

Este critério estrutural possui um embasamento por experiência em serviço, que será comparado com um procedimento tecnológico de avaliação da durabilidade do material como parte deste projeto de pesquisa. Serão utilizados os sinais completos para uma análise de fadiga teórica de maior abrangência, e assim, prever se a versão Importada também não poderia ser aplicada com sucesso em uma aplicação mais severa.

3.5.3 Projeto da nova viga de suspensão

Dispondo dos requerimentos técnicos desejados, da arquitetura de concepção congelada e de um critério de aprovação, os ciclos de detalhamento podem ser iniciados com embasamento, evitando os retrabalhos por falta de definições.

Nesta etapa, o projeto é levado ao estágio de descrição completa de engenharia para um produto avaliado e possível de ser produzido, contendo sua disposição, forma, dimensões, tolerâncias e acabamento de todas as peças individuais, e a especificação dos materiais e processo de produção (DIETER, 1991).

Novamente, é reforçado o trabalho multifuncional para realizar esta entrega técnica por demandas de especialidades de distintas áreas. Segundo Dieter (1991) “a qualidade e as vantagens de custos de um produto são determinadas pelo nível de excelência do projeto detalhado”.

Para didática do texto, o ciclo de detalhamento continua até que um projeto maduro seja elaborado, do ponto de vista técnico, e possa ser informado às áreas internas e posteriormente ao fornecedor responsável pela fabricação.

3.5.3.1 Ciclo de projeto e simulações

Partindo da meta de peso estipulada para o novo componente, foram definidas algumas premissas iniciais para a criação das primeiras formas geométricas, semelhantes às da Viga Nacional, Figura 3.7.

Figura 3.7 – Premissas iniciais de projeto.

De acordo com as premissas, foram elaborados os primeiros modelos geométricos tridimensionais para posterior avaliação MEF, que se perpetuaram até que a conclusão do primeiro ciclo de detalhamento fosse alcançada, Figura 3.8. Como se trata de um desenvolvimento para atender a uma nova especificação de componente, a nova peça foi denominada de Global.

Figura 3.8 – Projeto base da Viga Importada e resultado do projeto da Viga Global.

A viga completa é um conjunto composto por diversos itens soldados formando a geometria final, sendo que a soldagem das duas metades é um dos processos de fabricação mais importante, realizado já com as partes internas previamente soldadas.

Apesar da geometria, no tocante aos pontos de interface ter a base Importada para garantia da intercambiabilidade, os requerimentos estruturais de desempenho foram definidos como sendo os atendidos pela versão Nacional.

Para avaliação das vigas, foi considerado o veículo carregado com 13t no eixo traseiro sendo que 1,3t corresponde à massa do eixo e 11,7t à massa suspensa atuando diretamente sobre a viga.

Os resultados para os casos de carregamento aplicados no dimensionamento são apresentados como valores de porcentagem da tensão von Mises em relação ao material de fabricação apresentados na Tabela 3.8, onde o aço E380TM é o material atualmente empregado na Viga Nacional e a para a Global foi sugerido o aço S460 MC.

Tabela 3.8 – Propriedades dos materiais empregados na análise MEF para comparativo de tensões.

MATERIAL	Modulo Elasticidade [MPa]	Limite Resistencia Tração [MPa]	Limite de Escoamento [MPa]
E380TM	210000	450	380
S460MC	210000	520	460

Os valores obtidos para a Viga Nacional conforme Figura 3.9 (a) foram assumidos como referência ao projeto da Viga Global que alcançou os resultados apresentados na Figura 3.9 (b). De acordo com os resultados, foi possível obter valores de tensões equivalentes em grande parte do componente, atendendo assim, às medidas de detecção adotadas ao aplicar a ferramenta DFMEA para o novo componente, que deve desempenhar conforme a Viga Nacional existente.

Figura 3.9 – Resultados MEF em porcentagem do Limite de Escoamento do material E380TM para a Viga Nacional (a) e S460MC para Viga Global (b).

O projeto foi então detalhado segundo cotas do modelo aprovado e tolerâncias absorvidas dos produtos existentes para confecção dos desenhos a fim de iniciar o ciclo de aquisição com as especificações definidas, Figura 3.10.

Figura 3.10 – Desenho detalhado da Viga Global.

Sendo o processo de conformação a quente o desejado para garantir a sinergia com a Europa, a partir deste momento, tratativas no detalhamento técnico do projeto e descrição do processo de fabricação em parceria com o fornecedor foram iniciadas até que o produto final fosse especificado, considerando também os aspectos de manufatura para o processo adotado.

3.5.4 Definição do Fornecedor

Ao fornecer a especificação do projeto na forma de desenhos e informar a premissa de preferência por um determinado processo de conformação para formar as duas metades do corpo da viga, diferentes propostas retornaram de acordo com a experiência de cada fornecedor. Com base em uma análise de valor interna foi gerada a Tabela 3.9 comparativa.

Tabela 3.9 – Retorno dos fornecedores.

PROCESSO AQUISIÇÃO	ANALISE DE VALOR	FORNECEDOR 1			FORNECEDOR 2			FORNECEDOR 3	
		Conformado a quente			Conformado a frio			Conformado a quente	
		1a. Prop	2a. Prop	3a. Prop	1a. Prop	2a. Prop	3a. Prop	1a. Prop	2a. Prop
CUSTO VIGA [%]	100	135	110	102	109	101	101	114	110
CUSTO FERRAMENTA [%]	100	107	107	96	148	107	107	303	269
PRAZO DESENVOLVIMENTO [dias]	-	210	210	210	300	300	240	300	300

As diversas propostas recebidas foram sendo atualizadas ao longo do processo mediante negociações comerciais embasadas no conteúdo técnico e contrapropostas. Este não se trata de um processo puramente técnico onde o engenheiro domina a argumentação, mas também um jogo de valores e prazos para colocação do pedido. Ou seja, de um lado está o projeto que precisa ser iniciado o mais breve possível, e do outro os interesses comerciais que tornam o processo moroso.

O resultado final levou à nomeação do fornecedor que apresentou a proposta próxima do valor de referência de custo peça e ferramental, considerando o critério de desempate como sendo o processo a quente, desejado pela equipe técnica, o menor prazo de desenvolvimento, e conseqüentemente, fornecimento de amostras para testes.

3.5.5 Conceito de manufatura

Como parte da investigação do processo de manufatura, foi realizado em conjunto com o fornecedor nomeado, um estudo do conceito de produção de conformação a quente para as duas metades, considerando a chapa entrando na prensa a 800°C. A partir daí, quatro estágios de operação foram elaborados conforme apresentado na Figura 3.11.

Figura 3.11 – Conceito do processo considerando quatro operações na prensa hidráulica.

Com base neste conceito de processo, foi fornecida uma simulação de estampagem pelo método MEF explícito, para verificação dos riscos de trincas oriundas do processo, Figura 3.12.

Figura 3.12 – Simulação do processo de estampagem para as duas metades (cortesia Empresa Delga)

Dos resultados obtidos, observa-se que há baixo risco de trincas localizadas nas dobras. O resultado desta avaliação pode ser visto como sendo a alteração da espessura ao longo das partes, Figura 3.13.

(a) Metade positiva da Viga Global

(b) Metade negativa da Viga Global

Figura 3.13 – Espessura resultante da simulação do processo (cortesia Empresa Delga).

A variação de espessura apresenta regiões de acréscimo e de decréscimo, que devem ser minimizadas por sugestões de modificação no projeto como parte do ciclo de otimização. Estas regiões foram também comparadas com as zonas de tensões obtidas das simulações estruturais com o objetivo de avaliar os riscos da falta de espessura em pontos críticos do dimensionamento. Para a metade negativa, Figura 3.13 (b), observa-se na região de dobra que a espessura se mantém próxima a 6 mm, conforme especificado pelo desenho, validando teoricamente o processo de manufatura concebido.

A sequência do processo de fabricação da viga segue o diagrama apresentado ilustrativamente na Figura 3.14 para efeito de registro das etapas subseqüentes ao processo de estampagem das metades principais.

Figura 3.14 – Processo confecção da Viga Global (cortesia Firma Delga).

A descrição do processo de fabricação permite identificar quais serão os trabalhos térmicos e mecânicos realizados no material base que deverão ser considerados no projeto do componente.

3.5.6 Propostas de otimização do produto referente ao processo

De acordo com o processo adotado e dos resultados obtidos na simulação de conformação, algumas limitações levaram a discussões em torno da geometria, tolerâncias e raios de dobra, além de demandar alguns elementos de posicionamento para o processo de conformação, Figura 3.15.

Figura 3.15 – Solicitações de modificações devido às limitações do processo.

Estas solicitações foram incorporadas ao projeto resultando na especificação final geométrica do novo componente. Para que o ciclo de projeto fosse concluído, a definição de um material que após o processo de conformação a quente seria o último passo para atender às metas de resistência estrutural e de peso.

3.5.7 Seleção do material para a Viga Global

Para o caso em estudo, o objetivo foi determinar um aço de qualidade que atendesse o requerimento do Limite de Escoamento (S_e) mínimo de 460MPa, para atender ao critério de similaridade com a Viga Nacional. E também, que esta propriedade se sustentasse após o processo de conformação a quente, com a chapa aquecida na entrada da ferramenta a aproximadamente 800°C.

Neste contexto, alguns materiais foram submetidos a ensaios de tração depois de aquecidos a 800°C e resfriados ao ar calmo, para a determinação do parâmetro do Limite de Escoamento, tida como métrica principal para a seleção do ciclo de otimização. A Tabela 3.10 apresenta os materiais ensaiados e os valores resultantes.

Tabela 3.10 – Limites de Escoamento para materiais submetidos a 800°C de aquecimento.

MATERIAL	LIMITE ESCOAMENTO CHAPA RESFRIADA - 800°C [MPa]				MÉDIA
	CP01	CP02	CP03	CP04	
LNE 400	396,6	381,2	403,1	379,5	390,1
LNE 500	497,4	449,9	448,5	467,8	465,9
LNE 700	463	485	491	476	478,75

Conforme disponibilidade e devido aos resultados obtidos nos ensaios de tração para os valores de Limite de Escoamento, foi selecionado o material LNE700 para a confecção da viga de suspensão em estudo.

Para o acabamento superficial foi definido o processo de jateamento por granalhas das metades para limpeza antes de entrar no processo de soldagem. Este processo produz um acabamento liso e brilhante, retirando as impurezas, porém sem endurecer a superfície do material.

Neste momento é importante mencionar que a seleção foi realizada com base somente em um parâmetro mecânico e que no próximo capítulo novas propriedades serão investigadas como parte do projeto de pesquisa com o objetivo de propor um estudo mais avançado ainda na fase de projeto considerando o material e o processo de forma mais abrangente.

3.6 CONCLUSÕES

Este capítulo abordou a fase de projeto de forma estruturada e prática considerando os ciclos propostos de detalhamento, aquisição e otimização aplicando ferramentas para aumentar a confiabilidade estrutural do desenvolvimento da viga de sustentação da suspensão.

A partir de um DFMEA foi possível determinar a necessidade de coleta das informações relevantes de desempenho estrutural. Partiu-se da experiência com produtos existentes para a criação de um novo componente com o suporte de ferramentas virtuais de criação de geometrias por meio de CAD, verificação e definição da geometria final por meio de simulações MEF, avaliação do desempenho desejado por meio de medições com extensômetros, definição do conceito de manufatura por meio de conceituação e simulação do processo e por fim, de uma seleção de materiais com base nas necessidades do processo.

Esta estruturação permitiu a criação de um projeto maduro, com foco técnico e econômico, que atende aos requerimentos de confiabilidade e processo de fabricação com respeito ao resultado geométrico (forma e tolerâncias) bem como na seleção do material e acabamento superficial.

Além disto, da forma como os três ciclos foram realizados, foi possível concluir esta fase com importantes definições a respeito do que, como e por quem o componente será manufaturado.

Em comparação com o método tradicional de realizar projetos, a consolidação desta proposta, com maior volume de avaliações teóricas e experimentais básicas nesta fase, leva para a próxima etapa as decisões fundamentais. Estas decisões foram realizadas pelo grupo multifuncional, e comunicadas de forma clara aos participantes do projeto, criando um ambiente de confiança e motivação para os próximos desafios.

Esta preocupação interdisciplinar deve estar continuamente presente no comportamento de um profissional de engenharia moderno, de forma a contribuir não somente no aspecto técnico do projeto, mas também o impacto econômico e de que maneira será produzido. Quanto mais cedo esta percepção se evidenciar, melhor será a velocidade de integração e os resultados apresentados serão mais consistentes do ponto de vista de contribuição para a confiabilidade do desenvolvimento.

3.7 REFERÊNCIAS

COOPER, Robert G. **Winning at new products: Accelerating the process from idea to launch**, 3rd edition, Cambridge: Perseus Books, 2001.

DALLY, J.W. **Experimental Stress Analysis**, 3rd edition, New York: McGraw Hill, 1991.

DIETER, G. E. **Engineering Design**, 2nd edition, New York: McGraw Hill, 1990.

O'CONNOR, PATRICK, D. T. **Practical Reliability Engineering**, 3rd edition, Chichester: John Wiley & Sons, 1991.

GROOVER, M. P., **Fundamentals of Modern Manufacturing: materials, process and systems**, 3rd. Edition, Chichester: John Wiley & Sons Inc., 2007.

ROZENFELD, H. et al. **Gestão de Desenvolvimento de Produtos: Uma referência para a melhoria do processo**. São Paulo: Saraiva, 2006

SPINELLI, D. M.; COSTA, A. Virtual Engineering Tools application and planning in a vehicle development context, In: **XVIII Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva SIMEA 2010**, publicado em meios eletrônicos (CD-ROM), p. 1/15, v.1, São Paulo-SP, Brasil, 2010.

CAPÍTULO 4 – QG3: FASE DE PROTÓTIPO

4.1 DETALHAMENTO DO PROCESSO DE MANUFATURA

Segundo Groover (2007), a conformação realizada com o material acima da temperatura de recristalização definida como $0,5T_m$ (onde T_m é a temperatura de fusão do material em Kelvin) evita a necessidade de utilização de prensa de grande potência no processo de fabricação e permite a imposição de grandes deformações plásticas ao material.

4.1.1 Definição da temperatura de conformação

Segundo o processo de fabricação projetado para a conformação das duas metades principais da nova Viga Global, a temperatura de entrada na ferramenta foi especificada segundo a capacidade instalada dos fornos para aquecimento limitado a 850°C . Tendo em vista que a T_m dos aços de baixo carbono de acordo com o diagrama Fe-C fica em torno de aproximadamente 1600°C ($1600 + 273 = 1873\text{K}$) o que resulta na temperatura de 664°C , o que mostra que a temperatura de 850°C de entrada na ferramenta está acima da temperatura de recristalização o que comprova fabricação da Viga Global pode ser considerado de conformação a quente.

Com esta definição, teremos conforme coloca Groover (2007) obtém-se vantagens na forma final de cada estágio de conformação, a exigência de forças menores para conformar o material, propriedades de resistência final isotrópica devido à ausência de uma estrutura contendo grãos orientados típicos da conformação a frio e baixo endurecimento local oriundo do trabalho de conformação, mantendo a ductilidade original do material.

As desvantagens que devem ser consideradas no processo serão a baixa precisão dimensional, a energia empregada no processo, a oxidação superficial, baixa qualidade do acabamento superficial e uma menor durabilidade das ferramentas.

Além disto, ainda segundo Groover (2007), como a recristalização envolve mecanismos de difusão dependentes do tempo e as operações de conformação são realizadas a elevadas velocidades, não há tempo suficiente para que ocorra uma recristalização granular completa da estrutura durante os ciclos de deformação. No entanto, devido às altas temperaturas, a recristalização ocorre efetivamente após o processo de conformação ou enquanto as partes esfriam ao ar. Esta ocorrência e o amolecimento gerado quando em temperaturas elevadas, distinguem a conformação a quente da conformação a frio.

4.1.2 Projeto detalhado do processo de conformação

O projeto detalhado do ferramental de conformação segue a concepção apresentada no capítulo anterior considerando a existência de quatro estágios de deformação que correspondem às etapas: preparação, primeiro e segundo estágio de conformação e calibração das dimensões finais do componente.

Segundo Karbasian & Tekkaya (2010), a conformação de aços com parâmetros elevados de resistência mecânica demandam um rigoroso controle de temperatura e tempos, e estão diretamente ligados com a formação total ou parcial de martensita na sua microestrutura. Este é, assim, um processo termomecânico que deve considerar a transformação de fase do material.

A velocidade de resfriamento do aço durante o processo de conformação e subsequentemente durante o resfriamento após o processo torna-se relevante para o projeto, pois impacta diretamente na microestrutura resultante. O trabalho de Naderi et al. (2011) mostra a importância do equilíbrio entre ferrita e martensita na estrutura final

para que o componente apresente elevada resistência mecânica, porém, apresentando ainda uma boa ductilidade.

4.2 ENSAIOS DOS MATERIAIS EM CORPOS DE PROVA

Segundo Naderi et al. (2011) a retirada de corpos de prova para realização dos ensaios mecânicos diretamente do componente permite avaliar a ocorrência de processo de endurecimento por deformação na microestrutura resultante e, consequentemente, avaliar as propriedades mecânicas que estarão realmente atuando durante a operação do componente em serviço.

Assim, neste trabalho, os corpos de prova foram retirados diretamente dos componentes manufaturados de acordo com o processo originalmente definido. A Viga Nacional (aço E380TM) conformada pelo processo a frio e as vigas Importada (aço St52) e Global (aço LNT 700) pelo processo de conformação a quente.

Todos os corpos de prova utilizados nos ensaios foram extraídos na direção transversal da viga conformada, Figura 4.1 (a) com o formato mostrado na Figura 4.1 (b), tendo em vista que esta direção foi a que apresentou nos ensaios de tração os menores parâmetros de resistência à tração

Figura 4.1 – Esquema mostrando a posição da retirada dos corpos de prova utilizados nos ensaios mecânicos. a) na viga .b) formato dos corpos de prova

A geometria e as dimensões dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração e de fadiga de baixo ciclo estão mostradas na Figura 4.2. Segundo Milan et.al, (2001), esta geometria de corpo de prova minimiza a ocorrência de flambagem nos ensaios de fadiga sob razão de deformação $R = -1$. Os corpos de prova para o ensaio de fadiga, após usinagem, foram retificados e polidos manualmente com lixa com granulometrias decrescentes até atingir uma rugosidade superficial média de aproximadamente $0,25 \mu\text{m}$, na região do comprimento de controle da deformação total.

Figura 4.2 – Geometria e dimensões dos corpos de prova do material.

4.3 SELEÇÃO DO MATERIAL QUANTO AO DESEMPENHO ESTRUTURAL

Nesta seção é apresentado um método de avaliação do material quanto ao desempenho estrutural considerando as informações das propriedades do material considerando a influência do processo de manufatura e as informações dos carregamentos medidos em trecho padrão de homologação.

Este método procura extrapolar os atuais métodos computacionais com base em análises pelo Método dos Elementos Finitos, que determinam a vida teórica do componente de acordo com a região mais propensa ao surgimento de uma trinca.

De acordo com Braccesi (2007) o grande desafio na aplicação de métodos numéricos é a existência de carregamentos multiaxiais que tornam a avaliação por

meios computacionais, bastante complexas para as teorias de fadiga multiaxiais clássicas Tensão – Vida e Deformação – Vida.

Assim, uma proposta que combine as teorias de fadiga atualmente aplicadas em modelos uniaxiais em conjunto com avaliações dos dados experimentais, para criação de um modelo de cálculo do dano por meio de uma análise localizada, pode ser uma alternativa para acessar e confirmar a seleção de material para um determinado componente, que garanta teoricamente a confiabilidade estrutural desejada.

4.3.1 Propriedades monotônicas dos materiais (S_e , S_u , E , RA , Dureza)

Segundo Callister (2000) as propriedades mecânicas mais simples de se obter para um material resultam de um ensaio de tração e medidas de dureza do material. N

No ensaio de tração, a curva de força versus deslocamento é levantada e diversas propriedades são retiradas para caracterizar o comportamento do material quando submetido a um carregamento axial de tração.

A curva mostrada na Figura 4.3 mostra duas curvas de Tensão – Deformação sendo que a inclinação da parte elástica, denominada de Modulo de Elasticidade (E) varia com a temperatura.

Figura 4.3 – Curva Tensão – Deformação para um mesmo material ensaiado a diferentes temperaturas.

Os parâmetros de resistência e ductilidade mais importantes dos materiais metálicos, que são obtidos da curva Tensão - Deformação em um ensaio de tração, estão mostrados esquematicamente na Figura 4.4 (a), (b) e (c).

Figura 4.4 – Principais parâmetros de resistência e ductilidade obtidos do ensaio de tração.

Para a maioria dos materiais, a determinação precisa do limite de elasticidade é muito trabalhosa, pois a transição entre o regime elástico-linear e o regime elasto-plástico na curva Tensão - Deformação ocorre, em geral, de uma maneira não bem definida. Assim sendo, é prática comum na engenharia definir um valor de tensão, chamado de limite de escoamento (S_e), para um valor estipulado por norma de ensaio mecânico de tração. Pela norma ASTM E8/E8M – 09 o valor do limite de escoamento é obtido traçando-se uma reta paralela à reta linear-elástica do gráfico e deslocada de 0,002 ou 0,2% no eixo da deformação, Figura 4.4(a).

O limite de resistência à tração (S_u), mostrado esquematicamente na Figura 4.4 (b) ocorre após o limite de escoamento, quando o valor de tensão aplicada alcança o seu valor máximo. A partir deste ponto máximo, a tensão de engenharia começa a decrescer devido ao aparecimento do fenômeno conhecido como estricção. Este fenômeno ocorre devido a existência de irregularidades geométricas ou estruturais no corpo de provas, que provocam o surgimento de deformação plástica localizada, que gera um estado triaxial de tensões nesta região, levando a uma redução local área da seção transversal do espécime, provocando assim a sua fratura.

O parâmetro de ductilidade à fratura mostrada na Figura 4.4 (c) representa uma medida do grau de deformação plástica que foi suportado pelo material na fratura. Os parâmetros de ductilidade podem ser representados pelo valor do alongamento percentual (AL%) ou a redução percentual da área (RA%). Indica o quanto a estrutura irá se deformar antes de fraturar assim como fornece uma estimativa da porcentagem de deformação permissível em um processo de fabricação por conformação a frio.

Outros parâmetros podem ser retirados desta curva, como a Resiliência, capacidade do material de suportar a absorção de energia e recuperá-la após o descarregamento, e a Tenacidade que é a capacidade do material em absorver energia na região plástica da curva.

O ensaio de dureza é um ensaio monotônico que mede a resistência à penetração de um indentador na superfície de uma amostra metálica previamente preparada. São ensaios rápidos e não destrutivos, podendo também ser utilizados para estimar as propriedades mecânicas de tração e fadiga dos materiais metálicos. Os tipos de ensaios de dureza mais usados em engenharia são Rockwell (Figura 4.5), Brinell e Vickers.

Figura 4.5 – Procedimento para ensaio de dureza tipo Rockwell – B.

4.3.2 Filosofia de projeto com foco na análise de durabilidade

Diversos métodos foram desenvolvidos ao longo dos anos desde os primeiros estudos por realizados Albert que em 1837 publicou os primeiros resultados dos ensaios de fadiga conhecidos e logo após Rankine, mais conhecido na área de termodinâmica, que em 1842 discutiu a resistência à fadiga em eixos de trem. O termo Fadiga foi definido por Braithwaite em 1854 em um trabalho que descreve falhas em diversos equipamentos mecânicos e também tensões limites para carregamentos alternados. O foco dos trabalhos foi bastante orientado aos eixos de vagões de trem que ao fraturarem causaram sérios acidentes neste período.

A maneira de como projetar a vida de componentes submetidos a fadiga surgiu com Wöhler em 1860, como resultado de estudo de durabilidade em eixos ferroviários que partiu de medições realizadas em 1854 por meio de extensômetros desenvolvidos por ele mesmo. Em 1870 foi publicado o trabalho final contendo a seguinte conclusão conhecida com a Lei de Wöhler: “Materiais podem ser induzidos a falhas devido a repetições de tensões, mesmo quando abaixo do limite elástico. A ruptura não se dará para um certo valor limite de amplitude, qualquer que seja o número de solicitações”. E considerando a existência de uma vida finita, Wöhler propôs a aplicação de coeficientes de segurança como forma de projetar componentes seguros.

Segundo opinião de Schutz (1996), Wöhler se difere da maioria de seus antecessores e alguns predecessores por sempre ter em mente os problemas básicos que um engenheiro deve resolver quando projetando contra a falha por fadiga: os carregamentos e as tensões permitidas devem ser conhecidas.

O próximo trabalho sobre vida finita veio somente 75 anos depois com Almen e Boegehold para sistema de engrenamento tipo coroa e pinhão, o que mostra a visão de vanguarda que Wöhler criou há um século.

A representação em tabela dos resultados de Wöhler foi colocada em curvas por Sangerberg e então denominadas de curvas de Wöhler (S-N) a partir de 1936. Estas curvas foram tratadas por Basquin em 1910, representando a região de vida finita em termos logarítmicos.

Entre 1905 e 1920, ocorreu um domínio dos Ingleses e Americanos, referente ao número de publicações sobre fadiga, quando nomes como Smith, Haigh, Gough, Griffith, Inglis, Kommers, Moore, etc., se sobressaíram em termos de publicações. Porém segundo Schutz (1996) a partir de 1925 e até 1943, os alemães voltaram a produzir conhecimento sobre fadiga e superar outros países em termos de publicações, Figura 4.6.

Figura 4.6 – Quantidade de publicações sobre Fadiga no período de 1925 a 1945 (Schultz, 1996)

No início deste período o sueco Palmgren escreveu o renomado trabalho sobre acúmulo de danos o que posteriormente ficou conhecida como regra de Palmgren-Miner devido aos trabalhos experimentais de Miner em 1945. Além disto, Palmgren iniciou nesta época os estudos probabilísticos de falhas definindo a vida B_{10} como um critério de projeto.

Outro pesquisador alemão que contribuiu com diversas publicações foi Thum, que criou o fator de concentração mais importante, conseguiu consolidar o conhecimento dissipado em inúmeras publicações da época e os adaptou em uma forma que engenheiros possam compreender. Assim segundo Schutz (1996) Thum não somente conduziu testes, mas descreveu conclusões úteis e por isto teve seu trabalho utilizado pelos seus contemporâneos e sucessores, pois colocou novamente o ensaio de componentes a favor dos ensaios em corpos de provas como forma de garantir a resistência à fadiga em condições de serviço.

No início de 1955, após acidentes com modelos de aeronaves como o Comet e o Eletra, discussões se firmaram em torno da segurança à falha (*fail safe*) e vida segura (*safe life*). Vida segura significando que o componente deve ser sucateado ao final de sua vida determinada e segurança à falha significa que o colapso em um componente não deve trazer risco à segurança na operação.

Em 1958 dois grandes rotores de turbina a vapor falharam durante testes assim como diversos foguetes. Em todos os casos a causa foi de materiais com defeitos internos o que gerou certa insegurança por parte dos Estados Unidos. No mesmo ano Irwin assumiu antigas ideias de Griffith e percebeu que o fator de intensidade de tensão seria um fator determinante para tensões estáticas em componentes no estado fissurado, nascendo a Mecânica da Fratura Elástica Linear (LEFM) que se desenvolveu rapidamente no caso de fratura estática e posteriormente em carregamentos cíclicos.

Deste ponto em diante, assume-se que a especialidade de projeto considerando a teoria de fadiga expandiu-se e diversos trabalhos foram publicados considerando as fontes básicas de análise de vida por tensão (S-N), vida por deformação ($\epsilon - N$) e vida pelo mecanismo de propagação de trinca (da/dN) e correspondente avaliação de acúmulo de danos com base na contagem de ciclos (*Rainflow cycle counting*) e a regra de Palmgren-Miner, ainda utilizada por sua simplicidade e robustez nos resultados.

Para este trabalho, algumas outras técnicas se fazem relevantes devido ao foco localizado que a proposta se refere. Atualmente existem ferramentas computacionais que aplicam a teoria desenvolvida para a determinação da vida de componentes.

Segundo Santos et al. (2004), o método de tensões localizadas é amplamente utilizado em processos computacionais de avaliação da fadiga do material, que envolve isolar a região crítica potencial e determinar a vida em fadiga de forma independente. Por isolar a região crítica potencial, um componente complexo é tratado como um número individual de amostras sujeitas ao fenômeno de fadiga e a vida do componente será definida pela vida destas posições críticas.

Para Wannenbourg et al (2009), a prática comum na indústria automobilística é a aplicação de métodos numéricos que utilizam parâmetros de Tensão – Vida, combinados com análises dinâmicas pelo Método dos Elementos Finitos com base em extensivas medições para se determinar a vida em fadiga e posteriormente avaliadas por intensivos testes de durabilidade.

Muitos componentes estruturais estão sujeitos a histogramas de tensões aleatórios, multiaxiais, e com as direções principais das amplitudes de tensão e deformação variando a cada ciclo de carregamento. Conforme Han et al (2002), a fadiga uniaxial sob carregamento aleatório já foi bastante estudada e um grande número de algoritmos estão disponíveis. Porém segundo Draper (2008), o uso de métodos uniaxiais para análise de fenômenos multiaxiais pode levar a uma estimativa bastante otimista da vida para determinado componente.

Uma proposta que possa combinar as técnicas de determinação local de carregamentos e deformações e as teorias desenvolvidas para previsão de vida até o surgimento de uma trinca, a fadiga multiaxial e ensaios em materiais, parecem ser bastante promissoras como metodologia de seleção de materiais para componentes metálicos e esta reproduzida da maneira estruturada como a que se deseja propor com este trabalho.

4.3.3 Projeto e análise de fadiga com base na deformação

A base do método Tensão - Vida é o diagrama de Wöhler ou S-N, que é um gráfico da tensão alternada, S, e o número de ciclos para falhar, N. O levantamento das curvas S-N para o material é atualmente realizado sob carregamento axial com base na falha do corpo de provas e não no início da trinca.

De acordo com Lee (2005) o método clássico para análise de fadiga com base na tensão funciona bem para situações em que apenas tensões elásticas estão presentes. O método para análise de vida local por deformação é preferido nos casos em que deformações plásticas estão presentes, se a história de carregamento é irregular, e quando a tensão média e sequência de carregamento é relevante ao material.

Segundo Spinelli (2006), um dos maiores defeitos da aproximação de tensão-vida é que ignora o comportamento tensão-deformação verdadeiras e trata todas as deformações como elásticas. Isto pode ser significativo, pois a iniciação de trincas por fadiga é causada por deformação plástica microscópica, pela formação de intrusões e defeitos. As hipóteses simplistas da aproximação S-N são válidas apenas se as deformações plásticas são pequenas. O limite de fadiga é devido a elementos intersticiais, tais como o carbono ou o nitrogênio no ferro, que bloqueiam as discordâncias. Isto impede que os mecanismos de escorregamento destes átomos ocorram, o que leva à formação de micro trincas.

Segundo Draper (2004), a análise de fadiga localizada presume que a vida para início de uma pequena trinca é determinada por uma sequência de tensões e deformações em um pequeno volume de material no ponto de formação da trinca. Consequentemente, se esta mesma sequência é reproduzida em um espécime do mesmo material, a mesma vida a fadiga é esperada, Figura 4.7.

Figura 4.7 – Vida em fadiga baseada na reprodução das Tensões – Deformações localizadas.

4.3.4 Propriedades cíclicas dos materiais

A resposta cíclica transiente de um material descreve o processo de mudança na resistência do material à deformação devido ao carregamento cíclico que pode responder de forma a endurecer ou amolecer ciclicamente.

Segundo Lee (2005) é possível tratar os ciclos transientes como parte dos ciclos estabilizados, pois a porcentagem de ciclos nesta condição de resposta é relativamente pequena se comparada com a vida total.

Figura 4.8 – Curva cíclica de tensão-deformação estabilizada (DRAPER, 2004)

É possível colocar em um gráfico os ciclos de histereses de tensão-deformação estabilizados em um gráfico, que usualmente ocorre na metade da vida em fadiga. O

ciclo de histerese definido pela amplitude de deformação total e a amplitude de tensão total representa o trabalho elástico e plástico em um material sofrendo carga e descarga, Figura 4.8.

A equação 4.1 de Ramberg-Osgood (1943, apud DRAPER, 2004) assume que a curva de amplitude de tensão em função da amplitude de deformação pode ser definida como a curva monotônica de tensão-deformação.

$$\varepsilon_a = \varepsilon_a^e + \varepsilon_a^p = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K} \right)^{1/n'} \quad (4.1)$$

É também válido que muitos materiais metálicos, que possuem um comportamento simétrico em tração / compressão, sendo que a equação 4.1 pode ser reescrita em termos das faixas de tensão e deformação considerando os coeficientes cíclicos para as histereses:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\Delta \varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \frac{\Delta \sigma}{2E} + \left(\frac{\Delta \sigma}{2K'} \right)^{1/n'} \quad (4.2)$$

Sendo que o coeficiente K' e o expoente de encruamento cíclico n' são respectivamente a intersecção e a inclinação na reta que melhor se aproxima dos pontos da amplitude de tensão $\frac{\Delta \sigma}{2}$ - amplitude de deformação plástica $\frac{\Delta \varepsilon_p}{2}$ colocadas em um gráfico de escala log – log.

Segundo Draper (2004), a curva de histerese é muitas vezes referenciada como “o dobro da curva cíclica tensão-deformação” e o “fator 2” é a hipótese de Masing (1926 apud DRAPER, 2004), Figura 4.9.

Figura 4.9 – Histereses monotônicas e cíclicas de Tensão – Deformação.

Um espécime pode ser submetido a carregamentos cíclicos com amplitudes de deformação constante até que uma trinca se desenvolva. Os resultados deste teste podem ser colocados em um gráfico log-log de tensão x vida, Figura 4.10, originando a relação linear de Basquin (1910) com base na Amplitude de tensão:

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (4.3)$$

b – expoente de resistência à fadiga (expoente de Basquin);

σ'_f - coeficiente de resistência à fadiga, amplitude;

N'_f - Número de ciclos para falha.

Figura 4.10 – (a) Gráfico de amplitude de deformação – amplitude de tensão (b) Gráfico de amplitude de tensão - n° reversos

Os resultados também podem ser colocados em termos da deformação em um gráfico log-log, Figura 4.11, sendo que a relação de deformação-vida pode ser obtida considerando os componentes plásticos e elásticos da deformação total originando a equação de Manson e Coffin com base na amplitude de deformação:

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (4.4)$$

c – expoente de ductilidade à fadiga (expoente de Coffin – Manson);

ϵ'_f - coeficiente de ductilidade à fadiga, amplitude de def. plástica a $2N_f = 1$;

E – Módulo de elasticidade.

Figura 4.11 – (a) Gráfico de amplitude de deformação – amplitude de tensão (b) Gráfico de amplitude de deformação - n° reversos

Na Figura 4.11 (b), o ponto de transição da vida em fadiga é definido como a intersecção das retas, quando a magnitude da amplitude elástica se iguala a da plástica sendo que a região à esquerda é considerada dominada pela deformação plástica, e referenciada como fadiga de baixo ciclo. A região do lado direito é a região dominada pela deformação elástica e referenciada como fadiga de alto ciclo.

4.3.4 Propriedades cíclicas dos materiais

Conforme apresentado, para a realização de análise de deformação-vida à fadiga, é necessário o conhecimento dos parâmetros monotônicos e cíclicos do material são necessárias. O principal equipamento de testes utilizado para a condução dos ensaios é um dispositivo de carga axial servo-hidráulico onde são acoplados extensômetros de alta qualidade utilizado para medir as deformações, que são usadas como retorno aos controladores, Figura 4.12.

Figura 4.12 – Diagrama esquemático dos ensaios de fadiga controlado por deformação (LEE, 2005)

Os ensaios de fadiga de baixo ciclo foram realizados sob controle de deformação total e a componente plástica da deformação foi determinada pela relação:

$$\Delta \varepsilon_p = \Delta \varepsilon_t - \Delta \varepsilon_e \quad (4.5)$$

Sendo $\Delta \varepsilon_t$ a deformação total imposta e $\Delta \varepsilon_e$ a deformação elástica que é obtida pelo quociente da amplitude de tensão pelo módulo de elasticidade, isto é:

$$\Delta \varepsilon_e = \frac{\Delta \sigma}{E} \quad (4.6)$$

Pela norma ASTM E606-04, E é o módulo de elasticidade determinado em um ensaio de tração ou em um ensaio de fadiga no primeiro $\frac{1}{4}$ de ciclo. Já a norma PrEN3988:1988 determina que E seja calculado na meia vida da histerese, utilizando-se o carregamento (E_1) e o descarregamento (E_2). Os módulos E_1 e E_2 são diferentes e a deformação plástica e a elástica variam durante o ensaio de ciclo para ciclo, em função do comportamento do material de amolecer ou endurecer ciclicamente. Segundo as normas BS 7270:1990 e a ISO/DIS 12106, a determinação da componente de deformação plástica se faz diretamente na curva de histerese de meia vida. Estas diferenças podem ser visualizadas na Tabela 4.1 e Figura 4.13.

Tabela 4.1 – Métodos para determinação da deformação plástica nas curvas de histereses

Norma	Método para determinação de $\Delta \varepsilon_p$	
BS 7270:1990	Na amplitude da curva de histerese, determinada na tensão média (segmento d-b na Figura 4.13).	
ASTM E606-92	$\Delta \varepsilon_p = \Delta \varepsilon_t - \frac{\Delta \sigma}{E}$	onde E é o módulo de elasticidade determinado no ensaio de tração ou no ensaio de fadiga no primeiro $\frac{1}{4}$ de ciclo.
ISO / DIS 12106	Mesma metodologia da BS 7270:1990.	
PrEN 3988:1998	$\Delta \varepsilon_p = \Delta \varepsilon_t - \frac{\Delta \sigma}{E_m}$	(segmento f-e na Figura 4.13) onde E_m é a média entre os módulos de elasticidade [$E_m = (E_1 + E_2)/2$].

Segundo KANDIL (1999), as diferentes metodologias de ensaio podem apresentar valores de deformação plástica que podem variar mais de 30%, dependendo da norma empregada e do programa utilizado pela máquina na realização do ensaio de fadiga.

Para Lee (2005), o alinhamento dos componentes também é essencial para as medições acuradas das constantes de deformação-vida do material e deve ser cuidadosamente avaliada, pois pode causar uma rotação ou descentralização da linha central de carga sob o corpo de prova.

Figura 4.13 – Definições para determinação do $\Delta\epsilon_p$, ISO 12106 / PrEN 3988 segundo KANDIL (1999).

Os ensaios de fadiga de baixo ciclo foram realizados sob controle de deformação e monitorados pelo programa MPT da MTS, programado de acordo com a norma ASTM E606 - 04. Utilizou-se, para controle de deformação, um extensômetro MTS 632.26F-20 com distância inicial entre facas de 8,0 mm. Os ensaios foram realizados em uma máquina servo-hidráulica MTS-810 de 100 kN de capacidade máxima, em onda senoidal, com frequência variando entre 0,5 Hz a 3Hz, dependendo do nível de deformação imposto, isto é, para altas taxas de deformação foram empregadas baixas frequências e vice-versa. As amplitudes de deformação variaram de 0,2% a 0,4%, a fim de se obter a falha (vida) entre 10^3 e 10^6 ciclos.

O procedimento adotado neste trabalho para a escolha do tamanho da amostragem utilizada para a obtenção da curva deformação-vida foi baseado no tipo de ensaio do programa de obtenção de dados para projeto, conforme descrito na norma ASTM E739-10, que está baseado no Manual sobre Planejamento Estatístico e Análises para Experimentos em Fadiga, STP 588, que se fundamenta nos valores das faixas percentuais de replicações apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Tipos de testes de acordo com a porcentagem de replicação (ASTM E739-10)

Tipo de teste	Replicação (%)
Teste preliminar e exploratório	de 17 até 33
Teste de pesquisa e desenvolvimento de componnetes e espécimes	de 33 até 50
Dados permissíveis para projeto	de 50 até 75
Dados confiáveis	de 75 até 3388

O cálculo da % replicação é dado pela equação 4.7, como segue:

$$R = 100 \frac{N_D}{N_A} \quad (4.7)$$

N_D = nº total de diferentes níveis de deformação

N_A = nº total de amostras

4.4 FERRAMENTAL E PROTÓTIPOS DA VIGA GLOBAL

4.4.1 Resultados do projeto da ferramenta

Com foco no processo de estampagem das duas metades da viga, que diferencia o produto e pode causar alterações nas propriedades do material e geometria nas regiões críticas de tensão, foi definido um processo de estampagem seguindo quatro etapas de conformação: 1-Formar as cabeças, 2-Pré-Formar, 3-Formar, 4-Calibrar forma e criar o chanfro na espessura da chapa.

A Figura 4.14 (a) e 4.14 (b) mostram a geometria final desenvolvida para o conceito da matriz e do punção para conformação das duas metades que compõe a

Viga Global que serão, em um processo posterior de manufatura, soldadas formando o corpo final da viga.

Neste processo também estará sendo cunhando um chanfro no perfil das abas, portanto, as peças deverão estar com as abas para cima na sua formação.

Figura 4.14 – Ferramental de estampagem para as metades da Viga Global (cortesia Firma Delga).

A base inferior da matriz foi definida como sendo de aço fundido GS18 e a superior do punção em aço SAE1020 para garantir a ductilidade e consequente absorção da energia de impacto na prensagem.

O material do punção e da matriz foi definido com sendo um aço para estampagem a quente H-13 (46 – 50 HC), tratados termicamente e posteriormente usinados individualmente na forma fornecida pelo projeto detalhado.

O calço de altura de trabalho da matriz (*die shoe*) e a placa de extração superior são fundidos, exclusivas para cada metade do corpo da viga, e contém cilindros de nitrogênio para resfriamento da ferramenta.

4.4.2 Fabricação do primeiro lote protótipo

Passado o tempo necessário para confecção dos ferramentais, as primeiras amostras da Viga Global foram obtidas segundo o processo definitivo, porém ainda com meios de deslocamento provisórios, ou seja, as chapas quentes foram posicionadas manualmente de um estágio para o outro.

Figura 4.15 – Estágios de fabricação dos primeiros componentes conformados a quente

O fabricação dos primeiros componentes conformados a quente foram executados após passado o tempo necessário para a confecção do ferramental e pode ser visualizado conforme Figura 4.5.

Durante este processo manual foram avaliadas as temperaturas resultantes em cada etapa para que se tivesse uma ideia da velocidade de resfriamento durante a manufatura das duas metades principais do componente. A Tabela 4.3 mostra a variação de temperatura em cada etapa do processo.

Tabela 4.3 – Variação da temperatura do componente durante as etapas do processo de conformação.

Estágio do Processo	Temperatura [oC]	Tempo [s]
Primeiro	850	5
Segundo	740	8
Terceiro	660	8
Quarto	550	8
Resfriamento	Ar	-

Para considerar o trabalho mecânico a quente, realizado no processo de estampagem, que se inicia com a chapa cortada entrando a 850°C no primeiro estágio da ferramenta, logo após aquecimento em forno, foi decidido utilizar corpos de provas retirados diretamente do componente conformado segundo a Figura 4.16.

Figura 4.16 – Dimensões dos corpos de prova para caracterização cíclica dos materiais.

4.5 RESULTADOS DE ANÁLISE DOS MATERIAIS

4.5.1 Composição química dos Materiais

Os três aços carbono investigados, laminados a quente, aplicados nos projetos das vigas, foram avaliados em sua composição química. A Tabela 4.4 fornece a composição química em percentagem em peso. A análise química foi realizada por espectrometria de emissão ótica.

Tabela 4.4 – Composição química dos aços (% em peso)

Material	Aplicacao	C	Si	Mn	P	S	Al	N	Ni	Cr	Mo	Nb	Ti	B
E380TM	Nacional	0,09	0,07	1,04	0,018	0,005	0,039	NA	ND	ND	ND	0,03	ND	ND
St52	Importada	0,15	0,02	0,76	0,02	0,014	0,023	NA	NC	NC	NC	0,03	ND	ND
LNE700	Global	0,09	0,08	1,45	0,015	0,004	0,026	NA	0,01	0,5	ND	0,03	0,068	ND

NA - Não analisado

ND - Não detectado

A grande diferença na composição química do material LNE700, utilizado na fabricação da Viga Global, é a presença de Níquel. Este elemento não forma carbonetos e permanece em solução sólida melhorando a resistência mecânica e tenacidade à fratura. Ainda, diminui a taxa crítica de resfriamento para a transformação martensítica, que em combinação com o Cr produz um aço com maior temperabilidade. O Cromo melhora a resistência à corrosão e oxidação, é um forte formador de carbonetos e é usado em conjunto com outros elementos para melhorar as propriedades mecânicas dos aços. O Titânio que em composição maior que 0,05% retarda o crescimento do grão, melhora a tenacidade à fratura e causa um endurecimento por precipitação de carboneto de titânio na matriz ferrítica.

O LNE700 é considerado um aço micro ligado que pode ser submetido a conformação profunda sem variação significativa da espessura.

4.5.2 Análise Metalográfica

As amostras destinadas às análises metalográfica por microscopia óptica foram retiradas transversalmente a direção longitudinal dos corpos de prova de fadiga das vigas Importada (aço St52), Nacional (aço E380TM) e Global (aço LNE 700), embutidas em resina polimérica, lixadas (lixa 120, 240, 320, 400 e 600, respectivamente) e polidas em feltro com óxido de cromo de 10µm, diamante de 6,3 e 1,0 µm, sucessivamente. O ataque químico foi feito com o reagente Nital 2% (Ácido nítrico (2%) + Etanol (98%)), que ataca os contornos dos grãos e de fases. As microestruturas das vigas foram observadas na direção longitudinal de laminação da chapa, utilizando-se um microscópio óptico Zeiss modelo Axiophot. O tamanho médio do grão ferrítico foi determinado pelo método comparativo, segundo a norma ASTM E112 – 2010 e o nível de severidade de inclusões foi obtido com a utilização da norma ASTM E45-2010 método A.

4.5.2.1 Metalografia do material da Viga Importada (aço St52)

Os aspectos micrográficos do aço St52, podem ser observados na Figura 4.17, e mostra uma microestrutura constituída por uma matriz ferrítica com grãos equiaxiais (áreas claras) e a presença do microconstituente perlita com uma textura alinhada (áreas escuras).

Este aço apresenta inclusões, indicado pelas setas, no sentido longitudinal do tipo sulfeto (A), nível 1, série fina / tipo óxido (D), nível 1, série fina segundo norma ASTM E45 – 2010 – Método A.

Figura 4.17 – Microestrutura presente no aço St52.

No detalhe da microestrutura mostrada na Figura 4.18, obtida com maior aumento, pode ser observado grãos ferríticos equiaxiais e o microconstituente perlita com a sua formação em bandas.

Figura 4.18 – Detalhe da microestrutura presente no aço St52.

O tamanho do grão ferrítico medido na direção longitudinal é dado pela Tabela 4.5. A média dos campos forneceu tamanho de grão padrão ASTM #9.

Tabela 4.5 – Tamanho de grão ferrítico no sentido longitudinal para o aço St52.

ASTM E112 – 2010 - Método Comparativo						
Campos	1	2	3	4	5	Média dos campos
Valores Obtidos	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0

4.5.2.2 Metalografia do material da Viga Nacional (aço E380TM)

Os aspectos micrográficos do aço E380TM apresentados na Figura 4.19, foram obtidos no sentido longitudinal do corpo de prova de fadiga, após ataque com Nital 2%. Foi revelada uma microestrutura constituída por matriz ferrítica de grãos finos equiaxiais (áreas claras) e a presença de pequenos grãos de perlita (pontos escuros).

Figura 4.19 – Microestrutura presente no aço E380TM.

Este aço apresenta inclusões no sentido longitudinal do tipo sulfeto (A), nível 1, série fina / tipo óxido (D), nível 1, série fina segundo norma ASTM E45 – 2010 – Método A.

Detalhe da microestrutura deste aço é apresentado na Figura 4.20 e observa-se a pouca quantidade da fase perlítica.

Figura 4.20 – Detalhe da microestrutura presente no aço E380TM.

O tamanho do grão ferrítico, medido no sentido longitudinal é dado pela Tabela 4.6. A média dos campos forneceu tamanho de grão padrão ASTM #9.

Tabela 4.6 – Tamanho de grão ferrítico no sentido longitudinal.

ASTM E112 – 2010 - Método Comparativo						
Campos	1	2	3	4	5	Média dos campos
Valores Obtidos	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0

4.5.2.3 Metalografia do material Viga Global (aço LNE 700)

Os aspectos micrográficos do aço LNE 700, realizada no sentido longitudinal do corpo de prova de fadiga, é apresentado na Figura 4.21, sendo constituída por uma matriz ferrítica de grãos finos e equiaxiais (áreas claras) e a presença de precipitados na forma de glóbulos dispersos na matriz ferrítica.

Apresenta inclusões no sentido longitudinal do tipo óxido (D), nível 1, série fina segundo norma ASTM E45 – 2010 – Método A.

Figura 4.21 – Microestrutura presente no aço da Viga Global.

O detalhe desta microestrutura é apresentado na Figura 4.22, sendo esta composta de grãos ferríticos (áreas claras) e carbonetos finamente dispersos.

Figura 4.22 – Detalhe da microestrutura presente no aço LNE 700.

O tamanho do grão ferrítico no sentido longitudinal é dado pela Tabela 4.7. A média dos campos forneceu tamanho de grão padrão ASTM #11.

Tabela 4.7 – Tamanho de grão ferrítico no sentido longitudinal.

ASTM E112 – 2010 - Método Comparativo						
Campos	1	2	3	4	5	Média dos campos
Valores Obtidos	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0

4.5.3 Ensaios de Dureza

Para a determinação da dureza, foram realizadas seis medidas em escala Rockwell B (ASTM E18) ao longo do plano de laminação do material. Foi utilizada uma máquina de dureza marca Leco digital, serie 500.

Os ensaios de dureza foram conduzidos conforme a norma ASTM E18-2008 na região da garra dos corpos de prova de fadiga das vigas Importada, Nacional e Global, utilizando penetrador de esfera de W de 1/16 pol. de diâmetro e carga 100 kgf, em um tempo de penetração de 15 s. As médias dos valores encontrados estão apresentadas na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Media da dureza levantada para os materiais das vigas existentes

Material	Importada (St52)	Nacional (E380TM)	Global (LNE 700)
Dureza Rockwell (HRB)	78	88	95

A dureza superficial do aço LNE700 é superior aos outros materiais empregados, o que demonstra uma maior resistência mecânica.

4.5.4 Propriedades mecânicas de tração

As dimensões e geometrias dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração são dadas na Figura 4.2. Os procedimentos dos ensaios foram realizados de acordo com a norma ASTM E8/E8M-09. A espessura final dos corpos de prova foi de 5,0 mm.

Foi utilizado um extensômetro MTS 632.26F-20 para medida da deformação. Todos os ensaios foram realizados em uma máquina servo-hidráulica MTS-810 de 100kN de capacidade máxima equipada com um controlador Flextest GT, com velocidade de deslocamento do pistão de 0,5 mm/min até 0,5% de deformação e aumentada para 5 mm/min acima desta deformação.

As curvas de tensão x deformação estão apresentadas na Figura 4.23 para o aço E380TM, na Figura 4.24 para o aço St52 e na Figura 4.25 para o aço LNE700. Nota-se que a transição da zona elástica para a zona plástica esta mais nítida nos materiais E380TM e St52, enquanto que para o aço LNE700 a transição não é clara no gráfico que demonstra uma matriz mais resistente e não normalizada.

Figura 4.23 – Curva Tensão – Deformação para aço E380TM aplicado na Viga Nacional.

Figura 4.24 – Curva Tensão – Deformação para aço St52 aplicado na Viga Importada.

Figura 4.25 – Curva Tensão – Deformação para aço LNE700 aplicado na Viga Global.

Das curvas levantadas é possível retirar os principais parâmetros dos materiais em estudo e compará-los por meio da Tabela 4.9. Como observado na análise microestrutural o aço LNE 700 apresenta uma microestrutura composta de ferrita e carbonetos dispersos pela matriz, bem como um reduzido tamanho de grão, o que propiciou um maior limite de resistência, e maior nível de dureza. Já o aço St52 com uma microestrutura bandada de ferrita e perlita, apresentou os mais baixos valores de resistência mecânica à tração, enquanto que o aço E380TM apresentou uma composição microestrutural de matriz ferrítica com uma estrutura perlítica finamente dispersa, conferindo propriedades intermediárias às outras duas. Estas diferenças e seus efeitos serão discutidos nos resultados de fadiga destes aços.

Tabela 4.9 – Comparação dos parâmetros mecânicos dos aços.

PROPRIEDADES		MATERIAIS		
		E380TM	St52	LNE700
Su	[MPa]	541	428	766
Se (0,2%)	[MPa]	454	324	430
ϵ_t	[%]	40	60	28
E	[MPa]	189000	210000	195000
RA	[%]	65	61	45
RE	[Se/Sr]	0,84	0,76	0,85
n		0,097	0,126	0,0811
K	[MPa]	686	562	927

4.5.5 Propriedades de fadiga dos materiais

Os resultados obtidos em controle de deformação, conforme a norma ASTM E606 – 04 para os aços E 380TM, St52 e LNE700, nos ensaios de fadiga de baixo ciclo para os corpos de prova retirados na direção transversal (T) à direção de laminação, são apresentados nas Tabelas 4.10, 4.11 e 4.12. O critério de falha adotado foi o de meia vida do corpo de prova obtida durante o ensaio cíclico sob amplitude de deformação constante. As componentes elástica e plástica da curva deformação – vida estão apresentadas nas Figuras 4.26, 4.27 e 4.28.

Tabela 4.10 – Resultados dos ensaios de fadiga de baixo ciclo para o aço E 380TM.

Corpo Provas	$\Delta\sigma/2$ (MPa)	$\Delta\epsilon_t/2$	$2N_f$	$\Delta\epsilon_e/2$	$\Delta\epsilon_p/2$	$\log(\Delta\epsilon_e/2)$	$\log(\Delta\epsilon_p/2)$	$\log(\Delta\epsilon_t/2)$	$\log(2N_f)$
BN5	325,7434	0,002	84468	0,001734	0,000266	-2,7611	-3,5745	-2,6990	4,9267
BN6	317,9764	0,002	143144	0,001692	0,000308	-2,7715	-3,5118	-2,6990	5,1558
BN7	365,8941	0,004	13936	0,001947	0,002053	-2,7106	-2,6877	-2,3979	4,1441
BN8	370,5347	0,004	8016	0,001972	0,002028	-2,7051	-2,6929	-2,3979	3,9040
BN9	385,0124	0,003	6944	0,002049	0,000951	-2,6885	-3,0218	-2,5229	3,8416
BN12	318,6633	0,003	34140	0,001696	0,001304	-2,7706	-2,8847	-2,5229	4,5333
BN11	394,6146	0,004	5064	0,0021	0,0019	-2,6778	-2,7213	-2,3979	3,7045
BN18	323,1550	0,0025	36400	0,00172	0,00078	-2,7645	-3,1078	-2,6021	4,5611
BN19	332,8049	0,0025	34104	0,001771	0,000729	-2,7517	-3,1374	-2,6021	4,5328

Figura 4.26 – Curvas deformação – vida para o aço E 380TM

Tabela 4.11 – Resultados dos ensaios de fadiga de baixo ciclo para o aço St52

Corpo Provas	$\Delta\sigma/2$ (MPa)	$\Delta\epsilon_t/2$	$2N_f$	$\Delta\epsilon_e/2$	$\Delta\epsilon_p/2$	$\log(\Delta\epsilon_e/2)$	$\log(\Delta\epsilon_p/2)$	$\log(\Delta\epsilon_t/2)$	$\log(2N_f)$
BI2	226,4990	0,002	40172	0,001079	0,000921	-2,9672	-3,0355	-2,6990	4,6039
BI3	223,7735	0,002	97392	0,001066	0,000934	-2,9724	-3,0295	-2,6990	4,9885
BI4	227,2576	0,002	49756	0,001082	0,000918	-2,9657	-3,0372	-2,6990	4,6968
BI5	292,5973	0,003	16576	0,001393	0,001607	-2,8559	-2,7941	-2,5229	4,2195
BI7	273,7216	0,003	19908	0,001303	0,001697	-2,8849	-2,7704	-2,5229	4,2990
BI8	249,7575	0,003	31300	0,001189	0,001811	-2,9247	-2,7422	-2,5229	4,4955
BI9	197,8337	0,0015	164440	0,000942	0,000558	-3,0259	-3,2534	-2,8239	5,2160
BI6	215,6530	0,0015	155744	0,001027	0,000473	-2,9885	-3,3251	-2,8239	5,1924
BI13	269,4672	0,0025	32400	0,001283	0,001217	-2,8917	-2,9148	-2,6021	4,5105
BI14	272,6417	0,0025	30976	0,001298	0,001202	-2,8866	-2,9202	-2,6021	4,4910
BI19	259,4947	0,0025	20212	0,001236	0,001264	-2,9081	-2,8981	-2,6021	4,3056
BI20	234,0839	0,0015	185292	0,001115	0,000385	-2,9528	-3,4142	-2,8239	5,2679

Figura 4.27 – Curvas deformação – vida para o aço St52.

Tabela 4.12 – Resultados dos ensaios de fadiga de baixo ciclo para o aço LNE700

Corpo Provas	$\Delta\sigma/2$ (MPa)	$\Delta\epsilon/2$	$2N_f$	$\Delta\epsilon_e/2$	$\Delta\epsilon_p/2$	$\log(\Delta\epsilon_e/2)$	$\log(\Delta\epsilon_p/2)$	$\log(\Delta\epsilon/2)$	$\log(2N_f)$
BNT - 1	430,6809	0,003	22742	0,002213	0,000787	-2,6550	-3,1041	-2,5229	4,0558
BNT - 2	429,7799	0,003	28394	0,002209	0,000791	-2,6559	-3,1016	-2,5229	4,1522
BNT - 3	433,7821	0,003	22828	0,002229	0,000771	-2,6519	-3,1130	-2,5229	4,0574
BNT - 4	463,7613	0,004	8594	0,002383	0,001617	-2,6228	-2,7913	-2,3979	3,6332
BNT - 5	459,4059	0,004	8000	0,002361	0,001639	-2,6269	-2,7854	-2,3979	3,6021
BNT - 6	488,1317	0,004	7768	0,002508	0,001492	-2,6006	-2,8263	-2,3979	3,5893
BNT - 7	456,0544	0,0035	17818	0,002344	0,001156	-2,6301	-2,9369	-2,4559	3,9498
BNT - 9	437,1878	0,0035	7018	0,002247	0,001253	-2,6485	-2,9019	-2,4559	3,5452
BNT -10	420,6681	0,003	16668	0,002162	0,000838	-2,6652	-3,0766	-2,5229	3,9209
BNT -11	427,5476	0,003	21700	0,002197	0,000803	-2,6582	-3,0953	-2,5229	4,0354
BNT -12	426,3485	0,003	16536	0,002191	0,000809	-2,6594	-3,0920	-2,5229	3,9174
BNT -15	368,2536	0,002	200482	0,001892	0,000108	-2,7230	-3,9680	-2,6990	5,0010
BNT -17	403,4096	0,0025	36904	0,002073	0,000427	-2,6834	-3,3696	-2,6021	4,2660
BNT -19	404,2116	0,0025	30944	0,002077	0,000423	-2,6825	-3,3738	-2,6021	4,1895
BNT -20	408,3160	0,0025	47988	0,002098	0,000402	-2,6781	-3,3960	-2,6021	4,3801
BNT -24	348,3985	0,002	148836	0,00179	0,00021	-2,7471	-3,6785	-2,6990	4,8717
BNT -25	454,7937	0,0045	7596	0,002337	0,002163	-2,6313	-2,6650	-2,3468	3,5796
BNT -26	469,3206	0,0045	6802	0,002412	0,002088	-2,6177	-2,6802	-2,3468	3,5316
BNT -27	455,2401	0,0045	10314	0,002339	0,002161	-2,6309	-2,6654	-2,3468	3,7124

Figura 4.28– Curvas deformação – vida para o aço LNE700.

O resumo dos parâmetros de fadiga, que irão compor a equação (4.4) de Manson e Coffin, é apresentado na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Parâmetros de fadiga de baixo ciclo dos aços E 380TM, St52 e LNE700

Material	n'	K' [MPa]	b	σ'f [Mpa]	ε'f	c	E [Mpa]
E380TM	0,0754	588	-0,0695	702	0,269	-0,5653	189000
St52	0,1737	812	-0,1132	827	0,31	-0,5335	210000
LNE700	0,0872	799	-0,085	967	2,27	-0,8	195000

A relação deformação–vida para o aços LNE380, St52 e LNE700 podem ser expressas, respectivamente como:

$$\frac{\Delta \varepsilon_t}{2} = 0,0037.(2Nf)^{-0,0695} + 0,2697.(2Nf)^{-0,5653} \quad (4.7)$$

$$\frac{\Delta \varepsilon_t}{2} = 0,0031.(2Nf)^{-0,1132} + 0,31.(2Nf)^{-0,5335} \quad (4.8)$$

$$\frac{\Delta \varepsilon_t}{2} = 0,0051.(2Nf)^{-0,0855} + 2,27.(2Nf)^{-0,8} \quad (4.9)$$

Analisando todos os coeficientes de fadiga encontrados, bem como as curvas de “deformação x vida” e o gráfico comparativo destas curvas na Figura 4.29, observa-se que na região de baixo ciclo, o material sugerido para a Viga Global suporta uma amplitude de tensão cíclica maior do que a suportada pelos outros aços. Entretanto, na região de alto ciclo o comportamento em fadiga dos aços E 380TM e LNE 700 não são significativamente diferentes, ainda que o limite de resistência do aço LNE 700 é significativamente superior a dos outros aços. Considerando estes fatores, o aço LNE 700 seria o mais recomendado para a aplicação no novo produto do ponto de vista de resistência mecânica e desempenho em fadiga.

Figura 4.29 – Comparação das curvas tensão–vida obtidas experimentalmente para os aços das vigas.

A Tabela 4.14 lista o número total de níveis diferentes de amplitude de deformação usados nos ensaios e a quantidade de amostras ensaiadas em cada nível para as três classes de materiais.

Substituindo os dados da Tabela 4.14 na equação 4.7 podem-se calcular as porcentagens de replicações para os ensaios. A Tabela 4.15 apresenta os valores da replicação obtida para as três os aços estudados.

Tabela 4.14 – Diferentes níveis de amplitude para os ensaios nos três materiais

Nível de deformação	Número de amostras		
	E380TM	St52	LNE700
0,1			
0,15	3		
0,2	3	2	2
0,25	3	2	3
0,3	3	2	6
0,35			2
0,4		3	2
0,45			4
Número total de níveis	4	4	6
Número total de amostras	12	9	19

Tabela 4.15 – Avaliação da replicação para os ensaios dos materiais

Material	Replicação	Classificação
E380TM	55	Dados permissíveis para projeto
St52	66	
LNE700	68	

De acordo com a classificação, uma vez que as replicações ficaram entre a faixa de porcentagem de 50 a 75%, pode-se então concluir que os ensaios realizados para levantamento dos coeficientes de fadiga estão aptos, do ponto de vista de amostragem, a serem utilizados nas próximas etapas de análise de vida para o projeto do componente Global.

4.5.6 Análise Fractográfica dos materiais após ensaios

Para a análise da morfologia da superfície de fratura dos materiais, foram selecionados corpos de prova fraturados em fadiga no nível de amplitude de

deformação de 0,30% e observados em um microscópio estereoscópico de baixo aumento. As amostras foram armazenadas em um dissecador e antes de serem observadas em um microscópio eletrônico de varredura, foram submetidas a limpeza ultrasônica durante uma hora em uma solução de álcool isopropílico.

4.5.6.1 Análise do material da Viga Importada (aço St52)

A Figura 4.30 apresenta a macrofratografia obtida em baixo aumento, mostrando a superfície de fratura do corpo de prova, fraturado no ensaio de fadiga de baixo ciclo com amplitude de deformação total de $\Delta\epsilon_t/2 = 0,30\%$. A linha vermelha delimita os estágios de propagação de trinca por fadiga I e II do estágio III

Figura 4.30 – Macrofratografia da superfície de fratura do corpo de prova da Viga Importada

Pode-se visualizar na Figura 4.30 o sítio principal de nucleação da trinca por fadiga, indicado pela seta. Nota-se também, que a superfície fraturada do material apresenta os três estágios de propagação da trinca por fadiga, com uma morfologia de fratura com aparência de textura típica de rocha sedimentar (estratificada), na direção de laminação (DL) da chapa.

Na Figura 4.31 pode-se observar o aspecto da morfologia da superfície de fratura da amostra Importada próximas da região de propagação da trinca em estágios I e II, mostrando com maior aumento detalhes da região do sítio de nucleação da trinca por fadiga mostrado pela seta, onde podem ser visualizadas as linhas de propagação divergindo do sítio de nucleação para o restante da superfície.

Figura 4.31 – Detalhe da figura 4.40, mostrando detalhe do sitio de inicio da trinca por fadiga.

A Figura 4.32 mostra o detalhe da região de propagação da trinca por fadiga da amostra Importada, em Estágio II de propagação, onde podem ser visualizadas as estrias de propagação, característica típica de propagação de trinca por fadiga. O detalhe em maior aumento da região marcada com um retângulo na Figura 4.32 apresenta as estrias de propagação de trinca em Estágio II de Forsyth.

Figura 4.32 – Microfratografia da superfície no estágio II para o material da Viga Importada. Mostrando estrias de fadiga.

Nota-se claramente que as estrias revelam uma aparência rugosa e são trincadas entre si, trincas estas provocadas pela nucleação e crescimento de trincas secundárias, causadas, muito provavelmente, devido à aplicação de um grande número de ciclos de fadiga com baixa amplitude de deformação total.

A Figura 4.33 mostra a morfologia da superfície de fratura com grande aumento próxima à região de fratura final, onde a variação do fator de intensidade de tensão é elevada. Nota-se a ocorrência do fenômeno de delaminação, indicado pelas setas vermelhas D, que ocorre geralmente em chapas de aços fabricadas por processo de laminação com baixas temperaturas de acabamento.

Aspecto da morfologia da superfície de fratura que ocorre no Estágio III de propagação é apresentado na Figura 4.34. O mecanismo de fratura operante é conhecido por coalescimentos de microvazios, aspecto microfratográfico característico de aços estruturais que falham com a ocorrência de alta deformação plástica antes da fratura final.

Figura 4.33 – Morfologia da superfície de fratura próxima à região de fratura final.

Figura 4.34 – Aspecto da morfologia da superfície de fratura que ocorre no Estágio III de propagação.

4.5.6.2 Análise do material da Viga Nacional

A Figura 4.35 apresenta a Macrofratografia da superfície de fratura do corpo de prova da Viga Nacional (aço E380TM), fraturado no ensaio de fadiga de baixo ciclo com amplitude de deformação total de $\Delta\epsilon_t/2 = 0,30\%$. A linha vermelha delimita os estágios de propagação de trinca por fadiga I e II do estágio III. Pode-se visualizar a existência de dois locais principais de nucleação da trinca por fadiga, indicados na figura pelas setas 1 e 2. Nota-se que as superfícies fraturadas nos Estágios I e II apresentam uma morfologia de fratura com aparência lisa diferente da apresentada pelo material da Viga Importada. Contudo, observa-se que as áreas de propagação da trinca por fadiga nos Estágios I e II são aproximadamente iguais, tanto para o material importado como o nacional. A região compreendida pelo estágio III de propagação da trinca mostra que o fenômeno de separação apresentou-se intenso para o aço da Viga Nacional. Os pontos negros são óxidos formados durante o processo de propagação da trinca devido aos ciclos de compressão imposto no ensaio com $R=-1$.

Figura 4.35 – Macrofratografia da superfície de fratura do corpo de prova da Viga Nacional

Na Figura 4.36 (a) observa-se o aspecto da morfologia na superfície de fratura do material da Viga Nacional, próximo à região de propagação da trinca em Estágio I, mostrando com maior aumento, detalhes da região do sítio 1 de nucleação da trinca por fadiga (seta vermelha), onde se pode visualizar as linhas de propagação convergindo

para o sítio, bem como as estrias de propagação em estágio II de Forsyth. A Figura 4.36 (b) apresenta a microfratografia obtida próxima ao Estágio I, onde se observam as estrias de Estágio II danificadas devido aos mecanismos de fechamento da trinca, durante o inverso compressivo aplicado no ensaio.

Figura 4.36 – Microfratografia da superfície no estágio I para o material da Viga Nacional

A Figura 4.37 (a) mostra o detalhe da região de propagação da trinca por fadiga da amostra, em pleno estágio II de propagação, onde já se visualiza as estrias de propagação, característica típica de propagação da trinca por fadiga em estágio II, em aços dúteis. O detalhe com grande aumento da região marcada com um retângulo na Figura 4.37 (b) mostra as estrias de propagação de trinca em Estágio II de Forsyth, com sua aparência modificada. A explicação para as modificações da forma das estrias mostrada na Figura 4.37 (b) deve-se ao tipo de solicitação, tração-compressão alternada aplicada no ensaio de fadiga. As estrias ficam danificadas devido ao processo de fechamento da trinca, além de ocorrer também separações na forma das trincas secundárias entre os blocos de estrias modificadas. Estas separações são provocadas pela a nucleação e o crescimento de trincas secundárias, causadas pela aplicação de um grande número de ciclos de fadiga com baixa amplitude de deformação total. Além disto, observa-se que estas estrias se assemelham mais a marcas de pneus de veículos deixados em estradas de terra batida, citadas na literatura sobre elementos de fraturação nos metais como *tire marks* (marcas de pneu).

Figura 4.37 – Microfratografia da superfície no estágio II para o material da Viga Nacional

Aspecto da superfície de fratura em uma região próxima ao final do estágio II de propagação é mostrado pela Figura 4.38 (a), onde a variação do fator de intensidade de tensão é alta. Observa-se a ocorrência de trincas secundárias entre as estrias. A Figura 4.38 (b) apresenta detalhes da região delineada pelo retângulo vermelho, e o trincamento entre estrias, provocado pela alta variação do fator de intensidade de tensão que ocorre nesta região durante o processo de propagação da trinca.

Figura 4.38 – Microfratografia da superfície no final do estágio II para o material da Viga Nacional.

O aspecto da morfologia da superfície de fratura que ocorre no Estágio III de propagação e mostrado na Figura 4.39. O mecanismo de fratura operante é conhecido por coalecimentos de microvazios, que é um modo de fratura dúctil característico de aços estruturais que falham pela ocorrência de alta deformação plástica, antes da ruptura.

Figura 4.39 – Microfratografia da superfície do estágio III para o material da Viga Nacional.

4.5.6.3 Análise do material da Viga Global

A Figura 4.40 mostra a macrografia da superfície de fratura do corpo de prova fraturado no ensaio de fadiga de baixo ciclo com amplitude de deformação total de $\Delta\epsilon_t/2 = 0,30\%$. Pode-se visualizar claramente a existência de um sítio principal de nucleação de trinca por fadiga, indicado na figura pela seta vermelha e localizado no canto inferior esquerdo. Nota-se que a superfície fraturada nos estágios I e II do material BN apresenta uma morfologia de fratura com aparência de marcas de rio, característica de material de alta resistência mecânica e baixa tenacidade à fratura.

Figura 4.40 – Macrofratografia da superfície de fratura do corpo de prova da Viga Global

Assim, os aspectos macrofratográficos são completamente diferentes dos apresentados pelos aços da Viga Importada e Nacional. Contudo, pode-se notar que as áreas de propagação de trincas por fadiga nos estágios I e II ocupam áreas equivalentes às ocupadas por ambos os materiais.

A Figura 4.41 (a) apresenta o aspecto da morfologia da superfície de fratura com maior aumento do aço da Viga Global, próximo ao sítio de nucleação e das regiões de propagação da trinca em estágios I e II mostrando com maior detalhe a região do sítio de nucleação de trinca por fadiga (seta vermelha).

Figura 4.41 – Microfratografia da superfície no estágio I para o material da Viga Global

Pode-se também visualizar as linhas de propagação convergindo para o sítio, bem como algumas estrias de propagação em estágio II de Forsyth, que aparecem muito mal resolvidas. Na Figura 4.41 (b), está a microfotografia com grande aumento, feita em uma para melhor visualizar as estrias de propagação na região de origem da trinca (seta vermelha).

A Figura 4.42 mostra a Microfratografia realizada com grande aumento, na região de propagação de estágio II de Forsyth, onde foi possível detectar estrias de fadiga modificadas pelo efeito de fechamento da trinca, para o formato de marcas de pneus.

Figura 4.42 – Microfratografia na região de propagação do estágio II

Na Figura 4.43 (a) está apresentada a macrofotografia mostrando estrias de fadiga pobremente definidas, característica marcante de aço que apresenta alta resistência mecânica em tração com baixa tenacidade à fratura.

No detalhe com grande aumento da região marcada pelo retângulo vermelho, observa-se na Figura 4.43 (b) que as estrias de fadiga estão mal definidas e mostrando a dificuldade de se observar com clareza as referidas estrias, na superfície de fratura em aços que apresentam alta resistência mecânica.

Figura 4.43 – Microfratografia da superfície no final do estágio II para o material da Viga Global.

Por fim, a Figura 4.44 mostra o aspecto dúctil da superfície de fratura na região de propagação de trinca em estágio III, que ocorre na condição de sobrecarga trativa.

Figura 4.44 – Microfratografia da superfície do estágio III para o material da Viga Global.

4.6 CONCLUSÕES

Esta fase se concentrou extensivamente no levantamento das propriedades mecânicas de tração e de fadiga dos materiais aplicados e sugerido para o novo

componente, considerando os efeitos que o processo de fabricação causa à estrutura dos materiais. Há um entendimento claro que o fato de ter sido determinado uma conformação a quente para a Viga Global, o processo de manufatura causou modificações em importantes propriedades que caracterizam o desempenho estrutural do componente em condições de serviço, resultando em um material de mais elevada resistência mecânica.

Assim, determinar que mesmo após conformado, o material da Viga Global, LNE700, possui propriedades mecânicas superiores tanto as dos materiais da Viga Nacional (E380TM) e ao da Viga Importada (St52), avaliando os coeficientes estáticos de dureza e propriedades de tração e os coeficientes dinâmicos de fadiga para a curva completa de deformação-vida, trazem ao grupo do projeto tranquilidade para seguir em frente com os testes de homologação, sabendo que a antecipação do investimento e confecção do ferramental foi uma decisão acertada, tomada com base no risco minimizado pelas ações da fase QG4 anterior, e comprovada nesta fase de protótipo pela correta seleção de um material superior que atenda às premissas de cálculos MEF.

Além disto, é possível neste momento iniciar análises de dano mais sofisticadas, pois todos os materiais estão caracterizados quanto à resistência e comportamento mecânico, o que torna possível prever o desempenho dos componentes quando submetidos a cargas, por meio das medições já realizadas na Viga Nacional e Importada, bem como acessar o desempenho do novo componente planejando novas medições em componente representativo.

Com todas as medições e coeficientes disponíveis, uma análise comparativa teórica e em laboratório será o desafio do próximo capítulo para que uma homologação seja concedida em tempo mínimo com a máxima confiabilidade.

Neste ponto as ferramentas estão disponíveis para produção dos lotes iniciais, os materiais estão caracterizados e o projeto da Viga Global maduro.

4.7 REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM Designation E739-91 (2004)**: Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ϵ -N) Fatigue Data, ASTM International, 2004

_____. **ASTM Designation E606-04** Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing, ASTM International, 2004.

_____. **ASTM Designation E112-10** Standard Test Methods for Determining Average Grain Size, ASTM International, 2010.

_____. **ASTM Designation E45-10** Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel, ASTM International, 2010.

_____. **ASTM Designation E8/E8M-09** Standard Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International, 2009.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/DIS 12106:1998**, Metallic Materials Fatigue Testing-Axial Strain Controlled Method, August 1998.

_____. **ISO 6892: 1998**, Metallic Materials – Tensile Testing at Ambient Temperature, March 1998

BASQUIN, O.H. (1910 apud Stephens, R.I. et al. **Metal Fatigue in Engineering**, Second Edition, John Wiley & Sons Inc., 2001).

BRACESSI, C. et al. An equivalent uniaxial stress process for fatigue life estimation of mechanical components under multiaxial stress conditions, **International Journal of Fatigue**, Elsevier Science, v. 30, p. 1479 – 1497, 2007.

British Standard, **BS Em umber 7270-2006**, Metallic Materials- Constant Amplitude Strain Controlled Axial Fatigue-Method of Test. Publication Date 2006-12-29.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**, 5ª edição, Rio de Janeiro: LTC, 2002.

DRAPER, J. **Modern metal fatigue analysis**, UK: EMAS, 2008.

FATEMI A.; SHAMSAEI N. Multiaxial fatigue: An overview and some approximation models for life estimation, **International Journal of Fatigue**, Elsevier Science, v. 33, p. 948-978, 2011.

GROOVER, M. P., **Fundamentals of Modern Manufacturing: materials, process and systems**, 3rd. Edition, Chichester: John Wiley & Sons Inc., 2007.

HAN C.; CHEN, X.; KIM K.S. Evaluation of multiaxial fatigue criteria under irregular loading, **International Journal of Fatigue**, Elsevier Science, v. 24, p. 913-922, 2002.

KANDIL, F.A. Potential ambiguity in the determination of the plastic strain range component in LCF testing. **International Journal of Fatigue**, v. 21, p. 1013-1018, 1999.

KARBASIAN, H.; TEKKAYA, A. E. A review on hot stamping, **Journal of Materials Processing Technology**, Elsevier Science, v. 210, p. 2103-2118, 2010.

LEE Y. et al. **Fatigue testing and analysis: Theory and Practice**, Oxford: Elsevier, 2005.

MILAN, M. T.; SPINELLI, D.; BOSE FILHO, W.W. Fatigue and monotonic properties of an interstitial free steel sheet. **International Journal of Fatigue**, Elsevier Science, v. 23, p. 129-133, 2001.

NADERI, M. et al. Analysis of microstructure and mechanical properties of different high strength carbon steels after hot stamping, **Journal of Materials Processing Technology**, Elsevier Science, v. 211, p. 1117-1125, 2011.

PrEN 3988:1998. Aerospace Series. **Test Methods for Metallic Materials-Constant Amplitude Strain-Controlled Low Cycle Fatigue Testing**. AECMA, Draft No.2, March 1998.

SANTOS, J.L.T et al. Fatigue assessment of mechanical components under complex multiaxial loading, **6th International Conference on Biaxial/Multiaxial Fatigue and Fracture**, Elsevier Science, v. 31, p. 463-482, 2000.

SCHÜTZ, W. A history of fatigue, **Engineering Fracture Mechanics**, Elsevier Science, v. 54, n. 2, p. 263-300, 1996.

SPINELLI, D. Fundamentos e aplicações da mecânica da fratura, **apostila e anotações**, Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, p. 102 – 111, 2006.

WANNENBURG J.; HEYNS S. P.; RAATH A. D. Application of a fatigue equivalent static load methodology for the numerical durability assessment of heavy vehicle structures, **International Journal of Fatigue**, Elsevier Science, v. 31, p. 1541-1549, 2009.

CAPITULO 5 – QG2: FASE EXPERIMENTAL

5.1 PROPOSTA PARA UM PROCESSO DE HOMOLOGAÇÃO DA VIGA GLOBAL

A aprovação estrutural final de um componente de suspensão exige uma avaliação criteriosa das informações durante a fase experimental do desenvolvimento. O método tradicional amplamente utilizado para garantir a confiabilidade se baseia em testes de durabilidade em amostras submetidas a carregamentos de serviço ou acelerados.

Seja com o componente montado no veículo ou em banco de provas, a disponibilidade de um sofisticado aparato de testes se faz necessário para avaliar a integridade. Assim, encontrar uma forma de extrapolar os resultados de medições, focando nos pontos que geram dano, e realizar intensas análises localizadas parece ser uma metodologia de grande potencial para minimizar a capacidade dedicada aos sistemas e equipamentos, direcionando-a para esforços técnicos, buscando correlações com os fenômenos por meio de embasamentos teóricos e resultados cumulativos.

Considerando a teoria de fadiga iniciada no capítulo anterior, este capítulo apresenta uma metodologia que considera os pontos críticos levantados pelos cálculos estruturais da fase de projeto, as medições estruturais realizadas nos componentes similares e as novas medições realizadas de forma equivalente para Viga Global, e os resultados dos ensaios de fadiga nos materiais, para calcular o dano com base na metodologia S-N, avaliar o resultado de uma análise localizada de fadiga bi-axial por meio do método ϵ -N e propor ensaios em corpos de prova considerando os carregamentos dos sinais que geram dano no material.

5.1.1 Análise estatística das medições estruturais

Segundo Chu (1997), o sucesso de uma previsão de fadiga multiaxial depende da habilidade de obter histórias de deformação acuradas, sendo que o desafio agora mudou da análise de fadiga generalizada para o desenvolvimento de um método consistente e preciso de histórias de tensão e deformação nas regiões críticas em estruturas complexas submetidas à fadiga multiaxial.

De acordo com as medições previamente realizadas na fase de concepção para os projetos das vigas Nacional e Importada, foi realizada uma série de avaliações para testar o método proposto de análise estrutural a fadiga nos materiais atualmente aplicado nos componentes de desempenho conhecidos.

Conforme descrito na seção 3.5.2, foram feitas medições de deformações nos componentes existentes para avaliar o desempenho dos projetos sujeitos às mesmas condições de aplicação. Naquela fase de análise, porém, apenas os resultados de pico foram considerados determinantes para o julgamento deste desempenho.

Neste ponto, uma avaliação mais detalhada das medições foi realizada para verificar a aplicação das teorias de fadiga nos sinais obtidos por meio de rosetas. Os sinais foram abertos para cada ponto de medição das vigas Nacional e Importada para uma análise estatística das deformações principais.

A medida da tendência central dos dados é alcançada por meio da média, soma dos valores divididos pelo número de pontos, e mediana, o valor central em um conjunto de dados arranjados em ordem de magnitude.

A variância indica o espalhamento da distribuição e é definida como o desvio padrão ao quadrado e o valor quadrático médio RMS é definido como o valor absoluto da raiz quadrada das médias quadradas, e é uma medida estatística da magnitude de

um sinal variável. Assim, no primeiro momento, a determinação dos pontos de maior energia de deformação com base no valor RMS parece razoável para avaliar quais seriam as regiões consideradas de maior intensidade de energia no componente estrutural e conseqüentemente de maior probabilidade de falha.

5.1.2 Análise Rainflow

Para realização de uma análise de fadiga, a partir de carregamentos de amplitudes variáveis, a contagem dos ciclos de histereses e correspondentes amplitudes e médias são fundamentais para determinação do dano.

Segundo Dowling (2007), uma história irregular é composta por uma série de picos e vales sendo que um intervalo simples é medido entre um pico e o próximo vale, ou entre um vale e o próximo pico, enquanto que um intervalo completo é medido entre um pico e um vale que não é o próximo, mas um que ocorre posteriormente.

A contagem dos ciclos pelo método de *Rainflow* tem sido utilizada com este propósito. O método é baseado em uma geniosa analogia concebida por Tatsuo Endo, entre a geração dos ciclos de histerese e o fluxo de pingos de chuva de uma pagoda japonesa. Este método foi adaptado para análises de fadiga e compõe atualmente a norma ASTM-E1049-85-R97.

Na condução da contagem de ciclos por *Rainflow*, um ciclo é contado caso cumpra o critério de que o próximo intervalo simples seja maior ou igual que o primeiro intervalo simples e a média para este intervalo é também avaliada. A Figura 5.1 exemplifica os passos para realização da contagem de forma simplificada, sendo que os detalhes do método podem ser encontrados na norma.

Figura 5.1 – Construção de ciclos de histerese pelo método de *Rainflow* [ASTM E1049 0 85 – R97].

Segundo Dressler et al (1996), a organização dos dados por meio de contagem via *Rainflow* resulta em uma perda de informações a respeito da exata tensão média e da sequência do carregamento, no entanto, retém mais informações do que somente uma contagem de picos e vales por considerar os ciclos de histerese, que podem ter os intervalos computados pelas hipóteses de Masing, e também contém informações da localização dos ciclos internos. Ou seja, atualmente é o método de maior sofisticação disponível para contagem de ciclos em sinais complexos.

5.1.3 Efeito da tensão média

Para uma mesma amplitude de tensão ou deformação, ensaios de fadiga com tensão média trativa resultam em menores valores de vida do que aqueles com tensão média igual a zero.

Diversos métodos foram propostos para considerar os efeitos da tensão média. Smith, Watson & Topper (1970) – SWT, sugerem que a vida em fadiga não é somente

função da amplitude de deformação, mas do produto da amplitude de deformação e a tensão máxima em cada ciclo. A equação 4.2, modificada segundo o critério de SWT torna-se:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} \sigma_{\max} = \frac{(\sigma'_f)^2}{E} (2N_f)^{2b} + \sigma'_f \varepsilon'_f (2N_f)^{b+c} \quad (5.1)$$

Um modelo anterior e mais simples de correção proposto por Morrow (1968), corrige o efeito do termo elástico, devido à observação de que a tensão média é mais significativa para vida elevada, subtraindo a tensão média para cada ciclo conforme equação 5.2 abaixo.

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f - \sigma_m}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (5.2)$$

Segundo Draper (2008), a correção proposta por SWT é mais precisa para metais frágeis como ferros fundidos e alumínio fundido enquanto que a correção por Morrow é indicada para aços e foi a selecionada para as análises de dano neste trabalho. A preferência pela correção de Morrow foi também confirmada por Dowling (2007) para o caso de aços, que também considerou a correção de SWT conservadora para tensões médias compressivas.

Intuitivamente, tensões médias de tração reduzem a ductilidade e conseqüentemente a vida em fadiga, pois para um dado intervalo de tensão, a tensão máxima alcançada é maior na presença de tensão média trativa quando comparado a ciclos totalmente reversos. Assim, o ciclo é imposto ao material em um ponto com baixa ductilidade remanescente. Porém, segundo Manson e Halford (2006), esta avaliação qualitativa não representa a quantitativa, e demonstra que a redução da vida está associada com a redução da habilidade de escoar plasticamente, sendo que a curva de

deformação - vida é transladada para a esquerda, e assim, apresenta uma redução da inclinação na parte elástica da curva de vida, Figura 5.2.

Figura 5.2 – Modificação das curvas de fadiga devido à tensão média diferente de zero (Manson e Halford, 2006)

Em contra partida, tensões de compressão aumentam a vida a fadiga, que pode analogamente ser explicado por mostrar que uma aparente maior ductilidade está disponível nestas condições, pois estende a parte útil da curva tensão-deformação, aumentando a resistência à fadiga.

5.1.4 Acúmulo do dano para sinais complexos

Diversos trabalhos foram publicados recentemente propondo complexas maneiras de considerar o efeito do dano nos diferentes níveis de tensão ou deformação presentes em componentes mecânicos quando em condições de serviço.

Segundo Kim, Son & Park (2008), a regra de Palmgren – Miner (1945, apud DRAPER, 2008) é comumente utilizada na previsão de vida sob amplitude de carga variada em fadiga de alto ciclo, porém perde a precisão por ignorar o efeito do dano em

tensões abaixo do limite de fadiga e o efeito iteração da carga quando em amplitude variável. Kim, Son & Park (2008) descrevem diversos modelos propostos para a curva S-N, modificando o limite de fadiga para corrigir os efeitos mencionados. Por outro lado, quando utilizada a equação 4.4 de Coffin - Manson, são dispensadas futuras correções para este modelo de previsão de vida (KIKUKAWA et al., 1977)

De acordo com a teoria linear de Palmgren – Miner, uma fração do dano em qualquer nível de tensão é linearmente proporcional à razão entre o número de ciclos da operação e o número de ciclos total que produz a falha neste nível de tensão. O dano total é dado como a somatória de todas as frações e a falha ocorre quando esta é igual ou maior que 1, conforme mostrado pela equação 5.3.

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \geq 1 \quad (5.3)$$

5.1.5 Fadiga biaxial

Por estarem presentes na maioria dos projetos, poucos assuntos em análise de fadiga têm atraído tanta atenção nos últimos anos como o efeito multiaxial dos carregamentos. Analistas têm aproveitado a elegância da matemática para criar manipulações engenhosas e especialistas em testes maneiras desafiadoras de verificar as hipóteses, disponibilizando uma vasta literatura para basear as metodologias (MANSON; HALFORD, 2006).

Na prática engenheiros utilizam coeficientes para compensar as incertezas de dimensionamentos seguros devido à complexidade e à falta de simplificações, que venham a minimizem o esforço das análises e experimentos complexos, que raramente são viáveis durante o processo de desenvolvimento de um produto. Ou seja, sempre que possível, é essencial buscar alternativas que utilizem a teoria de fadiga uniaxial (MANSON; HALFORD, 2006).

Além disto, segundo Draper (2008), trincas por fadiga se iniciam geralmente na superfície e, portanto muitas pesquisas são realizadas considerando fadiga no estado plano de tensão.

A proposta de Macha (2011) coloca que a forma mais simples de se realizar uma análise é buscar transformar o ambiente multidirecional em um sinal resultante que possa ser tratado como fadiga uniaxial, conforme ilustrado na Figura 5.3.

Figura 5.3 – Proposta de Macha para tratar o fenômeno multiaxial (Macha, 2011).

Conle & Chu (1998) afirmam que na indústria automobilística o método de deformação-vida é o mais indicado para o processo de verificação da durabilidade por meio dos cálculos de fadiga. Esta afirmação é válida pois leva em conta não somente os amplitudes de deformação elástica mas também as amplitudes de deformação plástica que atuam nos componentes e quando submetidos a carregamentos aleatórios. Assim, diferente do procedimento acima que busca uma tensão equivalente, o método irá focar na determinação de uma deformação equivalente como entrada aos cálculos do dano por fadiga.

As deformações principais são determinadas pela equação 3.1, a deformação máxima de cisalhamento pela equação 3.2 e o ângulo do plano das deformações principais pela equação 3.3. A representação do Diagrama de Mohr para a deformação é esquematizado na Figura 5.4.

Figura 5.4– Diagrama de Mohr para a deformação no estado plano de tensão.

Outras duas informações relevantes para os critérios de fadiga biaxial são a deformação normal ao plano de máxima deformação cisalhante, equação 5.4, e a tensão hidrostática, equação 5.5, que é a média das tensões normais e não contribui para o escoamento, sendo que a iniciação de uma trinca é tida como o resultado da diferença entre a tensão aplicada e a hidrostática denominada tensão desviadora.

$$\varepsilon_N = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} \quad (5.4)$$

$$\sigma_H = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (5.5)$$

A tensão hidrostática causa uma alteração volumétrica e a desviadora distorção ou cisalhamento.

5.1.6 Carregamentos proporcionais

De acordo com Fatemi (2011), carregamentos multiaxiais, que podem ser proporcionais ou não proporcionais, são comuns em diversos componentes e estruturas mesmo quando submetidos a carregamentos uniaxiais, quando tensões e/ou

deformações multiaxiais podem ser encontrados, tipicamente na mesma fase, devido à geometria e concentradores de tensão.

Considere um ponto na superfície do material em um estado plano de tensão. Assumindo que aumentando o carregamento aplicado as deformações ε_1 e ε_2 crescem com sua razão $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ se mantendo constante, esta situação é denominada com sendo de carregamento proporcional.

Igualmente, um sinal de medição de deformação é considerado proporcional quando o plano de tensões principais não varia com o tempo, independente do tipo de carregamento aplicado.

Com base nas equações 3.2 e 3.3 podemos descrever a equação 5.6 abaixo para determinação dos ângulos instantâneos em uma roseta e determinar o nível de proporcionalidade dos carregamentos medidos em campo.

$$\phi = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{2\varepsilon_{45} - \varepsilon_x - \varepsilon_y}{\varepsilon_x - \varepsilon_y} \right) \quad (5.6)$$

5.1.7 Critério das deformações principais para fadiga bi-axial

Este critério propõe que trincas irão iniciar no plano que experimenta a maior amplitude de deformação principal. Este critério é recomendado para fundidos e metais de elevada resistência e tende a fornecer valores de vida inseguros para metais dúcteis (DRAPER, 2006). A equação 5.7 se assemelha a fadiga uniaxial, equação (4.4) porém considera os reversos da deformação principal.

$$\frac{\Delta \varepsilon_1}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f' (2N_f)^c \quad (5.7)$$

5.1.8 Critério da tensão máxima de cisalhamento para fadiga bi-axial

Foi observado que as trincas por fadiga se iniciam no plano de cisalhamento e este critério propõe utilizar este plano que experimenta a máxima amplitude de cisalhamento. A equação 5.8 mostra esta consideração para metais e tende a fornecer valores conservativos para metais dúcteis e inseguros para metais frágeis.

$$\frac{\Delta\gamma_{\max}}{2} = 1,3 \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + 1,5 \varepsilon_f' (2N_f)^c \quad (5.8)$$

5.1.9 Critério de deformação combinado de Brown-Miller para fadiga bi-axial

A equação de Brown-Miller (1973) propõe que o dano máximo ocorre no plano que experimenta a maior amplitude de tensão de cisalhamento e que este dano é função tanto da deformação de cisalhamento quanto da deformação normal ao plano, equação 5.9 para metais. Este critério fornece estimativas realísticas para metais dúcteis e tende a ser não conservativo para metais frágeis.

$$\frac{\Delta\gamma_{\max}}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_N}{2} = 1,65 \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + 1,75 \varepsilon_f' (2N_f)^c \quad (5.9)$$

5.1.10 Critério de deformação equivalente de Von Mises para fadiga bi-axial

Como Von Mises exprime uma estimativa do escoamento, foi proposto um método com base neste critério. A equação 5.10 apresenta esta consideração, sendo que ε_{eq} pode ser calculado pela equação 5.11. Este critério fornece uma pobre correlação entre a deformação e a vida e um dos problemas é que neste modelo, as tensões de compressão são colocadas na forma absoluta. Propostas de uma análise

com o Mises sinalizado, que leva em conta a direção da tensão, assumindo o sinal da tensão máxima de cisalhamento foram propostos, porém, conforme Brascetti (2006) sua correlação ainda permaneceu baixa.

$$\frac{\Delta \varepsilon_{eq}}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f' (2N_f)^c \quad 5.10$$

$$\varepsilon_{eq} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + \varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2} \quad 5.11$$

5.1.11 Análise por meio dos planos críticos para fadiga bi-axial

Para componentes submetidos a tensões diretas e de cisalhamento, a relação das fases entre as tensões pode não ser constante. Neste caso, não é óbvio qual plano experimenta a mais severa combinação de deformação e conseqüentemente maior dano por fadiga, Figura 5.5.

A orientação de um plano é definida pelo ângulo que a normal ao plano faz com as coordenadas x-y-z do sistema orientado pela superfície. O plano tem um ângulo Φ do eixo-x em direção ao eixo-y.

Figura 5.5– Direções das deformações principais e de cisalhamento fora de fase.

Quando o carregamento é significativamente não proporcional, uma análise por meio dos planos críticos é necessária, onde tensões e deformações são determinadas para os vários planos de orientação no material durante o carregamento cíclico, e as tensões e deformações atuando no plano mais criticamente carregado serão utilizadas para prever o dano, Figura 5.6.

Figura 5.6 – Exemplo de dano nos diversos planos de tensão/ deformação.

Segundo Draper (2006) um intervalo de 10° de não proporcionalidade é comumente tolerado, pois gera um erro de menos de 2% comparado a um incremento de 1° . Desta forma, planos avaliados dentro desta banda, quando aplicado a equação 5.9 de Brown-Miller, fornecem uma boa correlação de vida à fadiga.

5.1.12 Ensaios acelerados de durabilidade

Duas formas comumente utilizadas para acelerar os testes de durabilidade são: ignorar os ciclos de baixa amplitude de carregamento eliminando as cargas abaixo de 15% do valor máximo (HEULER; SEEGER, 1996); ou elevar a frequência desde que não haja ressonância do sistema.

Outra técnica apontada por Grubisic (1994) é construir um histograma de distribuição cumulativa proveniente do *Rainflow* de uma medição de curto período e então extrapolar os ciclos e cargas para a meta de vida. Neste método explicado por Sonsino (2006), a matriz é reduzida a um histograma de frequência que contem o número de ciclos a cada intervalo ou amplitude específica para a carga. Isto é conseguido convertendo o número de ciclos contados para cada variação de carga em um intervalo definido para um valor equivalente de número de dano com média zero. Porém, segundo Lee (2005) esta técnica falha ao não considerar o efeito de variação da carga média.

Heuler e Seeger (1986) propõem uma filtragem dos eventos medidos que possuam valores de tensão calculada abaixo de 50% do limite de fadiga do material. Este procedimento não exclui os picos de tensão que podem levar a plasticidade localizada e causar elevado dano ao material. No entanto, mostra que o procedimento acelera os testes de forma pouco agressiva, pois, grande parte do sinal pode apresentar uma quantidade significativa de ciclos de tensão acima dos 50% proposto.

5.1.13 Determinação de um sinal equivalente da história de deformação

Wang and Brown propuseram um método de contagem de ciclos baseado no *Rainflow* e em uma deformação de von Mises equivalente modificada. Para superar o problema de sinalização (tensão e compressão) e para permitir uma contagem de ciclos fora de fase, foi proposta uma modificação na história de deformação sinalizando o ponto de mudança de acordo com o maior valor absoluto da deformação principal. Este método não se mostrou eficiente, pois inverte bruscamente o sinal matematicamente, não representando a história original de deformações (BRASCESSI, 2006).

Uma técnica de sucesso foi apresentada por Stephens (1997) na qual utiliza a história da amplitude de deformação em conjunto com modelo de SWT para selecionar os níveis para edição com base no dano percentual associado às diversas amplitudes

de deformação mantendo a sequência original do sinal. A Figura 5.7 mostra a redução do *Rainflow* do histograma completo (a) para o editado (b) contendo os ciclos que geram maior dano ao material.

Figura 5.7 – Edição do sinal com base no *Rainflow* do histograma e modelo SWT (Stephens, 1997)

5.1.14 Análise de Weibull para confiabilidade em ensaios

De acordo com Stephens (2001) a distribuição de Weibull é utilizada com preferência para análise dos aspectos da probabilidade dos resultados de falha por fadiga. Este método de engenharia desenvolvido por Weibull (1961 apud STEPHENS, 2001) foi aplicado com sucesso em resultados de fadiga. A equação 5.11 apresenta o modelo de distribuição de dois parâmetros comumente utilizado no projeto a fadiga.

$$F(N_f) = 1 - e^{-\left(\frac{N_f}{\eta}\right)^\beta} \quad (5.12)$$

Os coeficientes de Weibull η e β são encontrados por meio da técnica de “Rank” Médio e regressão linear dos gráficos resultantes. O resultado são curvas de confiabilidade onde é possível prever percentualmente a quantidade de falhas prováveis de terem ocorrido em um determinado período de serviço.

5.2 ANÁLISE ESTRUTURAL RESULTANTE DAS MEDIÇÕES DE DEFORMAÇÃO

Para suportar o processo de homologação do novo componente e validação do material sugerido, foram realizadas diversas análises dos dados obtidos por meio de medições estruturais para a Viga Nacional e Importada submetidas às mesmas condições de carregamento. Estas análises foram repetidas e comparadas como forma de prever o comportamento estrutural para a Viga Global.

Inicialmente foi realizada uma análise detalhada do sinal medido, e posteriormente, por meio da teoria de fadiga dos materiais, foi calculada a vida estimada de ambas as vigas, considerando os métodos de tensão-vida e deformação-vida utilizando a tensão principal e a deformação principal como entrada.

O procedimento adotado para a avaliação dos resultados foi sistematizado conforme a Figura 5.8 dada abaixo e procura mostrar a proposta de focar continuamente os pontos que apresentam maior probabilidade de falha.

Figura 5.8: Diagrama sistematizado do procedimento de análise dos dados medidos em campo.

5.2.1 Análise do sinal

Foi avaliado o comportamento das deformações principais calculados por meio do software de análise de sinal HYPERWORKS®, para as vigas carregadas com 13t, medidas no trecho padrão de homologação estrutural validado, aplicando um filtro de 40Hz, com unidades de deformação dadas em $\mu\text{m}/\text{m}$ e unidades de tensão dadas em MPa.

Por meio das equações 3.1 e 3.3 foram determinados os histogramas de ϵ_1 para cada ponto medido nos componentes conforme descrito no item 3.5.

A Figura 5.9 apresenta os sinais e correspondentes valores estatísticos obtidos em cada ponto medido para a Viga Nacional. O ponto R12 foi o de maior valor RMS encontrado.

Figura 5.9 - Estatística dos sinais ϵ_1 para a Viga Nacional.

A Figura 5.10 apresenta os sinais e correspondentes valores estatísticos obtidos em cada ponto medido para a Viga Importada. O ponto R12, para esta medição estando em outro local, foi o de maior valor RMS encontrado.

Figura 5.10 - Estatística dos sinais ε_1 para a Viga Importada.

A Figura 5.11 apresenta os sinais e correspondentes valores estatísticos obtidos em cada ponto medido para a Viga Global. O ponto R5 foi o de maior valor RMS encontrado.

Por meio desta análise, observa-se que os pontos de elevado valor RMS de deformação se encontram nas mesmas regiões, ou seja, interface com a placa central e região externa da dobra, para todas as vigas. Além disto, sem entrar no mérito da seleção do material, considerando apenas a intensidade de deformação RMS, a geometria definida para a Viga Global demonstra estar condizente com a expectativa de suportar as mesmas cargas que a Viga Nacional. Isto se deve ao fato de que a

referência para o projeto foi o componente Nacional, que apresenta uma seção mais elevada, a qual também foi utilizada no projeto da Viga Global.

Figura 5.11 - História da deformação principal ϵ_1 e estatística dos sinais para Viga Global.

5.2.2 Análise de proporcionalidade das medições

A proporcionalidade dos sinais foi em seguida avaliada para verificar qual seria o melhor método de análise do dano considerando a fadiga biaxial, presente em componentes de chapa, onde as tensões ao longo da espessura podem ser desconsideradas.

Por meio da equação 5.6 foram calculadas a proporcionalidade dos sinais de ϵ_1 para as vigas e os resultados das dispersões estão apresentados nas Figuras 5.12, 5.13 e 5.14 para a Viga Nacional, Importada e Global respectivamente, por ocorrência (eixo abscissas) para cada ângulo principal em radianos (eixo ordenado).

Variação do ângulo principal – 13t
(Número de ocorrências x rad)

Figura 5.12 – Proporcionalidade do sinal ε_1 da Viga Nacional

Variação do ângulo principal – 13t
(Número de ocorrências x rad)

Figura 5.13 – Proporcionalidade do sinal ε_1 da Viga Importada

Figura 5.14 – Proporcionalidade do sinal para medição da Viga Global

Nota-se que grande parte dos sinais exibe boa proporcionalidade enquanto alguns exibem comportamento não-proporcional simétrico com dois picos de ocorrências ou uma dispersão mais aberta, que demandariam uma análise pelo método dos planos críticos para uma maior assertividade.

5.2.3 Análise pontos críticos com base método S-N

A necessidade de reduzir a quantidade de sinais para que a análise de durabilidade em fadiga fosse realizada de modo localizado tornou-se relevante. Isto porque, avaliar todos os sinais, considerando ou não a proporcionalidade, para cada ponto instrumentado, geraria uma enorme necessidade de recursos de engenharia e equipamentos que iriam contra a proposta de metodologia enxuta deste trabalho.

Desta forma, foi desenvolvido um algoritmo no software LABVIEW[®], na forma de diagrama de blocos, que pudesse realizar as análises de forma estruturada, com base

nas propriedades de fadiga dos materiais obtidas no capítulo anterior, e tendo os sinais de medição como entrada de carregamento. A Figura 5.15 abaixo apresenta o fluxograma definido para a realização das simulações do dano de acordo com a equação 4.3 aplicando a correção de Morrow (1968) para a tensão média dos aços.

Figura 5.15 – Fluxograma da rotina para análise de dano no método S-N.

Este Fluxograma resultou em um diagrama de blocos resumido na Figura 5.16, onde dentro de cada bloco foram desenvolvidos os sub-diagramas que fornecem as saídas para as análises subsequentes, solicitam as entradas, e calculam os resultados desejados para avaliação do sinal para cada posição instrumentada.

O fluxograma está detalhado no Anexo 2. Foi testado por meio de sinais padrão e os resultados apresentados convergem com os valores calculados manualmente, e, portanto, pode-se considerar a rotina robusta a realizar cálculos com sinais mais complexos.

As análises foram realizadas para as vigas Nacional, Importada e Global, utilizando os coeficientes dos respectivos materiais, obtidos no Capítulo 4 e sumarizados na Tabela 4.13. Como entrada, segundo a teoria de fadiga bi-axial dada pela equação 5.7 para as tensões principais, foram utilizados os sinais de ε_1 , com o objetivo de identificar os pontos com maior dano nos componentes, e limitar as análises

de deformação-vida, seja virtual ou em laboratório, aos carregamentos presentes nestas posições.

Figura 5.16 – Diagrama de blocos no LABVIEW® para cálculo do dano S-N.

Foram avaliados todos os pontos de medição em relação ao *Rainflow* do sinal, simplificado pela extração de picos e vales, de uma volta na pista de testes de homologação. Os resultados são apresentados contendo a curva de fadiga do material S-N, montada a partir dos parâmetros σ'_f , b e E , determinados nos ensaios cíclicos, os resultados do *Rainflow* e o dano calculado. Para resumir, apenas os pontos considerados de maior intensidade absoluta do dano resultante são apresentados para cada viga.

5.2.3.1 Resultados do dano S-N para a Viga Nacional

A Figura 5.17 mostra os resultados de dano para a Viga Nacional que utiliza o material E380TM. Os pontos de medição contendo os maiores valores de dano resultantes foram o R12, localizado em uma região de solda, e o R13 localizado próximo da zona curvada.

A Figura 5.18 mostra estas regiões, que conferem com as análises MEF, e possuem grande proporcionalidade, com desvio dentro da faixa dos 10° de intervalo

para o sinal, podendo ser assumido que uma modelagem complexa $\varepsilon - N$, considerando o método dos planos críticos de deformação, não é necessária.

Figura 5.17 – Resultados do dano para uma volta na pista de testes – Viga Nacional.

Figura 5.18 – Proporcionalidade dos sinais na Viga Nacional.

5.2.3.2 Resultados dano S-N para a Viga Importada

Para análise de dano da Viga Importada foi necessária a manipulação dos sinais que apresentaram deformação plástica conforme mostra a Figura 5.19. Para não influenciar nos cálculos, a deformação residual, medida no extensômetro, foi zerada matematicamente, pois caso contrário seria considerado nos cálculos como uma tensão média permanente, o que na prática não ocorre. Esta modificação poderia causar algum tipo de erro por não considerar o endurecimento do material causado pela deformação plástica, no entanto, para efeito de simplificação, foi considerada a hipótese de que este fenômeno seria considerado na histerese do material.

Figura 5.19 – Manipulação do sinal desconsiderando a plastificação como parte da entrada dos dados

A Figura 5.20 mostra os resultados de dano para a Viga Nacional que utiliza material E380TM. As medições que mostraram maiores valores de dano resultantes foram nos pontos R11 e R12 localizado próximo da zona curvada.

A Figura 5.21 mostra estas regiões críticas, que conferem com as análises MEF, e possuem grande proporcionalidade, com desvio dentro da faixa de 10° de intervalo

para o sinal. Pode, portanto, ser assumido que uma análise complexa $\varepsilon - N$, considerando o método dos planos críticos de deformação, não é necessária.

Figura 5.20 – Resultados do dano para uma volta na pista de testes – Viga Importada.

Figura 5.21 – Proporcionalidade dos sinais na Viga Importada.

5.2.3.3 Resultados dano S-N para a Viga Global

A Figura 5.22 mostra os resultados de dano para a Viga Global que utiliza o aço LNE700 como proposta. Para esta condição não houve dano significativo para os pontos de medição, que se mostraram todos iguais a zero. Assim, foram selecionados os pontos R1 e R5, de acordo com os valores RMS encontrados na análise estatística do sinal, como os que poderiam apresentar algum dano quando realizadas as análises $\epsilon - N$.

A Figura 5.23 mostra estas regiões, que são também embasadas como críticas pelas análises MEF, e neste caso, apresentam menor proporcionalidade, com desvio dentro da faixa dos 10° de intervalo para o sinal R5, podendo ser assumido que uma modelagem complexa, considerando o método dos planos críticos de deformação, não é necessária. Para o sinal R1, por não cumprir o critério do intervalo proporcional de 10° , torna-se mandatória uma avaliação pelo método dos planos críticos.

Figura 5.22 – Resultados do dano para uma volta na pista de testes – Viga Global.

Figura 5.23 – Proporcionalidade dos sinais na Viga Global.

5.2.4 Análise do dano considerando fadiga por deformação localizada ($\epsilon - N$)

As análises de dano pelo método da deformação consideram também a porção plástica da curva de fadiga do material e, portanto toda a informação referente aos ensaios de fadiga realizados nos materiais. Como proposta para considerar o efeito bi-axial dos carregamentos é proposto neste ponto do trabalho uma aproximação do critério de Brown – Miller em conjunto com as equações 4.7, 4.8, 4.9 segundo abaixo:

- A equação 5.7 foi multiplicando a por um fator de 1,7 para se obter a seguinte aproximação com a equação 5.8 de Brown-Miller:

$$1,7 \frac{\Delta \epsilon_1}{2} = 1,7 \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + 1,7 \epsilon_f' (2N_f)^c \quad (5.13)$$

$$1,7 \frac{\Delta \epsilon_1}{2} \cong \left(\frac{\Delta \gamma_{\max}}{2} + \frac{\Delta \sigma_N}{2} \right) = 1,65 \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + 1,75 \epsilon_f' (2N_f)^c \quad (5.14)$$

- Assim, para atender a este critério que apresenta uma aproximação realística para metais dúcteis, caso dos materiais em análise, todo o sinal correspondente ao histograma de $\epsilon_1 \times t$ será multiplicado na entrada pelo fator 1,7.

- Além disto, a equação 4.2 de Ramberg-Osgood é utilizada com os coeficientes cíclicos para determinar o valor de σ_m e aplicar na equação 5.2 de Morrow, resultando no modelo a seguir:

$$1,7 \frac{\Delta \epsilon_1}{2} \approx 1,65 \frac{\sigma_f' - \sigma_m}{E} (2N_f)^b + 1,75 \epsilon_f' (2N_f)^c \quad (5.15)$$

Desta forma, a equação 5.15 associada à equação 4.2 fará parte do algoritmo construído em VBA (linguagem Visual Basic) para determinação do dano nos materiais por meio de um processo de iteração numérica de Newton-Raphson detalhada por Franco (2006). A Figura 5.24 mostra resumidamente como serão os processos iterativos desta rotina desenvolvida neste trabalho.

Estimativa de dano baseado em e-N

Figura 5.24 – Fluxograma da rotina para análise de dano no método ϵ -N.

O código em VBA criado para realização dos cálculos de dano está detalhado no Apêndice 2, em conjunto com o processo de validação dos resultados obtidos, testado aplicando o valor encontrado novamente na equação para verificação da igualdade recorrente. Os resultados apresentados convergem com os valores obtidos na iteração manual, e, portanto, podemos considerar esta rotina também como robusta.

Como parte do processo de avaliação do problema foi avaliada os dados do *Rainflow* apenas dos pontos levantados como críticos nos cálculos S-N, simplificando a quantidade de resultados e permitindo reduzir o esforço deste procedimento, mais complexo, e que demanda maior tempo de máquina e conhecimento técnico. Os resultados são apresentados contendo os sinais de ε_1 multiplicados por 1,7, os coeficientes do material empregado e o dano resultante.

Inicialmente serão apresentados os resultados do dano para uma volta na pista de testes padrão, que serão posteriormente comparados com o critério de homologação considerando o dano total aplicando a regra de Palmgren - Miner para o dano acumulado conforme equação 5.3.

5.2.4.1 Resultados dano ε -N para a Viga Nacional

A Figura 5.25 mostra os resultados de dano para uma volta na pista de testes padrão para a Viga Nacional que utiliza material E380TM. O resultado mostra o ponto de maior dano previsto como sendo o R12 com dano de 2,32 E-05.

Análise de dano e-N

Colunas do rainflow: 220 Linhas do rainflow: 220 Multiplicador de amplitude: 1.7

Coefficientes do material:

ϵ_f : 0.269773943

κ' : 588,03 n' : 0.0754 σ_f : 702

b : -0.0695 c : -0.5653 E : 187900

Arquivo de saída: R12-E1(mult 1,7).t

Resultados:

Períodos: 43170.6198958594

Dano: 2.31639018020196E-05

Perc. aprov: 03%

Figura 5.25 – Tela do programa ϵ -N e resultado do dano para a Viga Nacional.

5.2.4.2 Resultados dano ϵ -N para a Viga Importada

A Figura 5.26 mostra os resultados de dano para uma volta na pista de testes padrão da Viga Nacional que utiliza material St52. O resultado mostra o ponto de maior dano previsto como sendo o R12 com dano de 1,50 E-03.

Análise de dano e-N

Colunas do rainflow: 250 Linhas do rainflow: 250 Multiplicador de amplitude: 1.7

Coefficientes do material:

ϵ_f : 0.310

κ' : 812.456 n' : 0.1737 σ_f : 827.59

b : -0.1132 c : -0.5335 E : 210000

Arquivo de saída: R12-E1(mult 1,7).t

Resultados:

Períodos: 666.62973333108

Dano: 1.50008310460907E-03

Perc. aprov: 26%

Figura 5.26 – Tela do programa ϵ -N e resultado do dano para a Viga Importada.

5.2.4.3 Resultados dano ϵ -N para a Viga Global

A Figura 5.27 mostra os resultados de dano para uma volta na pista de testes padrão da Viga Global que utiliza material LNE700. O resultado mostra o ponto de maior dano previsto como sendo o R1 com dano de 2,06 E-05, diferente da análise S-N que mostrou todos os pontos sem a presença de qualquer dano.

The screenshot shows a software window titled "Análise de dano e-N". It contains several input fields and a results section.

Inputs:

- Colunas do rainflow: 250
- Linhas do rainflow: 250
- Multiplicador de amplitude: 1.7
- Coefficientes do material:**
 - ϵ_f : 6.71197197
 - σ_f : 967.7
 - E : 194600
 - k' : 799.8
 - n' : 0.0872
 - b : -0.08557
 - c : -0.919
- Arquivo de saída: saída(mult1,7).txt

Results:

- Períodos: 48454.702078455
- Dano: 2.0637831977191E-05
- Perc. aprov: 02%

There is an "Executar" button on the left side of the window.

Figura 5.27 – Tela do programa ϵ -N e resultado do dano para a Viga Global.

5.2.5 Análise do desempenho das vigas considerando os resultados S-N e ϵ -N

O critério de desempenho que as vigas devem atender é suportado pela distância percorrida no trecho padrão de durabilidade estipulado para homologação final. Este trecho corresponde a uma pista de durabilidade acelerada com 17km de distância, no qual o veículo, e, conseqüentemente seus sistemas e componentes, devem cumprir 50.000 km de rodagem. Não faz parte do escopo deste trabalho discutir o critério de aprovação, mas sim utilizar este critério como fator de desempenho estrutural das vigas em análise.

Desta forma, com os resultados de dano para uma volta no trecho padrão, podemos considerar um bloco de medições como uma volta completa e, portanto, para atender ao critério de homologação, os componentes deveriam estar aptos a cumprir 2942 voltas ($50.000\text{km} / 17\text{km} = 2942$ voltas).

Os resultados de dano segundo Palmgren – Miner para as Vigas em trabalho permitiram calcular quantas voltas seria possível rodar antes da falha e estão apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Quantidade de voltas previstas no trecho padrão segundo cálculos de dano por S-N e ϵ - N

	E380TM		St52		LNE700	
	S-N	ϵ -N	S-N	ϵ -N	S-N	ϵ -N
Nacional	247524	43103				
Europa			27	666		
Global					∞	48402

Os valores calculados se diferenciam consideravelmente nos dois métodos e pode-se dizer que o método S-N é menos conservador nos casos das vigas Nacional e Global, enquanto que para a Viga Importada os resultados se deram mais conservadores. Esta diferença se deve ao fato da Viga Importada experimentar uma grande quantidade de deformação plástica, região em que a modelagem pelo método S-N apresenta baixa correlação com uma curva pouco inclinada. Ao contrário, para a Viga Nacional e Global, que apresentam baixa ocorrência de deformação plástica, a previsão de falha se tornou mais conservadora para o método ϵ - N, pois a equação de dano não está modelada com um ponto de corte onde se considera vida infinita, e continua decaindo lentamente após 1×10^6 ciclos.

Com base nos resultados de fadiga localizada do modelo ϵ - N pode-se verificar que a Viga Importada não conseguiria cumprir o critério de homologação para a aplicação definida, enquanto que a Viga Global, recém desenvolvida, deve cumprir o

critério que atualmente é atendido pela Viga Nacional, comprovado por diversos testes já realizados no passado.

Esta constatação se tornou evidente após a falha da Viga Importada ocorrida no trecho de durabilidade estrutural. Como havia necessidade de rodar um veículo já na arquitetura e projeto definido no Capítulo 3, e devido à indisponibilidade de protótipo da Viga Global, foi decidido na ocasião realizar a montagem e rodagem do componente importado a fim de homologar outros sistemas que faziam parte deste programa específico de testes.

A Figura 5.28 apresenta os detalhes da ocorrência desta fratura para correlação com os métodos de previsão em estudo. De acordo com os dados da falha, o componente teve uma durabilidade de 15801 km que corresponde a 929 voltas no trecho. Apesar de ser apenas uma ocorrência, esta corrobora a tendência do método $\epsilon - N$ apresentar uma boa correlação com os dados experimentais.

Figura 5.28 – Dados experimentais da falha da Viga Importada na pista padrão de homologação.

Para o desempenho da Viga Global, é de se esperar que venha a cumprir o programa de durabilidade sem ocorrência de falha, visto que foi calculada uma vida de

48402 voltas pelo método $\epsilon - N$, que corresponde a uma ciclagem cerca de 15 vezes superior ao critério de voltas necessário para homologação no trecho.

5.3 DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA DE TESTES NO MATERIAL

O desafio de reproduzir um método experimental para verificação da integridade do material em laboratório aplicando condições de contorno que pudessem representar os esforços localizados que estariam submetidos em condições de serviço para validar a durabilidade do componente, foi também parte do escopo deste trabalho.

Conforme definição do programa de testes em veículo, este precisa rodar 50.000km em pista padrão de durabilidade para que a homologação seja efetivada. O trecho de durabilidade acelerada correspondente deve ser realizado a uma velocidade constante de 30km/h como parte do critério. Assim, para completar este teste e assegurar a vida para uma amostra, seriam necessários cerca de 100 dias úteis para completar o percurso, rodando em dois turnos de trabalho.

A proposta de realizar ensaios em corpos de provas surgiu como uma alternativa para homologar o componente, focando novamente nas regiões críticas para fratura, determinadas inicialmente pelos cálculos MEF, instrumentadas e medidas, e analisadas teoricamente pelas rotinas desenvolvidas para S-N e $\epsilon - N$.

Ensaio de vida acelerados em componente são comumente realizados para validar a vida em fadiga com base em metas de condições de uso e cronograma de projeto. O conhecimento dos carregamentos de entrada atuando no componente é crucial para gerar o espectro de cargas que represente a condição de serviço.

Portanto, o objetivo passa a ser o de encontrar um método que possa determinar os carregamentos para realização do ensaio, tal que sejam representativos em termos

do dano, considerando a fadiga bi-axial. Isto, para ser aplicado em um ensaio uniaxial, realizado em equipamento de laboratório que tenha recursos para ciclar em elevada frequência, minimizando o tempo de teste ao extremo.

O resultado de investigações e estudos foi criar um procedimento que gerasse os esforços uniaxiais que produzissem o mesmo dano considerando os materiais e medições para cada Viga, para serem aplicados nos mesmos corpos de provas utilizados no levantamento das propriedades cíclicas dos materiais, em uma máquina servo-assistida controlada por um programa que representasse o bloco de carga principal equivalente (F_1) na maior frequência possível sem alterar o sinal de entrada. A Figura 5.29 mostra o conceito do método esquematicamente.

Este conceito será explorado deste ponto em diante detalhando os passos empregados em cada etapa até a realização dos ensaios nos três materiais e coleta dos ciclos resultantes até a falha. Estes resultados serão avaliados do ponto de vista da confiabilidade pelo método de Weibull e comparado aos valores de vida calculados pelo programa criado para o método $\varepsilon - N$.

Análise de dano baseado em $\varepsilon - N$

Figura 5.29 – Conceito do método para ensaio do material submetido ao carregamento de dano.

5.3.1 Obtenção do sinal equivalente ao dano no estado biaxial de tensão

De acordo com o conceito da metodologia, um sinal equivalente que reproduzisse o dano esperado em condições de serviço é o primeiro passo para realização de um ensaio representativo.

Para isto, a rotina criada para análise de fadiga local $\epsilon - N$, que considera a equação 5.15 como modelo de análise biaxial neste trabalho. Esta equação foi estendida para não somente fornecer o dano acumulado, mas também gerar um arquivo de *Rainflow* contendo as características dos ciclos que efetivamente contribuem para a somatória. Estes ciclos estão na forma original da entrada, ou seja, com a grandeza principal em deformação. Esta, por sua vez, poderia ser a medida de controle do equipamento de teste, porém para atender ao objetivo de realizar o ensaio no menor tempo possível. E como o extensômetro de apoio comumente utilizado não possui precisão acima de 5Hz, uma alternativa seria o controle por meio de forças pela célula de carga, que permitiria chegar até uma frequência de ensaio em cerca de 50Hz.

Assim, utilizando o modelo de Ramberg-Osgood em conjunto com os coeficientes cíclicos obtidos para os materiais, seria possível determinar as tensões máximas e mínimas para o conjunto de ciclos contados pelo método *Rainflow* para **duas voltas** na pista de homologação, devido a presença de meio ciclo na contagem de *Rainflow*. A divisão pela área do corpo de provas fornece o arquivo de entrada para um ensaio na forma de blocos de cargas, conforme apresentados na Figura 5.30 para a Viga Nacional, Figura 5.31 para a Viga Importada e Figura 5.32 para Viga Global.

Figura 5.30 – Bloco de carregamento equivalente da Viga Nacional para o ponto R12.

Figura 5.31 – Bloco de carregamento equivalente da Viga Importada para o ponto R12.

Figura 5.32 – Bloco de carregamento equivalente da Viga Global para o ponto R1.

Analisando os sinais equivalentes de forças, percebe-se que o material da Viga Global deverá suportar cargas de tração maiores do que das outras vigas. Comparando com a Viga Nacional, que é a referência em durabilidade, este comportamento é justificado pela diferença de espessura, que resulta em uma menor tensão, e consequentemente as forças impostas localmente no material E380TM serão menores.

Já para a Viga Importada, devido às características do material, foi constatado que a quantidade de ciclos relevantes do Rainflow, resultados da análise de dano, é da ordem de 200 vezes maiores que o das outras vigas. Esta avaliação permite concluir que este processo de geração de um sinal equivalente está diretamente ligado ao sinal de deformação medido, que para um mesmo carregamento de pista, produz um histograma de valores distintos de acordo com as propriedades de elasticidade, resistência e encruamento do material. Assim, utilizar o sinal de deformação medido em um componente fabricado de um determinado material para levantar um novo padrão de carregamento utilizando as propriedades de outro material deve levar a erros de previsão principalmente caso haja uma grande quantidade de deformação plástica presente no histograma.

5.3.2 Teste e resultados de durabilidade em corpos de provas

Realizadas todas as análises teóricas e dispondo de uma proposta de sinal equivalente com base no dano total de uma volta na pista de homologação, é iniciado o procedimento experimental para verificar o comportamento localizado do material submetido aos carregamentos principal (F_1) na região crítica da chapa.

Os corpos de prova utilizados nestes ensaios foram retirados dos componentes manufaturados seguindo o mesmo procedimento adotado no Capítulo 4 para a obtenção das propriedades dos materiais. No entanto, para este caso, foi considerada apenas a direção transversal às vigas por estarem mais próximas às regiões encruadas do processo. A Figura 5.33 mostra as dimensões finais deste corpo de prova, que teve

seu tamanho reduzido a fim de utilizar os equipamentos de ensaios disponíveis no período que pudessem aplicar o carregamento equivalente.

Figura 5.33 – Dimensões (mm) dos corpos de prova para os ensaios de durabilidade equivalentes

Os ensaios foram realizados em equipamento semelhante ao da Figura 4.12, porém com um controle de força, sendo realizado pelo equipamento por meio dos sensores de carga. Esta arquitetura pode ser visualizada na foto da Figura 5.34 que mostra um espécime no decorrer do ensaio.

Figura 5.34 – Equipamento de ensaio durante o teste de um corpo de prova.

Foram realizados ensaios para diversas amostras de cada material submetidas aos carregamentos principais equivalentes e anotados quantos blocos de carregamento o material suportou até a fratura completa. Os resultados foram tabulados e estão apresentados nas Tabelas 5.2, 5.3, 5.4, para a Viga Nacional, Importada e Global referenciadas aos seus materiais de construção.

Tabela 5.2 – Resultados dos ensaios para as amostras da Viga Nacional (material E380TM)

Resultados Viga Nacional			
2 Voltas = 1 Bloco = 33 ciclos			
Amostra	No. Ciclos	No. Blocos	No. Voltas
BN1 - T	433123	13125	26250
BN2 - T	520304	15767	31534
BN3 - T	382079	11578	23156
BN4 - T	352819	10691	21382
BN5 - T	253727	7689	15378
BN6 - T	305505	9244	18488
BN7 - T	712461	21590	43180

Tabela 5.3 – Resultados dos ensaios para as amostras da Viga Importada (material St52)

Resultados Viga Importada			
2 Voltas = 1 Bloco = 1280 ciclos			
Amostra	No. Ciclos	No. Blocos	No. Voltas
BI1 - T	1118264	874	1748
BI2 - T	776027	606	1212
BI3 - T	776048	606	1212
BI4 - T	949813	742	1484
BI5 - T	782427	607	1214
BI6 - T	709121	554	1108
BI7 - T	606177	473	946

Tabela 5.4 – Resultados dos ensaios para as amostras da Viga Global (material LNE700)

Resultados Viga Global			
2 Voltas = 1 Bloco = 56 ciclos			
Amostra	No. Ciclos	No. Blocos	No. Voltas
BG1 - T	120412	21502	43004
BG2 - T	542869	9694	19388
BG3 - T	557534	9956	19912
BG4 - T	898844	16051	32102
BG5 - T	876646	15654	31308
BG6 - T	2609301	46595	93190
BG7 - T	2218467	39615	79230

Lembrando que para completar o teste de homologação é necessário cumprir os 50.000km de rodagem, que corresponde a um total de 2941 voltas na pista, segundo este ensaio, as vigas Nacional e Global estariam homologadas, enquanto que uma falha seria esperada para a Viga Importada, conforme previsto nos cálculos $\varepsilon - N$ e de fato ocorrido com 15805 km (929 voltas) na pista de homologação.

Para uma avaliação estatística dos resultados foi realizada uma análise de Weibull buscando obter as grandezas de confiabilidade para cada ensaio realizado. Os resultados estão mostrados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Curvas de Weibull para os ensaios em laboratório pelo método do Rank Médio

VIGA NACIONAL		RANK MÉDIO		GRÁFICO	
N.º do C.D.P.	Ni (Voltas)	i (Ordem)	F(N)	ln (Ni)	ln (-ln(1-F(x)))
BN5 - T	15378	1,0000	0,1250	9,640693196	-2,013418678
BN6 - T	18488	2,0000	0,2500	9,824877152	-1,245899324
BN4 - T	21382	3,0000	0,3750	9,970304726	-0,755014863
BN3 - T	23156	4,0000	0,5000	10,05000921	-0,366512921
BN2 - T	26250	5,0000	0,6250	10,17542127	-0,019356889
BN1 - T	31534	6,0000	0,7500	10,35882161	0,32663426
BN7 - T	43180	7,0000	0,8750	10,6731327	0,732099368

VIGA IMPORTADA		RANK MÉDIO		GRÁFICO	
N.º do C.D.P.	Ni (Voltas)	i (Ordem)	F(N)	ln (Ni)	ln (-ln(1-F(x)))
BI7 - T	946	1,0000	0,1250	6,852242569	-2,013418678
BI6 - T	1108	2,0000	0,2500	7,010311867	-1,245899324
BI2 - T	1212	3,0000	0,3750	7,100027167	-0,755014863
BI3 - T	1212	4,0000	0,5000	7,100027167	-0,366512921
BI5 - T	1214	5,0000	0,6250	7,101675972	-0,019356889
BI1 - T	1484	6,0000	0,7500	7,302496424	0,32663426
BI4 - T	1748	7,0000	0,8750	7,466227556	0,732099368

VIGA GLOBAL		RANK MÉDIO		GRÁFICO	
N.º do C.D.P.	Ni (Voltas)	i (Ordem)	F(N)	ln (Ni)	ln (-ln(1-F(x)))
BG2 - T	19388	1,0000	0,1250	9,872409597	-2,013418678
BG3 - T	19912	2,0000	0,2500	9,899077844	-1,245899324
BG5 - T	31308	3,0000	0,3750	10,35162893	-0,755014863
BG4 - T	32102	4,0000	0,5000	10,37667361	-0,366512921
BG1 - T	43004	5,0000	0,6250	10,66904841	-0,019356889
BG7 - T	79230	6,0000	0,7500	11,28011029	0,32663426
BG6 - T	93190	7,0000	0,8750	11,4423957	0,732099368

Das equações para as regressões lineares de cada ensaio, é possível obter os parâmetros de Weibull da equação 5.12. A Tabela 5.6 apresenta os parâmetros e os valores estatísticos de média e variância para os ensaios realizados. Aplicando estes parâmetros na equação de Weibull, foram obtidos os gráficos da Figura 5.35 da probabilidade de falha para a quantidade de voltas rodadas na pista de homologação.

Tabela 5.6 – Parâmetros de Weibull para os resultados dos ensaios em laboratório

Parâmetros de Weibull			
VIGA	β	C	η
NACIONAL	2,663	27,37	29082,21
IMPORTADA	4,459	32,29	1396,23
GLOBAL	1,436	15,64	53710,56

Gráfico de Weibull para as Vigas

Figura 5.35 – Gráfico de Weibull para os resultados dos ensaios em laboratório.

Dispondo destas curvas é possível determinar a probabilidade de falha de um universo de componentes submetidos aos ensaios. Ou seja, a ciclagem necessária para

uma vida B_{10} (falha de 10% das amostras) seria o equivalente aos valores encontrados em destaque na Figura 5.35, que para a Viga Internacional está bem próximo ao número de voltas da ocorrência da falha ($B_{10_{\text{Weibull}}} = 850$ voltas versus Falha = 929 voltas) e homologa a Viga Nacional e Global por apresentarem valores quatro vezes maiores que o necessário para a aprovação no trecho durabilidade padrão.

5.3.3 Avaliação de troca dos materiais

Com o projeto da Viga Global homologado com o material LNE700, algumas investigações possíveis de serem realizadas com base na metodologia foram planejadas como contribuição para um processo de seleção dos materiais.

Inicialmente foi considerado o sinal original da Viga Importada para ciclagem no ensaio em laboratório. Como este sinal representa o dano para um material de qualidade inferior, em termos de cargas, foi verificado que para um material mais nobre, o tempo de ensaio seria demasiadamente longo, pois possui ciclos que gerariam um dano nulo a este novo material. Isto se comprovou após 200hs de ensaios, equivalente a 33254 blocos, equivalente a 66508 voltas, quando o ensaio foi interrompido sem falha no material.

Em seguida, optou-se por utilizar os sinais de deformação medidos em novos cálculos com uma mudança simples dos coeficientes, considerando que o comportamento da deformação teria dependência somente da geometria do componente. Após a primeira ciclagem de uma amostra do material LNE700 com o sinal equivalente para a geometria da Viga Importada, foi encontrado um resultado aquém do esperado de apenas 150 blocos. Foi verificado assim, que esta hipótese é válida somente quando o material está submetido à fadiga dentro do regime elástico, visto que no regime plástico as propriedades de ductilidade e encruamento modificam a resposta da deformação para uma mesma carga.

Assim, foi proposto um novo procedimento que transforma inicialmente o sinal de deformação originalmente medido em um sinal de carga equivalente localizado, que seria transformado em um sinal de deformação esperado para o material alternativo por meio da equação de Ramberg-Osgood. A Figura 5.36 mostra o fluxograma elaborado para a realização das operações utilizando as rotinas já desenvolvidas.

Análise de dano baseado em e-N

Para análise com mudança de material

Figura 5.36 – Fluxograma para análise do dano de determinado componente variando o material.

A Tabela 5.7 mostra os resultados dos cálculos obtidos para a comparação de durabilidade para diferentes materiais e geometrias. Pode ser observado nesta simulação, que a geometria da Viga Importada, reprovada no trecho padrão e ensaios do material, poderia ser homologada com os materiais E380TM (conformação a frio) ou LNE700 (conformação a quente).

Tabela 5.7 – Quantidade de voltas previstas no trecho padrão segundo cálculos de dano por $\epsilon - N$

	E380TM	ST52	LNE700
	$\epsilon - N$	$\epsilon - N$	$\epsilon - N$
Nacional	43103	999	103991
Importada	50580	666	102465
Global	15684	485	48402

No entanto, observando a tabela, presume-se que o projeto da Viga Importada está mais bem dimensionado que a Viga Global. Esta constatação não é válida segundo as análises MEF anteriormente realizadas, o que gera dúvidas quanto à validação da metodologia da Figura 5.36, merecendo uma melhor investigação sobre os efeitos das transformações e da manipulação de um sinal com grandes eventos de deformação plástica conforme demonstrado pela Figura 5.20.

5.4 CONCLUSÕES

Este capítulo demonstrou um método eficiente para acessar a confiabilidade do componente em desenvolvimento utilizando meios teóricos e experimentais para definir a probabilidade de sucesso do novo projeto.

A manipulação das medições realizadas nos pontos críticos definidos pelos cálculos MEF, para obtenção de um sinal equivalente que representasse o ponto com maior probabilidade de dano, e consequentemente de fratura, em conjunto com a estimativa de vida por meio das equações de Brown-Miller e Ramberg-Osgood, em conjunto com a correção de Morrow para tensão média, resultou em uma equação que fornecesse valores representativos do dano, que vieram a ser reproduzidos experimentalmente em ensaios de laboratório.

Estando, porém o fenômeno de falha por fadiga relacionada a uma probabilidade de fratura, que corresponde ao nascimento e propagação de uma trinca até o colapso final da estrutura, a possibilidade de ensaiar diversos corpos de provas para o levantamento da confiabilidade somente é possível quando os experimentos são de curta duração.

A geração de um sinal equivalente utilizando somente as deformações principais do sinal medido que efetivamente geram dano, em conjunto com um equipamento de ensaio moderno, permitiu acelerar os experimentos considerando as características

locais representados por corpos de prova retirados diretamente do componente em projeto.

A representatividade do método pôde ser comprovada pelos resultados obtidos nas curvas de Weibull para uma probabilidade de falha em 10%, que resultou em valores muito próximos à falha observada em campo, validando assim todo o procedimento adotado.

Para uma verificação da possibilidade de utilização de outros materiais, utilizando somente os dados disponíveis, não foi possível obter um resultado confiável, sendo que a sugestão seria realizar novos ensaios considerando os carregamentos originais e outros recalculados para uma validação.

Para o projeto da Viga Global, conclui-se que sua durabilidade será semelhante ao da Viga Nacional, com uma massa inferior e geometria intercambiável com a Viga Importada, atingindo as metas iniciais do projeto.

Para futuros desenvolvimentos de componentes, a metodologia de homologação está validada para histogramas contendo uma proporcionalidade na faixa dos 10^0 , para regiões de chapas de aço que não sofrem a influência de zonas termicamente afetadas por solda, podendo ser aplicada com segurança.

Esta conclusão abre novas possibilidades de homologações estruturais de componentes sem a necessidade de rodar veículos nos trechos padrão, para efeito de validação de projetos.

5.5 REFERÊNCIAS

BRACCESI, C. et al. An equivalent uniaxial stress process for fatigue life estimation of mechanical components under multiaxial stress conditions, **International Journal of Fatigue**, Elsevier Science, v. 30, p. 1479 – 1497, 2007.

BROWN, M. W.; MILLER, K. J., A theory for fatigue failure under multiaxial stress–strain conditions, **Proceedings of Institute of Mechanical Engineers**, v. 187, p. 745–755, 1973.

CONLE F.A.; CHU C.-C. Fatigue analysis and the local stress–strain approach in complex vehicular structures, **International Journal of Fatigue**, Elsevier Science, v. 19, p. 317-323, 1997.

CHU C.-C., Multiaxial fatigue life prediction method in the ground vehicle industry **International Journal of Fatigue**, Elsevier Science, v. 19, p. 325-330, 1997.

DOWLING, N. E. Mechanical Behavior of Materials, 3rd edition, Englewood Cliffs: Prentice Hall, 2007.

DRESSLER, K. et al. **Extrapolation of Rainflow Matrices**, SAE No. 960569, 1996.

DRAPER, J. **Modern metal fatigue analysis**, EMAS, 2008.

FATEMI, A.; SHAMSAEI, N., Multiaxial Fatigue: An overview and some approximation models for life estimation, **International Journal of Fatigue**, Elsevier Science, v. 33, p. 948–958, 2011.

FRANCO, N.B. **Cálculo Numérico**, São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2006.

GRUBISIC, V. Determination of load spectra for design and testing, **International Journal of Vehicle Design**, Vol. 8, No. 4, 1986, pp. 225 – 230.

HEULER, P.; SEEGER, T. A criterion for omission of variable amplitude loading histories, **International Journal of Fatigue**, Elsevier Science, v. 8, p. 225-230, 1986.

KIM, Y.; SONG, J.; PARK, J. An expert system for fatigue life prediction under variable loading, **Expert Systems with Applications**, Elsevier Science, v.36, p. 4996-5008, 2009.

KIKUKAWA, M., et al. Low cycle fatigue under varying strain conditions (effects of the mean plastic strain and stress factors), **Bulletin of the JSME**, v. 20, p. 145–152, 1977.

LEE, Y. et al, **Fatigue Testing and Analysis: Theory and Practice**, Oxford: Elsevier, 2005

MABSON, S.S.; HALFORD G. R. **Fatigue and durability of structural materials**, Ohio: ASM International, 2006

MACHA, E.; NIESLONY, A. Critical plane fatigue life models of materials and structures under multiaxial stationary random loading: The state-of-the-art in Opole Research Centre CESTI and directions of future activities, **International Journal of Fatigue**, Elsevier Science, v. 39, p. 95-102, 2012.

MORROW, J. D. Fatigue Design Handbook, **SAE Advances in Engineering**, SAE, v. 4, p. 21 – 29, 1968.

SMITH, K. N.; WATSON, P.; TOPPER, T. H. A Stress-Strain Function for the Fatigue of Metals, **Journal of Materials**, ASTM, Vol. 5, No. 4, Dec. 1970, pp. 767-778.

STEPHENS, R. I.; DINDINGERT, P. M.; GUNGER J. E. Fatigue damage editing for accelerated durability testing using strain range and SWT parameter criteria, **International Journal of Fatigue**, Elsevier Science, v. 19, p. 599-606, 1997.

STEPHENS, R. I. et al. **Metal Fatigue in Engineering**, John Wiley & Sons, 2001.

SONSINO, C. M. Fatigue testing under variable amplitude loading, **International Journal of Fatigue**, Elsevier Science, v. 29, p. 1080–1089, 2007.

WANG, C. H.; BROWN, M. W. Life prediction techniques for variable amplitude multiaxial fatigue – Part1: Theories, Journal of Engineering Materials and Technology, v. 118, p. 367 – 370, 1996.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES FINAIS

Processos enxutos de desenvolvimento são definidos por um planejamento sistêmico, profissionais capacitados e com conhecimento e uma infra-estrutura que permita a realização do trabalho com qualidade.

A sistematização apresentada no planejamento inicial do projeto, substituindo atribuições de trabalho embasadas em recursos físicos por entregas de informações criadas por meio de conhecimento tecnológico, demonstrou grande eficiência e eficácia ao longo de todo trabalho.

Neste período, ferramentas de engenharia foram aplicadas nas distintas fases como forma de suportar a aplicação do conhecimento e permitir que os resultados fossem comunicados de forma estruturada aos participantes do grupo multidisciplinar responsável por realizar as decisões ao longo do projeto.

As ferramentas aplicadas neste trabalho refletem as principais necessárias para realização deste projeto e devem ser de domínio técnico para todo profissional de engenharia que desenvolve sistemas e produtos mecânicos estruturais:

- Planejamento e gestão de projetos;
- Seleção de conceitos (Matriz de decisão/ Modelagem/ Testes conceituais)
- Projeto produto e processo com auxílio da computação (CAD)
- Simulação numérica (MBS/ MEF/ Diagrama de blocos/ Programação);
- Confiabilidade no projeto e teste (Árvore Funcional/ FTA/ DFMEA/ Weibull);

- Influência dos processos de produção nas características do produto;
- Caracterização de materiais (ensaios monotônicos e de fadiga);
- Análise de sinais e simulação de durabilidade (cálculo de vida $S - N / \epsilon - N$);
- Fundamentação lógica e elaboração de relatórios e pareceres.

O conhecimento das teorias e práticas de todo o conjunto que conta a história de um projeto de desenvolvimento permite ao profissional participar de programas de forma a interagir com o grupo multifuncional, contribuindo para o sucesso do projeto e propor inovações que venham a agregar novos métodos e métricas aos processos existentes.

O fruto inovador de uma homologação estrutural de componentes em chapa por meio da proposta validada neste trabalho reflete a motivação de melhoria contínua da técnica e sua aplicação nos programas correntes. Vem agregar à comunidade da engenharia mais um método para acelerar a fase experimental focando no problema de maneira localizada.

Esta contribuição tecnológica agrega-se ao processo de desenvolvimento enxuto para acelerar a disponibilidade de uma homologação estrutural antecipada, permitindo que o projeto tenha elevada maturidade e confiabilidade dispensando o esforço de uma durabilidade em condições de serviço.

A nova técnica proposta de validação estrutural à fadiga, associada ao o método sistematizado de aplicação das ferramentas de projeto nas distintas fases, em conjunto com a realização dos distintos pacotes multifuncionais de trabalho, fecha por enquanto a contribuição deste trabalho para o estado da arte na área de desenvolvimento de sistemas e componentes mecânicos estruturais.

Algumas propostas de continuidade em diversas disciplinas são, porém, incluídas como linhas de pesquisa como sugestão para futuros trabalhos:

- Planejamento de projetos: Aplicação do DFMEA como ferramenta de planejamento e controle dos projetos; Papel dos fornecedores na cadeia de geração do conhecimento na indústria Brasileira; Avanço da aplicação de modelagem e simulação para uma fase de decisão da viabilidade de um desenvolvimento.

- Ferramentas de simulação: Integração de plataformas distintas MBS – MEF – Análise de Sinais – Correlação por meio de um fluxo puxado de trabalho e banco de dados de resultados; Modelagem e simulação de durabilidade localizada ϵ – N em uniões soldadas;

- Processos de manufatura: Caracterização de processos que modifiquem a estrutura resultante do material; Influência do processos térmicos nas propriedades do material; criação de processos de manufatura que modifiquem a estrutura do material para obtenção de ganhos de performance estrutural;

- Ensaios de durabilidade: Validação de ensaios localizados de fadiga em uniões soldadas; Criação de procedimento para análise de diferentes materiais para uma única condição medida de carregamento; Validação de ensaios localizados considerado fatores externos de temperatura e corrosão.

A continuidade da aplicação do método proposto pode e deve ser validada para componentes que operem em situações de ambiente extrema como na indústria do petróleo, mineração, aeroespacial e naval. Para as indústrias de bens de consumo, em condições ambientais normais, a metodologia pode ser inserida na rotina dos desenvolvimentos.

Anexo 1 – Sinais de medições selecionados após análise s-n

A1.1 VIGA NACIONAL

Roseta 12 – ϵ_1

	X	Y
RMS	1.391459e+003	1.118890e+002
Min	0.000000e+000	-2.522498e+001
Max	2.410077e+003	2.120182e+003
Median	1.205038e+003	1.263484e+001
Delta	2.410077e+003	1.402471e+000
Centroid	1.327999e+003	1.099138e+002
Mean	1.205038e+003	5.480711e+001
Variance	4.840012e+005	9.505473e+003
Skewness	1.323170e-011	4.150032e+000
Std. Dev.	6.957307e+002	9.749602e+001
Rug. Dev.	6.025200e+002	6.318819e+001
Zero Crossings	0.000000e+000	1.704100e+004

Roseta 13 – ϵ_1

	X	Y
RMS	1.391459e+003	9.816621e+001
Min	0.000000e+000	-1.998524e+002
Max	2.410077e+003	1.723710e+003
Median	1.205038e+003	1.228119e+001
Delta	2.410077e+003	2.831590e+000
Centroid	1.299944e+003	0.127257e+001
Mean	1.205038e+003	4.404267e+001
Variance	4.840012e+005	7.696858e+003
Skewness	1.323170e-011	3.301155e+000
Std. Dev.	6.957307e+002	8.773174e+001
Rug. Dev.	6.025200e+002	5.918036e+001
Zero Crossings	0.000000e+000	9.160000e+003

A1.2 VIGA IMPORTADA

Roseta 11 – ϵ_1

	X	Y
RMS	2.508939e+003	1.649315e+003
Min	0.000000e+000	-9.709286e+002
Max	4.331753e+003	5.315898e+003
Median	2.165877e+003	7.729612e+002
Delta	4.331753e+003	1.852325e+003
Centroid	3.137010e+003	1.136017e+003
Mean	2.165877e+003	1.155237e+003
Variance	1.563678e+006	1.385667e+006
Skewness	-9.342747e-012	3.973002e-001
Std. Dev.	1.250471e+003	1.177145e+003
Avg. Dev.	1.082930e+003	1.069064e+003
Zero-Crossings	0.000000e+000	7.680000e+003

Roseta 12 – ϵ_1

	X	Y
RMS	2.508939e+003	1.982764e+003
Min	0.000000e+000	-3.950890e+002
Max	4.331753e+003	6.613965e+003
Median	2.165877e+003	9.751166e+002
Delta	4.331753e+003	2.435093e+003
Centroid	3.115396e+003	1.308339e+003
Mean	2.165877e+003	1.378709e+003
Variance	1.563678e+006	1.719676e+006
Skewness	-9.342747e-012	3.801232e-001
Std. Dev.	1.250471e+003	1.311364e+003
Avg. Dev.	1.082939e+003	1.198323e+003
Zero-Crossings	0.000000e+000	6.914000e+003

A1.3 VIGA GLOBAL

Roseta 1 – ϵ_1

	X	Y
RMS	1.063334e+003	1.138227e+002
Min	0.000000e+000	-6.784392e+002
Max	1.841748e+003	1.522972e+003
Median	9.208738e+002	-7.596536e+000
Delta	1.841748e+003	-1.431874e+000
Centroid	8.722711e+002	3.429854e+001
Mean	9.208738e+002	5.088589e+000
Variance	2.825707e+005	1.292972e+004
Skewness	1.737221e-010	1.907655e+000
Std. Dev.	5.316678e+002	1.137089e+002
Avg. Dev.	4.604375e+002	7.601410e+001
Zero-Crossings	0.000000e+000	1.138300e+004

Roseta 1 – ϵ_1

	X	Y
RMS	1.063334e+003	1.209449e+002
Min	0.000000e+000	-7.235255e+000
Max	1.841748e+003	1.820056e+003
Median	9.208738e+002	1.822611e+001
Delta	1.841748e+003	1.384253e+001
Centroid	8.382063e+002	1.202901e+002
Mean	9.208738e+002	6.074788e+001
Variance	2.825707e+005	1.093738e+004
Skewness	1.737221e-010	4.056481e+000
Std. Dev.	5.316678e+002	1.045819e+002
Avg. Dev.	4.604375e+002	6.511149e+001
Zero-Crossings	0.000000e+000	1.830000e+003

ANEXO 2 – ROTINAS DE CÁLCULO E VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

A2.1 FLUXOGRAMAS DO LABVIEW® PARA CÁLCULO DO DANO TENSÃO -VIDA

1. Entrada de dados de material

2. Entrada do sinal / Transformação: deformação em tensão / Pico e vale / Rainflow

3. Cálculo de dano / Contagem de dano / plotagem dos resultados

A2.2 VALIDAÇÃO DO FLUXOGRAMA: CÁLCULO DO DANO TENSÃO – VIDA

Para avaliar a representatividade do programa de cálculo de vida com base no método tensão-vida, foram realizados cálculos manuais com base em um exemplo de Dowling (2007), sendo que os valores de vida obtidos pelo fluxograma LABVIEW® se igualaram aos resultados, validando o programa:

Dowling, N. E. **Mechanical Behaviour of Materials**, 3rd edition, pg 445, Prentice Hall, 2007.

Programa S-N LABVIEW®

A2.3 ROTINA PARA CÁLCULO DO DANO DEFORMAÇÃO – VIDA

```
Private Sub CommandButton1_Click()

Dim E As Double
Dim K As Double
Dim n As Double
Dim slf As Double
Dim b As Double
Dim elf As Double
Dim c As Double
Dim cc As Double
Dim AA As Double
Dim BB As Double
Dim D1 As Double
Dim N1 As Double
Dim N2 As Double
Dim argsai As String
Dim e_amp As Double
Dim e_med As Double
Dim e_max As Double
Dim e_min As Double
Dim s_amp As Double
Dim s_med As Double
Dim s_max As Double
Dim s_min As Double
Dim n_ciclos As Double
Dim linhas As Double
Dim colunas As Double
Dim sigma As Double
Dim sigma2 As Double
Dim mult As Double

'declaração de variáveis
```

```

colunas = Val(TextBox2)
linhas = Val(TextBox3)

arqsai = ActiveWorkbook.Path & "\" & TextBox14

E = Val(TextBox12)
K = Val(TextBox8)
n = Val(TextBox15)
sif = Val(TextBox9)
elf = Val(TextBox10) 'introdução dos dados de materiais
b = Val(TextBox11)
c = Val(TextBox5)
mult = Val(TextBox16)

tot_cont = 0
parc_cont = 0 ' contador de percentual do arquivo aproveitado

Sheets("plan2").Select
Open arqsai For Output As #1
For i = 3 To (linhas + 3)
    For j = 3 To (colunas + 3)
        n_ciclos = Cells(i, j).Value
        e_amp = Cells(i, 2).Value * 0.000001 * mult 'abertura do arquivo e leitura do Rainflow na planilha 2
        e_med = Cells(2, j).Value * 0.000001

        If n_ciclos <> 0 Then
            tot_cont = tot_cont + 1
            cc = 1000
            sigma = 1
            D1 = 0.1
            e_max = e_med + e_amp / 2
            While cc > 0.00001
                AA = sigma / E + (sigma / K) ^ (1 / n) - e_max
                BB = (((sigma) / E + ((sigma) / K) ^ (1 / n) - e_max) - ((sigma - D1) / E + ((sigma - D1) / K) ^ (1 / n) - e_max)) / D1
                sigma2 = sigma - AA / BB
                cc = Abs(sigma2 - sigma)
                D1 = sigma - sigma2
                sigma = sigma2 'Encontro do sigma máximo pela equação de ramberg-osgood
                If sigma < 0.5 Then
                    cc = 0.00000000001
                End If
            Wend
            s_max = sigma

            cc = 1000
            sigma = 1
            D1 = 0.1
            While cc > 0.00001
                AA = sigma / E + 2 * ((sigma / (2 * K)) ^ (1 / n)) - e_amp
                BB = (((sigma) / E + 2 * (((sigma) / (2 * K)) ^ (1 / n)) - e_amp) - ((sigma - D1) / E + 2 * (((sigma - D1) / (2 * K)) ^ (1 / n)) - e_amp)) / D1
                sigma2 = sigma - AA / BB
                cc = Abs(sigma2 - sigma)
                D1 = sigma - sigma2 'Encontro do range (delta sigma) pela equação de ramberg-osgood na histerese
                sigma = sigma2
                If sigma < 0.5 Then
                    cc = 0.00000000001
                End If
            Wend

            s_amp = sigma
            s_min = s_max - s_amp
            s_med = (s_max + s_min) / 2

            cc = 1000
            N1 = 0.00001
            D1 = 0.00001
            While cc > 0.00001
                AA = (1 * (sif - s_med) / E) * (2 * N1) ^ b + elf * (2 * N1) ^ c - e_amp / 2
                BB = (((1 * (sif - s_med) / E) * (2 * (N1 + D1)) ^ b + elf * (2 * (N1 + D1)) ^ c - e_amp / 2) - ((1 * (sif - s_med) / E) * (2 * N1) ^ b + elf * (2 * N1) ^ c -
                N2 = N1 - AA / BB
                cc = Abs(N2 - N1)
                D1 = N1 - N2 'Encontro do N para uma determinada amplitude de deformação e média de tensão
                N1 = N2
                If N1 > 5000000000 Then
                    cc = 0.000001
                End If
            Wend
            If N1 <= 5000000000 Then
                dano = dano + n_ciclos * 1 / N1
                Print #1, Space(12 - Len(Format(n_ciclos, "#.0")) & Format(n_ciclos, "#.0"));
                Print #1, Space(12 - Len(Format(s_amp, "#.00")) & Format(s_amp, "#.00"));
                Print #1, Space(12 - Len(Format(s_med, "#.0")) & Format(s_med, "#.0")); 'Contagem de dano e impressão dos de n, s_amp e s_med no
                Print #1, Space(12 - Len(Format(s_max, "#.0")) & Format(s_max, "#.0")); 'arquivo de saída
                Print #1, Space(12 - Len(Format(s_min, "#.0")) & Format(s_min, "#.0"));
                Print #1, Space(12 - Len(Format(N1, "#.0")) & Format(N1, "#.0"))
                parc_cont = parc_cont + 1 ' contador de percentual do arquivo aproveitado
            End If
        End If
    Next j
Next i
Close #1
If dano = 0 Then
    resp1 = "infinitos"
    resp2 = "0"
Else
    result = 1 / dano
    resp1 = Str(result)
    resp2 = Str(dano)
    resp3 = Format((parc_cont / tot_cont * 100), "#.00") & "%"

```

A2.4 ROTINA PARA CÁLCULO DO DANO DEFORMAÇÃO - VIDA

Para avaliar a representatividade do programa de calculo de vida com base no método deformação-vida, foram realizados cálculos manuais com base nos resultados de vida obtidos e estes se igualaram à previsão da iteração de Newton, validando o programa:

Validação do programa ε -N

ANEXO 3 – PROCEDIMENTO DE ENSAIO DOS ESPÉCIMES

Os ensaios de nucleação de trinca em amplitude variável dos aços E380TM, St52 e LN700 foram realizados em uma máquina de ensaios dinâmica servo-hidráulica MTS Landmark de 100 kN de capacidade, equipada com um controlador FlexTest GT modelo 439.10. Foi utilizado um compensador de carga ALC que é um programa que, em tempo real, altera as características da servo-válvula do equipamento, para manter resposta desejada a partir do comando solicitado.

Esta ferramenta também é necessária para que não ocorra uma alteração da rigidez do sistema, o que faz com que o comando e a resposta se defasem. Na figura A3.1 pode-se observar o conjunto do ensaio de nucleação de trinca por fadiga.

Figura A3.1 – Em (a) máquina de ensaio MTS LandMark , (b) detalhe do corpo de prova montado na garra hidráulica para o ensaio de AV.


```

Arquivo  Editar  Formatar  Exibir  Ajuda
Filetype=Block-Arbitrary
Date=Tue Jul 27 13:30:00 2006
Channels=1
Channel(1)=Channel 1
Dimension= Force
frequency= 50.0000 Hz
Count= 1.0000 segments
Shape= Sine
Level2= 0.0 kN

Level1
kN
6.24
-1.245
5.35
-2.385
6.17
-1.5625
5.0775
-2.9875
5.125
-2.9375
5.125
-2.9375
4.4875
-3.66

```

Cabeçalho do arquivo.

Valores de força em kN

Figura A3.2 – Arquivo em formato de texto .blk para o ensaio de nucleação de trinca.

O cabeçalho, como mostrado na Figura A3.2, apresenta os dados de entrada como frequência, formato do sinal e o tipo de dado. Os valores de força foram organizados em apenas uma coluna, respeitando o número de ciclos. A figura A3.4 mostra com detalhes o que significa estas informações.

```

Filetype=Block-Arbitrary
Date=Tue Jul 27 13:30:00 2006
Channels=1
Channel(1)=Channel 1
Dimension= Force
frequency= 50.0000 Hz
Count= 1.0000 segments
Shape= Sine
Level2= 0.0 kN

Level1
kN
6.24
-1.245
5.35
-2.385
6.17
-1.5625
5.0775
-2.9875
5.125
-2.9375
5.125
-2.9375
4.4875
-3.66

```

Tipo de arquivo

Data do computador

Canal do programa MPT

Tipo de sinal

Frequência do ensaio

Segmentos

Formato do sinal

Força máxima

Força mínima

Força máxima

Força mínima

Figura A3.4 – Detalhes das informações do cabeçalho do arquivo de texto.

A Figura A3.4 mostra detalhes de cada informação contida no cabeçalho do arquivo de entrada para o ensaio de nucleação de trinca. Todos estes dados podem ser alterados de acordo com os dados a serem inseridos na MTS, como por exemplo, a frequência de ensaio ou o formato do sinal, que nos ensaios foi utilizado na forma senoidal, mas poderia ser alterado para triangular.

A casa decimal dos valores de força deve ser em ponto e não vírgula conforme o sistema inglês, caso contrário, a máquina entende como erro e o ensaio não é executado.

A programação da MTS foi realizada em um programa chamado *Multi Purpose Testware* – MPT®, no qual este arquivo de texto é adicionado, além de informações como qual compensador será utilizado.

Os ensaios foram realizados até a fratura completa dos espécimes e a quantidade de blocos impostos até a falha foi registrada pelo programa.