

**ANÁLISE DE FALHA POR FADIGA  
DE VASO DE PRESSÃO AUTOPORTANTE  
PARA TRANSPORTE RODOVIÁRIO  
DE PRODUTOS PERIGOSOS A GRANDEL**

**ORLANDO MERSCHMANN JÚNIOR**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica  
da Universidade de São Paulo para obtenção  
do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

**São Paulo  
2001**

**São Paulo**  
**2001**

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
FACULDADE DE ENGENHARIA

Orientador:  
Prof. Dr. Gilberto Francisco Martha de Souza

Area de Concentração: Sistemas Mecânicos

Dissertação apresentada à Escola Politécnica  
da Universidade de São Paulo para obtenção  
do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

**ANÁLISE DE FALHA POR FADIGA  
DE VASO DE PRESSÃO AUTOPORTANTE  
PARA TRANSPORTE RODOVIÁRIO  
DE PRODUTOS PERIGOSOS A GRANEL**

**ORLANDO MERSCHMANN JÚNIOR**

## **DEDICATÓRIA**

**Aos meus pais Orlando e Chaja**

## Agradecimentos

Ao professor Dr. Gilberto Francisco Martha de Souza pela orientação e apoio na elaboração desta Dissertação e pela confiança na qualidade de meu trabalho como profissional de Engenharia e professor;

Ao professor Dr. Carlos Alberto Nunes Dias pelo apoio, incentivo, críticas e sugestões ao presente Trabalho;

Ao professor Dr. Miguel Bueta pela análise criteriosa, críticas e sugestões abalizadas que enriqueceram sobremaneira esta Pesquisa;

À Transportes Borelli Ltda., pelo fornecimento de informações importantes para o desenvolvimento deste Trabalho;

À MASA Implementos Rodoviários Ltda., pelo fornecimento de informações técnicas sobre o Equipamento estudado;

São Paulo, 15 de outubro de 2001

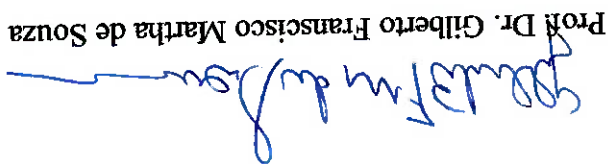
Ilmo. Sr.  
Prof. Dr. José Roberto Cardoso  
DD Presidente da Comissão de Pós-Graduação  
Escola Politécnica da USP

Prezado Professor,

Vimos por meio deste encaminhar à V.Sa. a errata da Dissertação de Mestrado intitulada "Análise de Falha por Fadiga de Vaso de Pressão Autoprotante para Transporte Rodoviário de Produtos Perigosos à Granel" de autoria de Orlando Merschmann Júnior, e por mim orientada, apresentada no dia 10 de outubro de 2001 no Depto. Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos da FPU/SP.

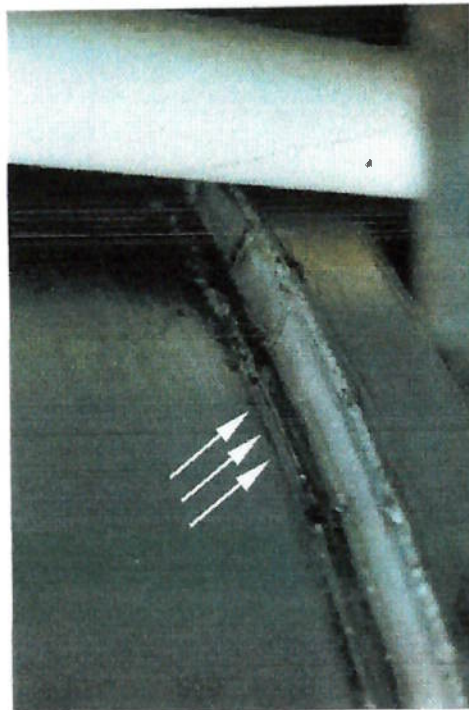
Agradecendo a atenção dispensada por V.Sa., firmamo-nos cordialmente.

Atenciosamente,

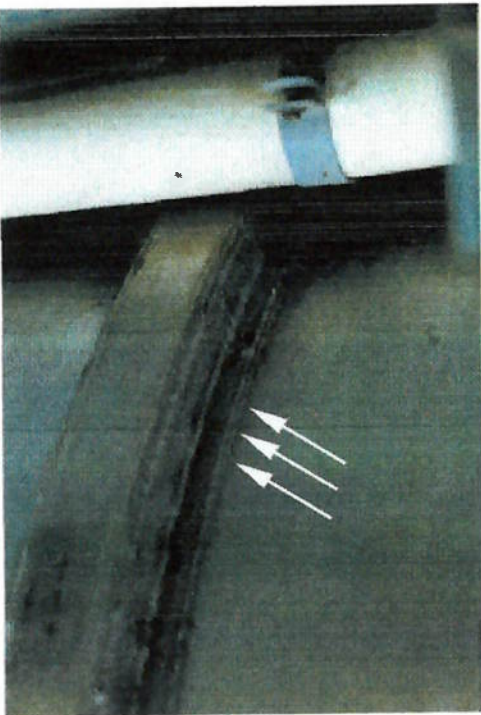
  
Prof. Dr. Gilberto Franscisco Martha de Souza

Anexos: - cópia da solicitação do membro da banca  
- duas cópias da errata

**Figura 1.4 - Detalhe de Trinca Típica Junto a Anel de Reforço Sobre o Carro da Suspensão**



**Figura 1.5 - Trinca Típica na Região de Anel de Reforço Sobre o Carro da Suspensão**



**Páginas 9 e 10, Complementação das Figuras 1.4 e 1.5.**

**ERRATA**

A correção pela abordagem de Goodman deve ser utilizada quando a tensão média é de tração. No estudo que se desenvolve, onde considera-se uma tensão equivalente média, a qual não discrimina a natureza da tensão, se de tração ou compressão, o emprego da Lei de Goodman representa a pior situação para a natureza da tensão média, ou seja, supõe-se a mesma como de tração e, portanto, induzindo a redução da resistência à fadiga do material.

#### **Página 155, introdução do parágrafo seguinte após equação (6.15)**

Também segundo autores como COLLINS [20] e SURESH [50], são vários os fatores que influenciam a forma e posição da Curva S-N, podendo esta ser deslocada pela sua influência. Dentre eles, podem-se citar: composição do material, tamanho e orientação de grãos, tratamento térmico, presença de cordões de solda e ação da tensão média. Para o caso em estudo, os dois últimos efeitos, acima citados, destacam-se como de maior relevância para avaliação da vida em fadiga do Vaso de Pressão.

#### **Página 155, alteração do 2º. Parágrafo**

## Sumário

Lista de Figuras.....	vi
Lista de Tabelas.....	x
Lista de Símbolos.....	xvi
Resumo.....	xix
Abstract.....	xx

### Capítulo 1 - Introdução

1.1. Considerações Iniciais.....	1
1.2. Objetivos.....	11
1.3. Escopo do Trabalho.....	13

### Capítulo 2 - Caracterização do Equipamento

2.1. Características Construtivas.....	16
2.2. Aspectos do Processo de Fabricação.....	32

### Capítulo 3 - Descrição do Modelo de Elementos Finitos para

#### Semi-Reboque Tanque

3.1. Descrição Geral.....	33
3.2. Cálculo das Propriedades das Vigas Fictícias que Simulam os Feixes de Molas.....	46
3.2.1. Deflexão para o Caso de Viga Sujeita a Carga Concentrada Intermediária.....	47
3.2.2. Cálculo do Momento de Inércia de Área Equivalente ao do Feixe de Molas Intermediário.....	50
3.2.3. Cálculo do Momento de Inércia de Área Equivalente ao do Feixe de Molas Frontal.....	52



4.3	Conclusão.....	84
4.5	Verificação de Convergência e Aferição.....	81
4.4.5	Tensão de Flexão Circunferencial $\sigma_{FC}$ .....	81
4.4.4	Tensão de Flexão Longitudinal $\sigma_{FL}$ .....	81
4.4.3	Momento Fletor Máximo $M_{\max}$ .....	80
4.4.2	Carga Radial Circunferencialmente Distribuída $q$ .....	80
4.4.1	Verificação da Validade.....	79
4.4	Resultados do Cálculo Analítico.....	79
4.3	Verificação dos Desvios para Aferição.....	79
4.2.5	Tensão de Flexão Circunferencial $\sigma_{FC}$ .....	78
4.2.4	Tensão de Flexão Longitudinal $\sigma_{FL}$ .....	78
4.2.3	Momento Fletor.....	77
4.2.2	Carga Radial Circunferencialmente Distribuída $q$ .....	76
4.2.1	Condição de Validade.....	76
4.2	Formulação Analítica.....	72
4.1	Generalidades sobre o Procedimento de Aferição.....	71

**Capítulo 4 - Aferição do Modelo de Elementos Finitos**

3.4.9	Caso 9.....	70
3.4.8	Caso 8.....	70
3.4.7	Caso 7.....	69
3.4.6	Caso 6.....	69
3.4.5	Caso 5.....	68
3.4.4	Caso 4.....	67
3.4.3	Caso 3.....	67
3.4.2	Caso 2.....	66
3.4.1	Caso 1.....	66
3.4	de Carregamento e de Contorno.....	63
3.4	Caracterização dos Casos Envolvendo Condições de	
3.3	Condições de Carregamento e de Contorno.....	56
3.2.4	Feixe de Molas Traseiro.....	54
3.2.4	Cálculo do Momento de Inércia de Área Equivalente ao do	

**Capítulo 5 - Resultados Obtidos**

5.1 Considerações Iniciais.....85

5.2 Caso 1.....93

5.3 Caso 2.....97

5.4 Caso 3.....101

5.5 Caso 4.....105

5.6 Caso 5.....109

5.7 Caso 6.....113

5.8 Caso 7.....117

5.9 Caso 8.....121

5.10 Caso 9.....123

**Capítulo 6 - Análise dos Resultados**

6.1 Fundamentação Conceitual para a Análise a Ser Desenvolvida.....125

6.2 Metodologia para Seleção de Pontos Críticos.....135

6.3 Análise Quanto à Possibilidade de Falha por Escocamento.....136

6.3.1 Determinação das Tensões Críticas.....136

6.3.1.1 Caso 1.....136

6.3.1.2 Caso 2.....137

6.3.1.3 Caso 3.....138

6.3.1.4 Caso 4.....138

6.3.1.5 Caso 5.....139

6.3.1.6 Caso 6.....139

6.3.1.7 Caso 7.....140

6.3.1.8 Caso 8.....141

6.3.1.9 Caso 9.....141

6.3.2 Cálculo dos Coeficientes de Segurança Quanto à Falha por Escocamento.....142

6.4 Análise de Fadiga.....150

6.4.1 Análise das Tensões Críticas para Verificação da Ocorrência de Falha por Fadiga.....152

6.4.2 Análise de Fadiga Multiaxial pelo Método de Sines.....153

157	6.4.3	Análise de Fadiga Multiaxial pelo Método ASME.....
158	6.4.4	Determinação da Região Crítica Quanto à Amplitude de Tensão Equivalente Utilizando-se Malha Inicial.....
158	6.4.4.1	Ciclo de Solicitações Globais de Flexão - Método ASME - Malha Inicial.....
159	6.4.4.2	Ciclo de Solicitações Globais de Flexão - Método de Simes - Malha Inicial.....
159	6.4.4.3	Ciclo com Solicitações Globais de Torção Método ASME - Malha Inicial.....
159	6.4.4.4	Ciclo com Solicitações Globais de Torção Método de Simes - Malha Inicial.....
160	6.4.5	Determinação da Vida em Fadiga Utilizando-se Malha Refinada na Região Crítica, Relativa ao Segundo Anel de Retorço.....
161	6.4.5.1	Ciclo de Solicitações Globais de Flexão Método ASME - Malha Refinada.....
162	6.4.5.2	Ciclo de Solicitações Globais de Flexão Método de Simes - Malha Refinada.....
163	6.4.5.3	Ciclo com Solicitações Globais de Torção Método ASME - Malha Refinada.....
164	6.4.5.4	Ciclo com Solicitações Globais de Torção Método de Simes - Malha Refinada.....
165	6.4.5.5	Verificação da Vida em Fadiga Através da Curva S-N.....
166	6.4.6	Análise dos Resultados.....
164	<b>Capítulo 7 - Conclusões e Recomendações.....</b>	
169	<b>Capítulo 8 - Referências Bibliográficas.....</b>	

## **Anexos**

Anexo A1	Tabelas de Cálculo para o Ciclo de Solicitações Globais de Flexão – Método de Sines - Malha Inicial.....	183
Anexo A2	Tabelas de Cálculo para o Ciclo de Solicitações Globais de Flexão – Método ASME – Malha Inicial.....	190
Anexo A3	Tabelas de Cálculo para o Ciclo de Solicitações Globais de Flexão – Método de Sines – Malha Refinada.....	198
Anexo A4	Tabelas de Cálculo para o Ciclo de Solicitações Globais de Flexão – Método ASME – Malha Refinada.....	201
Anexo A5	Tabelas de Cálculo para o Ciclo com Solicitações Globais de Torção – Método de Sines – Malha Inicial.....	205
Anexo A6	Tabelas de Cálculo para o Ciclo com Solicitações Globais de Torção – Método ASME – Malha Inicial.....	212
Anexo A7	Tabelas de Cálculo para o Ciclo com Solicitações Globais de Torção – Método de Sines – Malha Refinada.....	219
Anexo A8	Tabelas de Cálculo para o Ciclo com Solicitações Globais de Torção – Método ASME – Malha Refinada.....	222

## Lista de Figuras

<u>Capítulo 1</u>	
Figura 1.1 - Limites de Carga Conforme Legislação Brasileira.....	4
Figura 1.2 - Resposta Dinâmica do Equipamento como um Sistema Mecânico.....	5
Figura 1.3 - Região do Vaso Sobre o Carro da Suspensão - Área de Ocorrência de Trinças.....	8
Figura 1.4 - Detalhe de Trinca Junto a Anel de Reforço Sobre o Carro da Suspensão.....	9
Figura 1.5 - Trinca Típica na Região de Anel de Reforço Sobre o Carro da Suspensão.....	10
Figura 1.6 - Fluxograma de Apresentação do Estudo.....	15
<u>Capítulo 2</u>	
Figura 2.1 - Semi-Reboque Tanque - Montagem de Acessórios.....	18
Figura 2.2 - Chassis - Vista Frontal.....	18
Figura 2.3 - Chassis - Vista Traseira.....	19
Figura 2.4 - Carro da Suspensão - Montagem.....	19
Figura 2.5 - Semi-Reboque Tanque - Detalhe Frontal.....	20
Figura 2.6 - Quinta Roda - Detalhe.....	22
Figura 2.7 - Semi-Reboque Tanque - Detalhe do Pino Rei.....	22
Figura 2.8 - Semi-Reboque Tanque - Detalhe dos Pés Traseiros.....	23
Figura 2.9 - Feixe de Molas.....	25
Figura 2.10 - Componentes da Suspensão - Corte Longitudinal.....	26
Figura 2.11 - Semi-Reboque Tanque Acoplado a Cavallo Mecânico.....	28
Figura 2.12 - Conjunto Semi-Reboque Tanque e Cavallo Mecânico.....	28

**Capítulo 3**

Figura 3.1 - Vista em Perspectiva do Modelo de Elementos Finitos com Malha Inicial.....	35
Figura 3.2 - Detalhe do Modelo de Elementos Finitos - Região com Malha Refinada.....	36
Figura 3.3 - Detalhe da Posição Relativa de Eixos e Vigas Fictícias.....	38
Figura 3.4 - Detalhe de Anel de Reforço Típico.....	41
Figura 3.5 - Detalhe do Modelo de Elementos Finitos - Seção Longitudinal do Casco e Anel de Reforço Típicos – Sem Escala	
a) Arranjo Real	
b) Arranjo como Desenhado no Programa de Elementos Finitos	
c) Arranjo como Considerado pelo Programa de Elementos Finitos.....	43
Figura 3.6 - Arranjo para o Caso Geral de Viga Sujeta a Carga Concentrada.....	47
Figura 3.7 - Arranjo para Feixe de Molas Intermediário - Sem Escala -	
a) Caso Real b) Modelo para viga fictícia.....	50
Figura 3.8 - Arranjo para Feixe de Molas Frontal - Sem Escala -	
a) Caso Real b) Modelo para viga fictícia.....	52
Figura 3.9 - Arranjo para Feixe de Molas Traseiro - Sem Escala -	
a) Caso Real b) Modelo para viga fictícia.....	54
Figura 3.10 - Seção Transversal do Vaso de Pressão - Detalhe do Gradiente de Pressão Hidrostática e do Sistema de Coordenadas Global do Modelo.....	58
Figura 3.11 - Acelerações Atuantes Durante Frenagem.....	60
Figura 3.12 - Sistema Local de Coordenadas (R,S,T) para Simulação de Frenagem no Modelo.....	61
Figura 3.13 - Codificação dos Apoios do Modelo de Elementos Finitos.....	64
<b>Capítulo 4</b>	
Figura 4.1 - Esquema da Solução Analítica para Cálculo de Tensões em Casca com Anel Circunferencial Sujeta a Pressão Interna.....	73

162	Ciclo de Flexão - Nº 43050.....	Figura 6.11 - Flutuação de Tensões Principais para
161	Ciclo de Flexão - Nº 43071.....	Figura 6.10 - Flutuação de Tensões Principais para
146	Deformações em Escala Ampliada.....	Figura 6.9 - Flutuação de Tensões Principais para
145	Segunda Sela - Caso 7 - Detalhe - Valores Orientativos.....	Figura 6.8 - Semi-Reboque Tanque - Vista Traseira - Caso 7
144	Segundo Anel de Reforço - Caso 7 - Valores Orientativos.....	Figura 6.7 - Distribuição de Tensões Equivalentes de von Mises na
143	no Casco - Caso 7 - Valores Orientativos.....	Figura 6.6 - Distribuição de Tensões Equivalentes de von Mises no
133	(b) Modo II e (c) Modo III, Segundo ROLFE e BARSOM [42].....	Fogura 6.5 - Distribuição de Tensões Equivalentes de von Mises
131	conforme FUCHS e STEPHENS [27].....	Figura 6.4 - Modos de Deslocamento de Trinca - (a) Modo I;
130	STEPHENS [27] Cargas Externas (a) Estáticas (b) Cíclicas.....	Figura 6.3 - Direção de Propagação de Trinca Transcristalina
128	3XX Conforme ASME Secção VIII, Divisão 2 [6] Curva B.....	Figura 6.2 - Efeitos do Deslizamento de Planos Preferenciais na
	Curva de Projeto a Fadiga - S-N - para Aços Liga da Série	Figura 6.1 -

## Capítulo 6

83	Circunferencial Máxima - Modelo Auxiliar.....	Figura 4.4 - Gráfico de Convergência da Tensão de Flexão
83	Longitudinal Máxima - Modelo Auxiliar.....	Figura 4.3 - Gráfico de Convergência da Tensão de Flexão
75	Folha 2/2.....	
74	Folha 1/2.....	
	Modelo Auxiliar de Elementos Finitos	Figura 4.2 -

Ciclo de Torção - 43071.....163

Figura 6.12 - Flutuação de Tensões Principais para

Ciclo de Torção - N6 43050.....164



## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Relação de Figuras e de Detalhes Apresentados.....	17
Tabela 2.2 - Especificação de Materiais e Espessuras dos Componentes para Semi-Reboque Tanque.....	29
Tabela 2.3 - Propriedades Mecânicas dos Materiais de Construção Utilizados no Equipamento Semi-Reboque Tanque .....	30
Tabela 2.4 - Composição Química Básica dos Materiais de Construção Semi-Reboque Tanque.....	31
<b>Capítulo 3</b>	
Tabela 3.1 - Características do Modelo de Elementos Finitos para Semi-Reboque Tanque.....	34
Tabela 3.2 - Tipos de Elementos Utilizados no Modelo Semi-Reboque Tanque.....	34
Tabela 3.3 - Atributos dos Elementos Utilizados no Modelo do Semi-Reboque Tanque.....	45
Tabela 3.4 - Configuração das Restrições de Deslocamento nos Apoios Estruturais .....	65
<b>Capítulo 4</b>	
Tabela 4.1 - Comparação entre Tensões Obtidas Analítica e Numericamente.....	82
<b>Capítulo 5</b>	
Tabela 5.1 - Descrição da Localização dos Nós .....	89
Tabela 5.2 - Coordenadas de Localização dos Nós .....	90

94	Tabela 5.3 - Reações de Apoio – Caso 1.....
99	Tabela 5.4 - Tensões no Casco - Caso 1 - Malha Inicial.....
99	Tabela 5.5 - Tensões no Casco - Caso 1 - Malha Refinada - Região do Segundo Anel de Reforço.....
96	Tabela 5.6 - Tensões Equivalentes de von Mises em Componentes - Caso 1 - Malha Inicial.....
98	Tabela 5.7 - Reações de Apoio - Caso 2.....
99	Tabela 5.8 - Tensões no Casco - Caso 2 - Malha Inicial.....
99	Tabela 5.9 - Tensões no Casco - Caso 2 - Malha Refinada - Região do Segundo Anel de Reforço.....
100	Tabela 5.10 - Reações de Apoio - Caso 3.....
102	Tabela 5.11 - Tensões no Casco - Caso 3 - Malha Inicial.....
103	Tabela 5.12 - Tensões no Casco - Caso 3 - Malha Refinada Região do Segundo Anel de Reforço.....
104	Tabela 5.13 - Tensões Equivalentes de von Mises em Componentes - Caso 3 - Malha Inicial.....
104	Tabela 5.14 - Reações de Apoio – Caso 4.....
106	Tabela 5.15 - Tensões no Casco - Caso 4 - Malha Inicial.....
107	Tabela 5.16 - Tensões no Casco - Caso 4 - Malha Refinada - Região do Segundo Anel de Reforço.....
108	Tabela 5.17 - Tensões Equivalentes de von Mises em Componentes - Caso 4 - Malha Inicial.....
108	Tabela 5.18 - Reações de Apoio – Caso 5.....
110	Tabela 5.19 - Tensões no Casco - Caso 5 - Malha Inicial.....
111	Tabela 5.20 - Tensões no Casco - Caso 5 - Malha Refinada - Região do Segundo Anel de Reforço.....
112	Tabela 5.21 - Tensões Equivalentes de von Mises em Componentes - Caso 5 - Malha Inicial.....
114	Tabela 5.22 - Reações de Apoio - Caso 6.....
115	Tabela 5.23 - Tensões no Casco - Caso 6 - Malha Inicial.....
116	Tabela 5.24 - Tensões no Casco - Caso 6 - Malha Refinada - Região do Segundo Anel de Reforço.....

Tensões em MPA.....	193
Tabela A2.3 - Cálculo de $(\sigma_1 - \sigma_2)$ , $(\sigma_2 - \sigma_3)$ e $(\sigma_3 - \sigma_1)$ - CASO 4 -	
Tensões em MPA Tabela.....	192
Tabela A2.2 - Cálculo de $(\sigma_1 - \sigma_2)$ , $(\sigma_2 - \sigma_3)$ e $(\sigma_3 - \sigma_1)$ - CASO 3 -	
Tensões em MPA.....	191
Tabela A2.1 - Cálculo de $(\sigma_1 - \sigma_2)$ , $(\sigma_2 - \sigma_3)$ e $(\sigma_3 - \sigma_1)$ - CASO 1 -	

## Anexo A2

Tabela A1.6 - Cálculo de Sensibilidade para $\sigma_a$ .....	189
Tabela A1.5 - Cálculo de $\sigma_{m,e}$ .....	188
Tabela A1.4 - Cálculo de $\sigma_{a,e}$ .....	187
Tabela A1.3 - Cálculo de $\sigma_{3a}$ e $\sigma_{3m}$ .....	186
Tabela A1.2 - Cálculo de $\sigma_{2a}$ e $\sigma_{2m}$ .....	185
Tabela A1.1 - Cálculo de $\sigma_{1a}$ e $\sigma_{1m}$ .....	184

## Anexo A1

Região do Segundo Anel de Reforço.....	124
Tabela 5.33 - Tensão Equivalente de von Mises no Casco - Caso 9	
Tabela 5.32 - Reações de Apoio - Caso 9.....	124
Região do Segundo Anel de Reforço.....	122
Tabela 5.31 - Tensão Equivalente de von Mises no Casco - Caso 8	
Tabela 5.30 - Reações de Apoio - Caso 8.....	122
Caso 7 - Malha Inicial.....	120
Tabela 5.29 - Tensões Equivalentes de von Mises em Componentes -	
Região do Segundo Anel de Reforço.....	120
Tabela 5.28 - Tensões no Casco - Caso 7 - Malha Refinada -	
Tabela 5.27 - Tensões no Casco - Caso 7 - Malha Inicial.....	119
Tabela 5.26 - Reações de Apoio - Caso 7.....	118
Caso 6 - Malha Inicial.....	116
Tabela 5.25 - Tensões Equivalentes de von Mises em Componentes -	

Tabela A2.4 - Cálculo de  $(\sigma_1 - \sigma_2)$ ,  $(\sigma_2 - \sigma_3)$  e  $(\sigma_3 - \sigma_1)$  - CASO 5 - Tensões em MPa.....194

Tabela A2.5 - Cálculo da Diferença em Valor Absoluto entre  $(\sigma_1 - \sigma_2)$  MÁX e  $(\sigma_1 - \sigma_2)$  MÍN - Tensões em MPa.....195

Tabela A2.6 - Cálculo da Diferença em Valor Absoluto entre  $(\sigma_2 - \sigma_3)$  MÁX e  $(\sigma_2 - \sigma_3)$  MÍN - Tensões em MPa.....196

Tabela A2.7 - Cálculo da Diferença em Valor Absoluto entre  $(\sigma_3 - \sigma_1)$  MÁX e  $(\sigma_3 - \sigma_1)$  MÍN - Tensões em MPa.....198

**Anexo A3**

Tabela A3.1 - Cálculo de  $\sigma_{1a}$  e  $\sigma_{1m}$ .....199

Tabela A3.2 - Cálculo de  $\sigma_{2a}$  e  $\sigma_{2m}$ .....199

Tabela A3.3 - Cálculo de  $\sigma_{3a}$  e  $\sigma_{3m}$ .....199

Tabela A3.4 - Cálculo de  $\sigma_{ae}$ .....200

Tabela A3.5 - Cálculo de  $\sigma_{me}$ .....200

Tabela A3.6 - Cálculo de Sensibilidade para .....200

**Anexo A4**

Tabela A4.1 - Cálculo de  $(\sigma_1 - \sigma_2)$ ,  $(\sigma_2 - \sigma_3)$  e  $(\sigma_3 - \sigma_1)$  - CASO1 - Tensões em MPa .....202

Tabela A4.2 - Cálculo de  $(\sigma_1 - \sigma_2)$ ,  $(\sigma_2 - \sigma_3)$  e  $(\sigma_3 - \sigma_1)$  - CASO3 - Tensões em MPa.....202

Tabela A4.3 - Cálculo de  $(\sigma_1 - \sigma_2)$ ,  $(\sigma_2 - \sigma_3)$  e  $(\sigma_3 - \sigma_1)$  - CASO 4 - Tensões em MPa.....203

Tabela A4.4 - Cálculo de  $(\sigma_1 - \sigma_2)$ ,  $(\sigma_2 - \sigma_3)$  e  $(\sigma_3 - \sigma_1)$  - CASO 5 - Tensões em MPa.....203

Tabela A4.5 - Cálculo da Diferença em Valor Absoluto entre  $(\sigma_1 - \sigma_2)$  MÁX e  $(\sigma_1 - \sigma_2)$  MÍN - Tensões em MPa.....204

Tabela A4.6 - Cálculo da Diferença em Valor Absoluto entre  $(\sigma_2 - \sigma_3)$  MÁX e  $(\sigma_2 - \sigma_3)$  MÍN - Tensões em MPa.....204

Tabela A4.7 – Cálculo da Diferença em Valor Absoluto entre ( $\sigma_3 - \sigma_1$ ) MAX e ( $\sigma_3 - \sigma_1$ ) MIN – Tensões em MPa.....	204
---	-----

### Anexo A5

Tabela A5.1 - Cálculo de $\sigma_{1a}$ e $\sigma_{1m}$ .....	206
Tabela A5.2 - Cálculo de $\sigma_{2a}$ e $\sigma_{2m}$ .....	207
Tabela A5.3 - Cálculo de $\sigma_{3a}$ e $\sigma_{3m}$ .....	208
Tabela A5.4 - Cálculo de $\sigma_{ae}$ .....	209
Tabela A5.5 - Cálculo de $\sigma_{me}$ .....	210
Tabela A5.6 - Cálculo de Sensibilidade para $\sigma_a$ .....	211

### Anexo A6

Tabela A6.1 – Cálculo de ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ), ( $\sigma_2 - \sigma_3$ ) e ( $\sigma_3 - \sigma_1$ ) - CASO 1 - Tensões em MPa.....	213
Tabela A6.2 – Cálculo de ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ), ( $\sigma_2 - \sigma_3$ ) e ( $\sigma_3 - \sigma_1$ ) - CASO 6 - Tensões em MPa.....	214
Tabela A6.3 – Cálculo de ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ), ( $\sigma_2 - \sigma_3$ ) e ( $\sigma_3 - \sigma_1$ ) - CASO 7 - Tensões em MPa.....	215
Tabela A6.4 – Cálculo da Diferença em Valor Absoluto entre ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ) MAX e ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ) MIN – Tensões em MPa.....	216
Tabela A6.5 – Cálculo da Diferença em Valor Absoluto entre ( $\sigma_2 - \sigma_3$ ) MAX e ( $\sigma_2 - \sigma_3$ ) MIN – Tensões em MPa.....	217
Tabela A6.6 – Cálculo da Diferença em Valor Absoluto entre ( $\sigma_3 - \sigma_1$ ) MAX e ( $\sigma_3 - \sigma_1$ ) MIN – Tensões em MPa.....	218

### Anexo A7

Tabela A7.1 - Cálculo de $\sigma_{1a}$ e $\sigma_{1m}$ .....	220
Tabela A7.2 - Cálculo de $\sigma_{2a}$ e $\sigma_{2m}$ .....	220
Tabela A7.3 - Cálculo de $\sigma_{3a}$ e $\sigma_{3m}$ .....	220
Tabela A7.4 - Cálculo de $\sigma_{ae}$ .....	221

221	Tabela A7.5 - Cálculo de $\sigma_{m.e.}$ .....
221	Tabela A7.6 - Cálculo de Sensibilidade para $\sigma_a$ .....
<b><u>Anexo A8</u></b>	
221	Tabela A8.1 - Cálculo de $(\sigma_1 - \sigma_2)$ , $(\sigma_2 - \sigma_3)$ e $(\sigma_3 - \sigma_1)$ - CASO 1 - Tensões em MPa.....
223	Tabela A8.2 - Cálculo de $(\sigma_1 - \sigma_2)$ , $(\sigma_2 - \sigma_3)$ e $(\sigma_3 - \sigma_1)$ - CASO 6 - Tensões em MPa.....
223	Tabela A8.3 - Cálculo de $(\sigma_1 - \sigma_2)$ , $(\sigma_2 - \sigma_3)$ e $(\sigma_3 - \sigma_1)$ - CASO 7 Tensões em MPa.....
223	Tabela A8.4 - Cálculo da Diferença em Valor Absoluto entre $(\sigma_1 - \sigma_2)$ MAX e $(\sigma_1 - \sigma_2)$ MIN - Tensões em MPa.....
224	Tabela A8.5 - Cálculo da Diferença em Valor Absoluto entre $(\sigma_2 - \sigma_3)$ MAX e $(\sigma_2 - \sigma_3)$ MIN - Tensões em MPa.....
224	Tabela A8.6 - Cálculo da Diferença em Valor Absoluto entre $(\sigma_3 - \sigma_1)$ MAX e $(\sigma_3 - \sigma_1)$ MIN - Tensões em MPa.....

$a$	: distância do ponto de aplicação da carga ao apoio A;
$a_r$	: aceleração de frenagem;
$a_g$	: aceleração resultante;
$a$	: constante;
$b$	: altura da secção transversal do anel de reforço considerado;
$CS$	: coeficiente de segurança;
$d$	: distância, no meio fluido, na direção do eixo S;
$E$	: módulo de elasticidade;
$F$	: carga aplicada;
$g$	: aceleração da gravidade;
$h$	: altura de líquido.
$I$	: momento de inércia de área da secção transversal da viga.
$K$	: constante de rigidez para regime linear elástico;
$K_t$	: fator de concentração de tensão;
$l$	: comprimento;
$M$	: momento fletor
$M_A; M_B$	: momento fletor nos apoios A e B, respectivamente;
$P$	: pressão
$P_f$	: pressão devida ao gradiente de pressão composto, na frenagem;
$q$	: carga radial circunferencialmente distribuída;
$R$	: raio médio da casca cilíndrica;
$R_A; R_B$	: reação de apoio em A e B, respectivamente;
$S_a$	: amplitude de tensão alternada;
$t$	: espessura;
$W$	: carga concentrada;
$x$	: distância do ponto analisado ao apoio A;
$y$	: deflexão;

## Lista de Símbolos

$\gamma_A, \gamma_B$	: deflexão nos apoios A e B, respectivamente;
$\beta$	: ângulo entre a direção da aceleração resultante e a vertical.
$\Delta_{rj}^{mx. abs.}$	: valor máximo absoluto da variação das diferenças $\sigma_{12}, \sigma_{23}, \sigma_{31}$
$\theta_A, \theta_B$	: deslocamento angular nos apoios A e B, respectivamente;
$\mu$	: coeficiente de Poisson.
$\rho$	: densidade de massa.
$\sigma_a$	: amplitude de tensão equivalente;
$\sigma_{a.e}$	: amplitude de tensão equivalente
$\sigma_{alt}$	: intensidade de tensão alternada;
$\sigma_{analitica}$	: tensão obtida pela formulação analítica;
$\sigma_e$	: tensão equivalente de von Mises;
$\sigma_{esc}$	: tensão limite de escoamento;
$\sigma_{FC}$	: tensão de flexão circunferencial;
$\sigma_{FL}$	: tensão de flexão longitudinal;
$\sigma_{I,a}$	: amplitude de flutuação de tensão principal
$\sigma_{Im}$	: tensão principal média;
$\sigma_{m,e}$	: tensão média equivalente;
$\sigma_{MEF}$	: tensão obtida através do Método dos Elementos Finitos.
$\sigma_n$	: limite de resistência mecânica.
$\sigma_X$	: componente de tensão normal na direção do eixo X;
$\sigma_Y$	: componente de tensão normal na direção do eixo Y;
$\sigma_Z$	: componente de tensão normal na direção do eixo Z;
	perpendicular ao eixo Z, na direção do eixo X.
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	: tensões principais.
$\sigma_{12}, \sigma_{23}, \sigma_{31}$	: diferenças entre tensões principais;
$\tau_{XY}$	: componente de tensão tangencial atuando no plano perpendicular ao eixo X, na direção do eixo Y;



$\tau_{xy}$  : componente de tensão tangencial atuando no plano perpendicular ao eixo Y, na direção do eixo Z;  
 $\tau_{zx}$  : componente de tensão tangencial atuando no plano

No Brasil, o transporte de cargas líquidas a granel é, usualmente, executado através de rodovias, com o emprego de implementos rodoviários especialmente desenvolvidos para tal finalidade. Estes Equipamentos são constituídos de **Chassis** e **Vaso de Pressão**, cujo dimensionamento é baseado em Normas do Instituto Nacional de Metrologia e Qualidade Industrial - INMETRO - , sendo que o líquido é transportado em seu interior. Este tipo de implemento, denominado de **Semi-Reboque Tanque** é acoplado a um caminhão trator, usualmente chamado cavalo mecânico.

Recentemente, grande número de empresas de transporte tem registrado a ocorrência de trincas na solda de ligação dos **Anéis de Reforço** ao **Casco do Vaso de Pressão** destes **Semi-Reboques Tanque**. Esta falha apresenta grande periculosidade, uma vez que, caso a trinca torne-se passante no **Casco**, há ocorrência de vazamento de produtos químicos perigosos, para o meio-ambiente.

Tendo em vista o risco potencial associado a esta falha, neste Trabalho é feita uma análise das tensões atuantes no **Vaso de Pressão** de um **Semi-Reboque Tanque** destinado ao transporte de soda cáustica, considerando a ação do peso do líquido transportado e da variação das condições de apoio dos Pneus do Equipamento em função da presença de irregularidades no piso da via trafegável. A análise é executada com o auxílio do Método dos Elementos Finitos, sendo que, a partir das distribuições de tensão obtidas nos diversos Casos de carregamento analisados, procuram-se definir as áreas da Estrutura mais susceptíveis a apresentar trincas, associadas à ocorrência do fenômeno de fadiga. Adicionalmente, utilizando-se a tradicional Curva S-N, apresenta-se uma estimativa para a vida operacional deste tipo de **Vaso de Pressão Autoportante - Semi-Reboque Tanque**, considerando que esta é definida pela ocorrência de falha por fadiga.

## RESUMO

## ABSTRACT

In Brazil, the liquid cargo transportation is usually made through highways, using special automotive devices developed to perform this task. Basically, those devices present two parts: the Chassis and the storage Pressure Vessel, which has the structural arrangement and structural parts size defined based on specific codes, edited by the National Institute for Metrology and Industrial Quality (INMETRO, in Portuguese). The liquid cargo is loaded inside the Pressure Vessel and the device, frequently named Semitrailer Tank is linked to a truck.

Recently, a great number of liquid cargo carriers have identified the presence of cracks in the welds joining the stiffener and the Vessel hull structure. That kind of failure is considered very dangerous, because once the crack becomes through thickness, a leakage may occur, contaminating the environment.

Considering the hazard associated with that failure, this thesis presents the stress analysis of the Semitrailer Tank with emphasis in the pressure hull stress analysis, which is performed with the use of Finite Element Method, considering the loading related to the liquid weight and to the road surface irregularities. Based on those stress distributions, associated with a given number of loading conditions, the most susceptible areas of the Pressure Vessel for cracking are defined.

An estimation of the Semitrailer Tank operation life, considering fatigue as the basic structural failure mode, is made, using the traditional S-N Curve.

A determinação das causas de falhas de equipamentos é sempre um desafio para o conhecimento humano e, mais especificamente, para o estado da arte da Engenharia. A busca destas causas torna-se bastante estimulante para profissionais engenheiros e pesquisadores, sobretudo pelos resultados obtidos, que favorecem a melhoria da segurança e da qualidade de vida dos usuários, além de colaborar para o fortalecimento da indústria e da economia nacionais.

Muitos problemas de falhas no campo, advindos da utilização de uma máquina ou equipamento, podem ser resolvidos através da análise criteriosa do projeto, incluindo a avaliação das características dos processos de fabricação empregados e da simulação e análise de condições efetivas de operação.

Os resultados de uma análise assim desenvolvida, normalmente, são de grande valia para fabricantes, usuários, e também para profissionais e pesquisadores que se dedicam ao estudo de um dado mecanismo de falha.

Frequentemente, conclusões culminam em redução de custos de fabricação, maior durabilidade e robustez do equipamento, o que pode traduzir-se em maior participação de mercado para a empresa, na medida em que apresenta um produto mais competitivo.

Do ponto de vista do usuário, a melhoria do equipamento sempre se traduz por mais segurança na sua operação, com menores custos de manutenção, maior disponibilidade e consequentemente maiores lucros para a empresa.

No caso do **Vaso de Pressão Autoprotetor - Semi-Reboque Tanque**, motivo deste Trabalho, há dois aspectos fundamentais específicos que tornam seu estudo relevante.

## 1.1 Considerações Iniciais

### Introdução

### Capítulo 1

Como este Equipamento é empregado no transporte rodoviário de produtos químicos perigosos líquidos a granel, há implicações de segurança, que envolvem tanto a manutenção da integridade física dos seus operadores e de usuários em geral, que transitam por estradas e vias urbanas, como também o controle do risco de provocar poluição do ambiente - solo, água ou ar - em caso de acidente que cause vazamento. Relatos deste tipo de acidente têm sido publicados na imprensa escrita com relativa frequência, tal como ocorrido em setembro de 2000, com vazamento de ácido fosfórico de caminhão-tanque, no sistema viário Anchieta-Imigrantes, em São Paulo [38].

Uma outra constatação importante, feita também através da imprensa escrita, é de que a utilização de veículos rodoviários no transporte de cargas é fortemente predominante no país e, por conseguinte, de grande importância para a economia nacional. Em matéria [37] sobre recente estudo, coordenado por empresa ligada ao planejamento de transportes, verificou-se que, em região altamente industrializada, como o corredor Campinas-São Paulo-Rio de Janeiro, 96% do transporte de cargas é feito por rodovia e que, nos próximos 20 anos, o movimento deve crescer 92%, dado que espelha a relevância da tecnologia de veículos e equipamentos destinados a esse tipo de serviço.

Constituívamente, o **Vaso de Pressão Autoportante**, também denominado, pelas funções às quais se destina, **Semi-Reboque Tanque**, possui Casco cilíndrico com tampos abaulados, executado em chapa de aço inoxidável de espessura fina sendo, seu projeto, desenvolvido basicamente conforme Regulamentos Técnicos RTQ-07 [30] e RTQ-034 [31] do INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia e Qualidade Industrial - e Código ASME Secção VIII, Divisão 1 [5]. Outros códigos e documentos são considerados complementares para o projeto e construção desse tipo de Equipamento, dentre outros, Normas ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas [1], [2], Código ASME Secções II, V e IX [7], [8], [9], Normas ASTM - American Society of Testing Material [12], [13], [14], Code of Federal Regulations - Department of Transportation dos Estados Unidos da América [23], [24], [25], [26] e Resolução do CONTRAN- Conselho Nacional de Trânsito [21], conforme indicado no Capítulo 8 - Referências Bibliográficas.

Por tratar-se de **Vaso de Pressão** submetido a condições que oferecem risco à segurança, além das inspeções de fabricação e montagem, que culminam na inspeção

final e consequente emissão do certificado de capacitação para utilização efetiva, sujeita-se também, a inspeções periódicas, durante sua vida útil, todas conduzidas por agentes credenciados ou pelo próprio INMETRO.

Das inspeções de fabricação e montagem, assim como da inspeção final para liberação do Equipamento constam, dentre outras, inspeção para confirmação do projeto, verificações de acompanhamento de normas, especificações e métodos de ensaios, exame dos documentos de certificação ou supervisão de ensaios de materiais empregados, atestação das qualificações de soldadores e dos processos de soldagem, verificações visuais, controles dimensionais, exame do conteúdo de informações e posicionamento das placas de identificação e de inspeção, verificação de implementos e do sistema de alívio de pressão e teste hidrostático, realizados conforme Regulamento Técnico RTQ-07 [30] e Código ASME Seções V [8] e IX [9].

Toda a documentação relativa à fabricação e montagem do Equipamento, assim como das inspeções realizadas nessa fase, deve ser mantida arquivada pelo fabricante por um período de cinco anos, sendo que parte dessa documentação deve ser fornecida ao usuário para permitir a execução das inspeções periódicas.

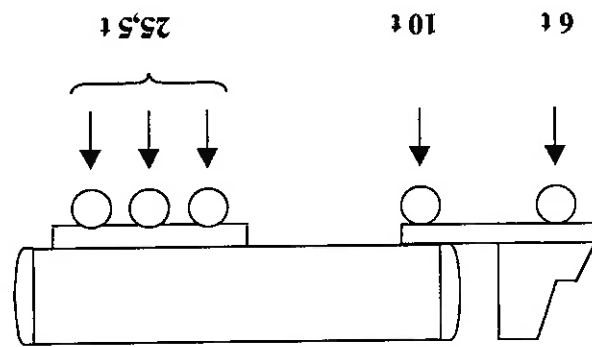
As inspeções periódicas dizem respeito ao Equipamento já em uso e incluem, de modo geral e entre outros, a confirmação da utilização que lhe é dada, orientada pelos registros em poder do usuário e da documentação relativa à construção do mesmo, exames visuais e dimensionais, verificação da precisão e da resistência da instrumentação à vibrações, inspeção do sistema de alívio de pressão e vácuo e teste hidrostático. O intervalo entre inspeções periódicas, via de regra, é no máximo de dois anos e baseia-se também nos Regulamentos e Códigos já citados.

O dimensionamento do Equipamento é feito caso a caso, sob encomenda, a partir das características de densidade, quantidade do produto a ser transportado e tipo de veículo de tração a ser utilizado, normalmente denominado cavalo-mecânico, respeitando-se sempre os limites de carga por eixo, estabelecidos pela legislação federal.

Veículo traçador mais **Semi-Reboque Tanque**, formando um conjunto, têm sua capacidade de carga, por eixo ou sistema de eixos, limitada pela legislação pertinente, agrupada e denominada como Lei de Balança [10].

As solicitações sobre a Estrutura do Equipamento advêm da interação dos seguintes componentes básicos de influência: carga transportada, peso próprio, características da **Suspensão**, Rodas e Pneus e, sobretudo, do perfil da via utilizada, juntamente com a velocidade de deslocamento, acelerações e desacelerações do Conjunto. Sendo, estes itens, de grande importância na nucleação e propagação de trincas, percebe-se um outro aspecto de grande relevância que é, muitas vezes, o mau estado de conservação de estradas e vias de tráfego urbano, causa de solicitações estruturais mais rigorosas.

**Figura 1.1 - Limites de Carga Conforme Legislação Brasileira**



A mencionada Lei de Balança [10] estipula, para um **Semi-Reboque Tanque** com três eixos, acoplado a cavalo mecânico de eixo traseiro único, o carregamento máximo de  $(6 + 10 + 25,5)$  toneladas, o que corresponde a  $(60.000 + 100.000 + 255.000)$  Newton, respectivamente, para o eixo frontal do cavalo-mecânico, eixo traseiro do cavalo-mecânico e conjunto da **Suspensão** traseira do Equipamento em si, como demonstrado na Figura 1.1. Esta é a configuração usualmente empregada no transporte de cargas e apresenta, como variação, a possibilidade de emprego de cavalo mecânico com dois eixos traseiros, o que elevaria a capacidade de carga do conjunto destes componentes de 10 para 17 toneladas.

Tratando-se de sistemas dinâmicos, equipamentos veiculares (denominação genérica para equipamentos montados sobre pneus e atrelados a veículos motorizados), quando excitados por um agente externo e em função das características descritas no parágrafo anterior, apresentam uma resposta estrutural que varia em função do tempo, caracterizando a ação de tensões de natureza dinâmica em seus elementos constitutivos.

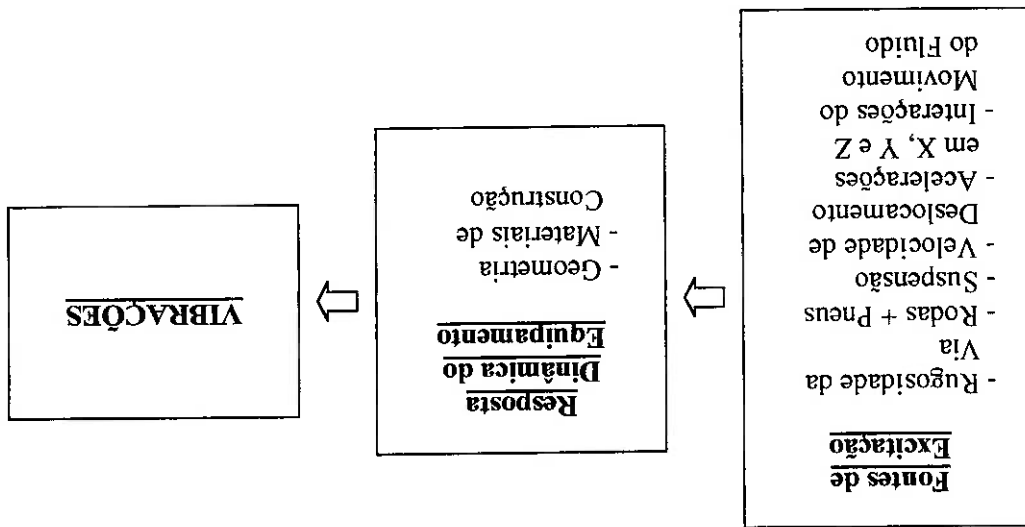


Figura 1.2 - Resposta Dinâmica do Equipamento como um Sistema Mecânico

Conforme a Figura acima, as fontes de excitação são, basicamente: a rugosidade da via, a interação entre Rodas e Pneus, o sistema de Suspensão, a velocidade de deslocamento do Conjunto, as acelerações na direção do deslocamento, bem como as acelerações laterais e verticais e as interações bastante complexas do movimento do fluido no interior do Equipamento. Em um veículo motorizado, são também fontes de excitação, o motor e a transmissão, que são desprezadas no caso particular em estudo, uma vez que o Equipamento não faz parte da mesma estrutura onde localizam-se tais componentes de acionamento, sendo, simplesmente, apoiado sobre a Quinta Roda do veículo traçador e rebocado por este, através do **Pino Rei**, sofrendo muito pouca influência quanto à vibração daqueles itens.



Na bibliografia técnica pertinente, considera-se que a excitação dinâmica atuante em veículos automotores, induzida pelo contato pneu-via trafegável, é dependente da sua velocidade de deslocamento e do próprio perfil da superfície percorrida, o qual pode ser considerado como composto pelo denominado perfil ideal da via associado à presença de irregularidades aleatórias.

O perfil ideal da via é considerado como aquele definido quando da sua construção, recém pavimentada. Segundo GILLESPIE [28], este perfil ideal não é perfeitamente plano, já contendo algumas ondulações causadas pelos processos de construção utilizados. Ainda conforme o mesmo autor, o perfil ideal da via pode ser descrito com o emprego de uma composição de superfícies representadas por curvas senoidais.

Já as irregularidades aleatórias representam a presença de buracos, depressões, trinças, tampas metálicas de bueiros, bocas de inspeção e lombadas, dentre outros, que são imperfeições localizadas do perfil de vias trafegáveis. Defeitos como buracos, depressões e trinças, normalmente, associam-se à deterioração da superfície da via, em função de sua utilização continuada.

Ao movimentar-se, a Estrutura do Equipamento fica sujeita à ação de deslocamentos verticais, induzidos pelo perfil da via, cuja frequência é função da velocidade do Conjunto. A interação peso próprio mais peso do produto transportado com os citados deslocamentos introduzem, em uma Estrutura com características particulares de geometria e materiais constitutivos, uma solicitação aleatória de natureza dinâmica.

Estas solicitações dinâmicas produzem tensões, através das quais podem-se avaliar os possíveis mecanismos de falha do Equipamento, tais como por escoamento, fadiga, fatura ou outros.

O interesse na análise de falha de equipamentos e componentes, sobretudo envolvendo fadiga de Vasos de Pressão, motivam o autor a desenvolver a presente Pesquisa, principalmente a partir da constatação da ocorrência frequente de trinças estruturais no Equipamento considerado, após decorrido um relativamente curto período inicial de utilização, comparado à sua vida útil, estimada pelo fabricante.

Verifica-se que a susceptibilidade ao surgimento de trinças no Equipamento Vaso de Pressão Autoprotante - Semi-Reboque Tanque ocorre, principalmente, nas

regiões dos cordões de solda e, mais frequentemente, nas soldas circunstanciais dos reforços do **Casco**, sobre os apoios da **Suspensão no Chassis**.

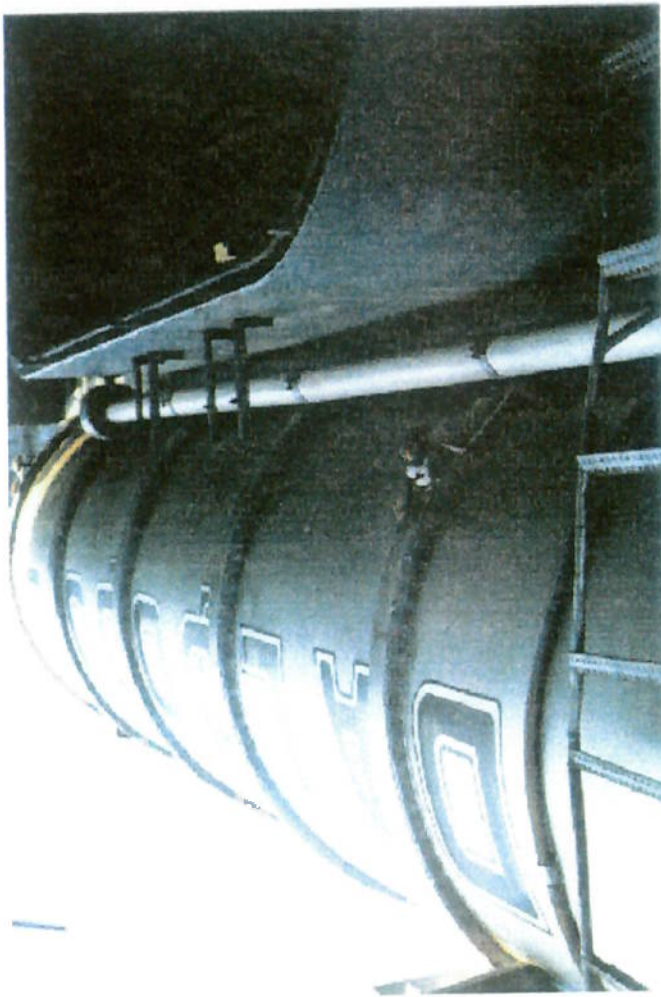
Este fato encontra-se documentado nas Figuras 1.3, 1.4 e 1.5 anexas, onde pode-se observar o fenômeno do surgimento de trincas nos cordões de solda, como mencionado.

Fica, portanto, destacada a relevância do tema desta Pesquisa, fundamentalmente por quatro aspectos principais:

1. grande utilização do Equipamento no contexto econômico do país;
2. importância do controle do risco envolvido na sua operação;
3. ocorrência de falhas por trincas ainda que projeto e fabricação sejam executados com base em normas rigorosas e que o Equipamento sujeite-se a inspeções periódicas durante sua vida útil;
4. Interesse no desenvolvimento técnico-científico advindo do estudo do fenômeno.

Pela dificuldade percebida na obtenção de informações e a quase inexistência de publicações abertas à consulta, que abordem especificamente a análise estrutural e de fadiga deste tipo de Equipamento, cre-se que os resultados apresentados neste Trabalho possam servir como contribuição para desenvolvimentos futuros, tanto de pesquisas como de aprimoramentos construídos pelos fabricantes, assim como para a melhoria da segurança estrutural associada ao Equipamento, o que se reflete no aumento da segurança dos operadores bem como de outros usuários das estradas de rodagem, das vias de trânsito rodoviário e da população em geral.

Figura 1.3 - Região do Vaso Sobre o Carro da Suspensão  
- Área de Ocorrência de Trincas

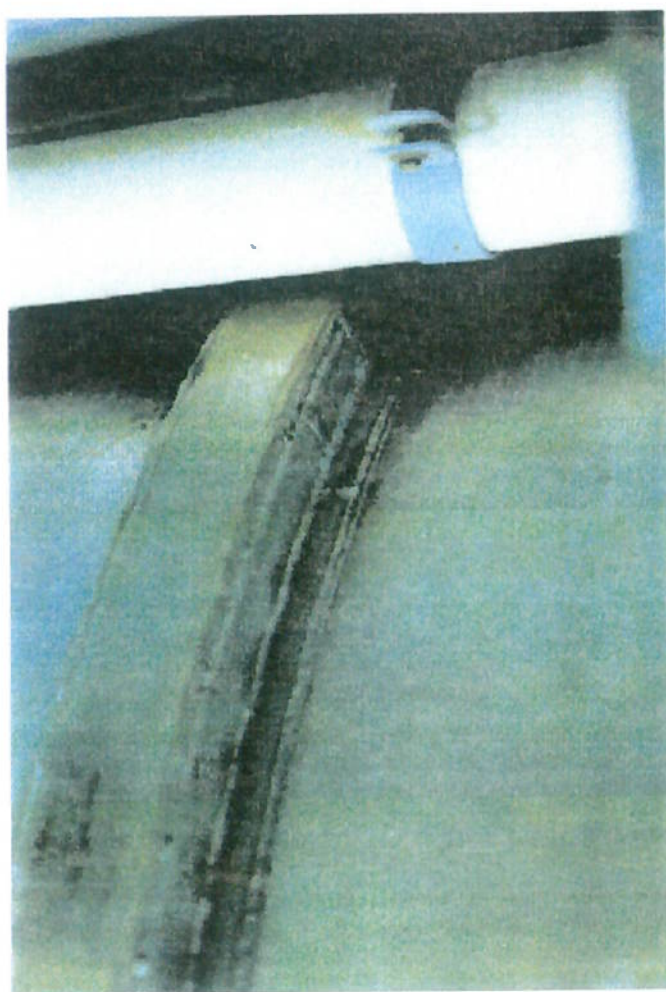


Reforço Sobre o Carro da Suspensão

Figura 1.4 - Detalhe de Trinca Típica Junto a Anel de



Figura 1.5 - Trinca Típica na Região de Anel de Reforço  
Sobre o Carro da Suspensão



## 1.2 Objetivos

O objetivo deste Trabalho é executar a análise estrutural de um **Vaso de Pressão** com as funções de **Semi-Reboque Tanque**, considerando a ação de carregamentos externos de natureza estática, visando à avaliação da distribuição e da flutuação de tensões atuantes no Equipamento, quando submetido a diferentes condições de carregamento e de contorno.

Os carregamentos externos dizem respeito ao Equipamento parado, na horizontal, completamente cheio com a solução líquida a transportar, sendo a parede interna do **Vaso de Pressão**, inicialmente, sujeita ao gradiente de pressão na direção vertical, devido à aceleração da gravidade e, posteriormente, na simulação de frenagem, durante deslocamento horizontal para a frente, situação na qual a superfície interna do **Vaso** é submetida a um gradiente de pressão composto. A aceleração que dá origem ao denominado gradiente de pressão composto, tem módulo e direção obtidos através da soma vetorial das acelerações de frenagem e da gravidade, sendo, portanto, a resultante destes dois vetores, como é abordado no Capítulo 3, onde descrevem-se, detalhadamente, os Casos estudados.

As condições de contorno, por sua vez, representam instantes específicos de uma solicitação variável no tempo, cuja origem é discutida no item 1.1 deste Capítulo. Considerando-se, inicialmente, o Equipamento apoiado em todos os nós que representam as pontas dos **Fixos** e a região de contato com o veículo trator, ou seja, a interface **Chapa do Pino Rei-Quinta Roda**, promovem-se, em seguida, liberações de Apoios específicos, das mencionadas pontas de **Fixos**, simulando efeitos relacionados ao contato Pneu-via trafegável.

No caso dinâmico real, a Estrutura do Equipamento, ao transpor imperfeições de uma determinada via, sofre deslocamentos sucessivos e acelerações verticais, advindos da interação entre o Pneu e os desníveis da superfície do solo, causando a flutuação de tensão. Dessa forma, um ponto específico da Estrutura estará sujeito a uma flutuação de tensão devida aos deslocamentos impostos, fundamentalmente, pelo perfil da via, na medida em que os Apoios da Estrutura interagem, sucessivamente, com uma imperfeição localizada do piso, através do movimento de translação do Conjunto.

Embora empregando sempre o mesmo critério de projeto, o tipo de Equipamento em análise é projetado, caso a caso, para transportar especificamente um dado produto. propagação.

A estimativa da vida operacional do **Vaso de Pressão**, considerando o mecanismo de falha por fadiga, através da flutuação de tensão obtida nos cálculos, é feita, neste Estudo, empregando-se o modelo baseado na Curva S-N, assumindo, como critério de falha, somente a nucleação de trinca, sem que seja considerada sua desenvolvimento.

Equipamento real, possibilitando a verificação da validade do **Modelo** ora Método dos Elementos Finitos, com os locais onde constata-se a presença de trincas no suscetíveis a apresentar falha por fadiga, definidos através dos resultados obtidos pelo Outrosim, podem-se comparar os pontos de concentração de tensão mais de tensão, verificando a possibilidade de falha por fadiga nestes locais.

mensurar as variações de magnitude dos esforços atuantes nos pontos de concentração variação das condições de contorno, que simulam imperfeições da via, podem-se Adicionalmente, como já fundamentado em parágrafos anteriores, com a componentes **Anéis de Reforço e Selas**, e verificar sua resistência ao escoamento.

de concentração de tensão, tanto no **Vaso** propriamente dito, bem como nos no Equipamento. Com a utilização desta técnica numérica, é possível determinar pontos opta-se pelo emprego do Método dos Elementos Finitos para definir as tensões atuantes Tendo em vista a complexa geometria da Estrutura do **Semi-Reboque Tanque**, caracterizando a flutuação de tensão a ser considerada na verificação da vida em fadiga.

da via e obtém-se a variação dos esforços em uma determinada região da Estrutura, relação à longitude do Conjunto, simula-se a transposição de um obstáculo ou depressão sequencialmente, os quais correspondem à liberação sucessiva de Apoios contíguos, em abordagem dinâmica. Assim, considerando-se vários Casos específicos obviamente, os efeitos da inércia da carga e da própria Estrutura, que caracterizam a deslocamentos na Estrutura, levando aos respectivos estados de tensão, desprezando-se, obstáculos ou depressões da via. Desse fato decorrem os correspondentes dinâmica, quando os Pneus respectivos perdem aderência com o solo, ao transportar liberação de Apoios específicos, no instante de máxima solicitação da condição Como a abordagem deste Trabalho é estática, utilizam-se Casos que simulam a

Assim, desenvolve-se, este Trabalho, para um Equipamento particular, considerado como representativo de uma família de **Semi-Reboques Tanque**, normalmente utilizado pelas companhias transportadoras para o transporte de produtos perigosos a granel.

Dessa forma, adota-se, para o Estudo ora em desenvolvimento, um **Vaso de Pressão Autoprotante - Semi-Reboque Tanque**, destinado ao transporte de soda cáustica, com capacidade para 18.000 litros, tracionado por cavalo-mecânico de eixo traseiro único. O transporte é feito a pressão atmosférica, ou seja, o **Vaso de Pressão** está sujeito a pressão que deve-se apenas à altura da massa de líquido contida no Equipamento. O descarregamento é feito por gravidade ou por bomba centrífuga sucionando o líquido do **Vaso**, existindo um sistema de equalização das pressões interna e externa que garante que o processo transcorra sob pressão atmosférica no seu interior.

Este tipo de Equipamento é utilizado praticamente em sua plena capacidade de transporte, sendo carregado, tipicamente, com 97 a 99 % de sua capacidade volumétrica máxima. Para efeito de simulação, foi considerada 100 % da capacidade de transporte, ou seja, preenchimento total do **Vaso de Pressão** com o produto.

### 1.3 Escopo do Trabalho

Esta Pesquisa tem seu desenvolvimento através das etapas indicadas no Fluxograma constante da Figura 1.6.

O Capítulo 1 introduz a caracterização do fenômeno estudado, situa-o no contexto científico de Engenharia e realça sua relevância, tanto do ponto de vista da Pesquisa como no contexto econômico do país; também define os objetivos do Trabalho e a metodologia adotada no seu desenvolvimento.

O Capítulo 2 caracteriza o Equipamento **Vaso de Pressão Autoprotante Semi-Reboque Tanque**, detalhando aspectos construtivos, geométricos e de materiais empregados.



Por sua vez, o Capítulo 3 descreve o **Modelo de Elementos Finitos** quanto à sua geometria, critérios e detalhes adotados para sua elaboração, fornece características da malha, dos tipos e espessuras de elementos adotados e atributos dos materiais respectivos. São indicados os Casos específicos estudados, que simulam situações reais de operação do Equipamento, através da combinação das várias condições de carregamento e de contorno aplicadas.

A apresentação do critério adotado para aferição do **Modelo**, comparação dos resultados obtidos discretizadamente e através de formulações analíticas para o caso e conclusão a respeito de sua representatividade estão descritos no Capítulo 4.

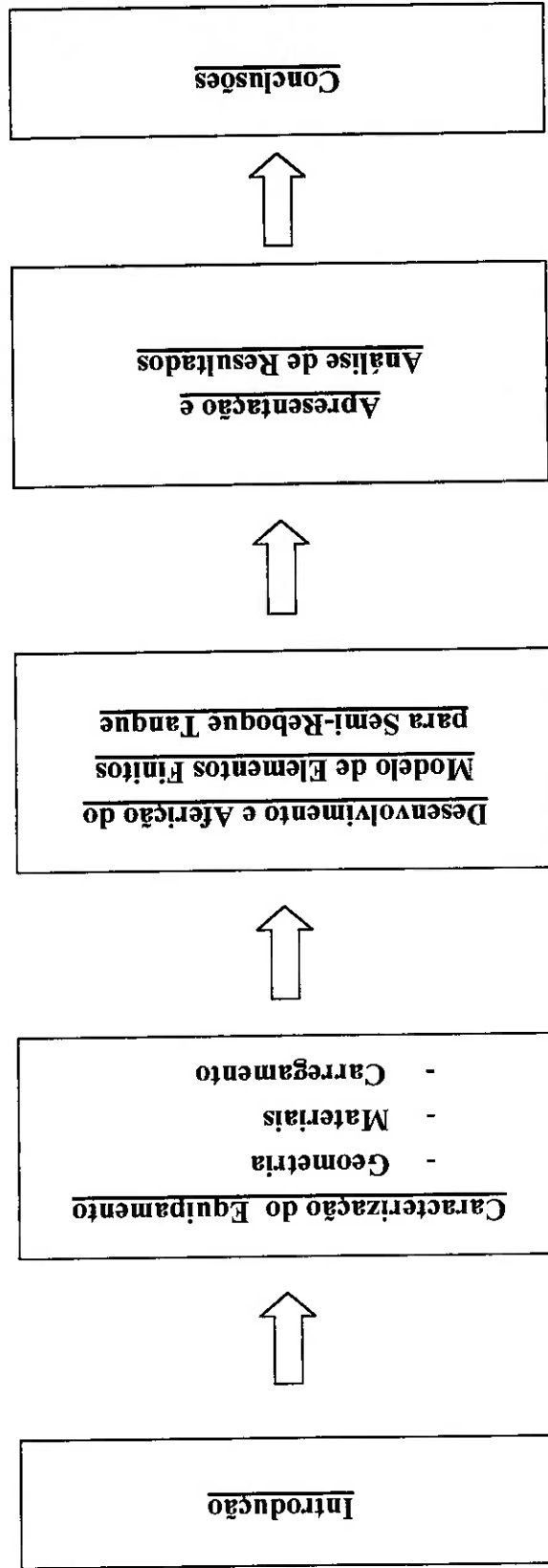
No Capítulo 5, indicam-se os resultados obtidos para a análise de tensões atuantes no **Vaso de Pressão** nos vários Casos - combinações de carregamento e de condições de contorno - simulando várias situações encontradas no dia a dia de sua utilização.

Encontra-se, no Capítulo 6, a discussão dos resultados obtidos à luz do estado da arte da Engenharia, sendo determinados os detalhes estruturais onde há concentração de tensão, explorando-se mais detalhadamente a possibilidade de ocorrência dos mecanismos de falha por fadiga e por escoamento.

Com base na discussão dos resultados, desenvolvida no Capítulo que o antecede, o Capítulo 7 apresenta conclusões sobre possíveis causas do problema estudado e sugere temas para trabalhos futuros.

Finalmente, referências bibliográficas pertinentes ao presente Trabalho estão indicadas no Capítulo 8.

Figura 1.6 - Fluxograma de Apresentação do Estudo



## Capítulo 2

### Caracterização do Equipamento

#### 2.1 Características Construtivas

O objetivo desta descrição é possibilitar ao leitor uma visão geral das características construtivas do Equipamento, relevantes para a elaboração do **Modelo de Elementos Finitos** utilizado na análise de seu comportamento estrutural.

Para acompanhar o texto que se segue, recomenda-se que o leitor faça uso das Figuras nele citadas e da Tabela 2.1, que descreve os detalhes apresentados em cada uma delas. Utilizadas em conjunto, têm por finalidade facilitar a identificação de componentes e a compreensão de detalhes construtivos que integram a Estrutura em análise.

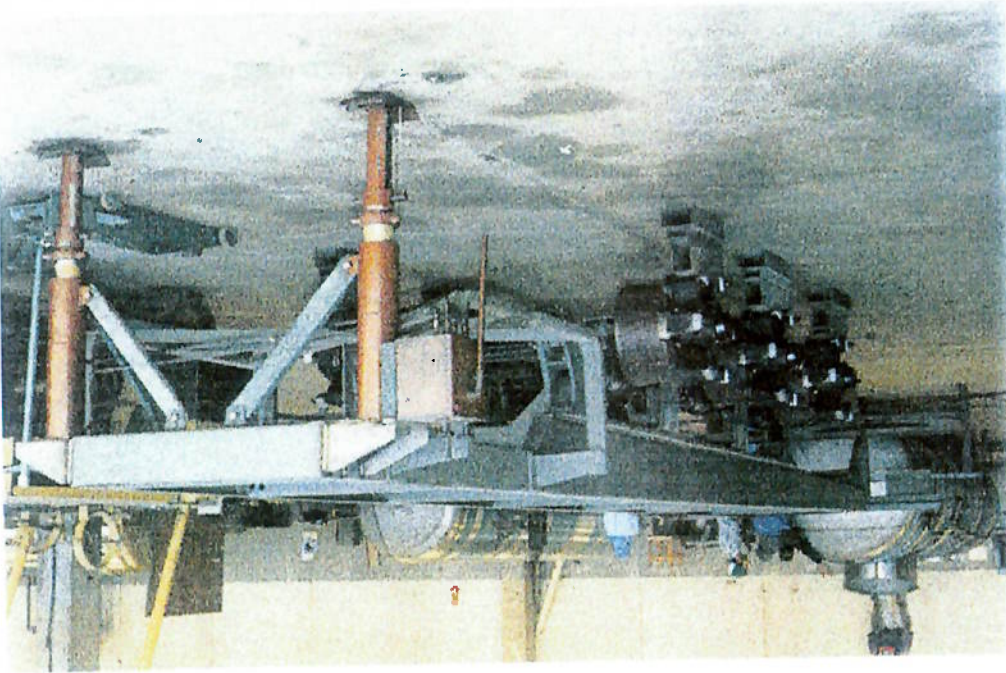
O Equipamento em pauta é um **Vaso de Pressão Autoprotante** utilizado como **Semi-Reboque Tanque**, cuja vista geral é apresentada na Figura 2.1, com capacidade nominal de 18.000 litros, destinado ao transporte de produtos químicos perigosos a granel, mais especificamente, nesta abordagem, solução de soda cáustica (hidróxido de sódio) diluída 50% em água.

Sua Estrutura divide-se em três Subconjuntos principais: **Vaso de Pressão**, mostrado na Figura 2.1, **Chassis**, apresentado nas Figuras 2.2 e 2.3 e **Carro da Suspensão**, indicado na Figura 2.4.

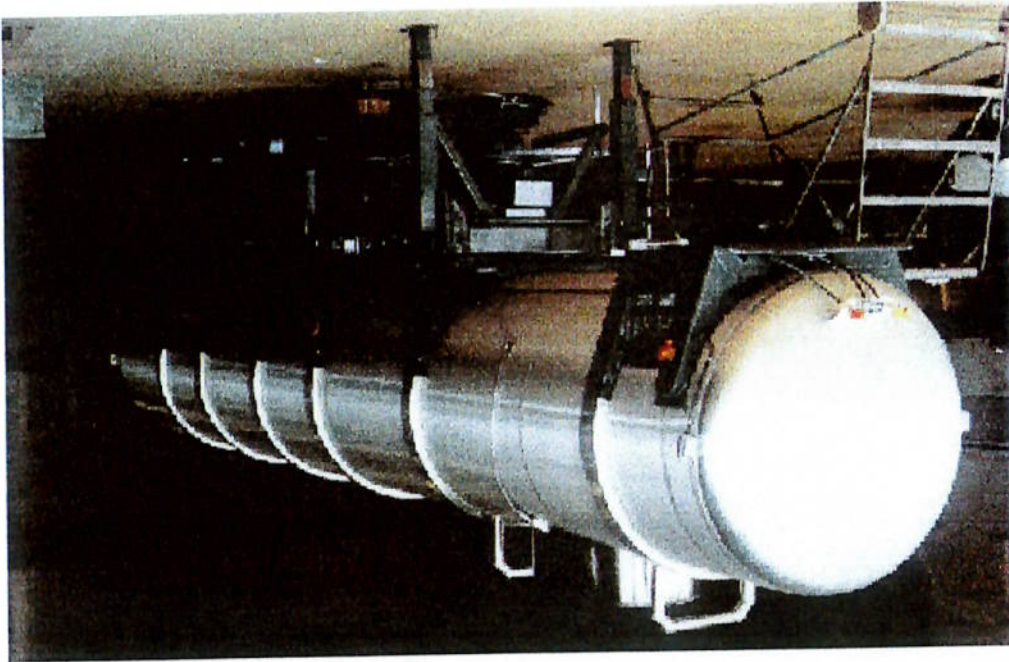
O Subconjunto **Vaso de Pressão** tem seu **Casco** cilíndrico fabricado em Aço Inoxidável ASTM A240 Tp 316L, apresenta secção transversal circular e **Tampos Torisféricos** abaulados, conforme Código ASME Secção VIII, Divisão 1 [5] 10%, executados no mesmo material, cuja construção típica é indicada na Figura 2.5. A espessura nominal, tanto do **Casco** como dos **Tampos Torisféricos**, é de 4,0 mm.

FIGURA	DENOMINAÇÃO	DETALHES APRESENTADOS
2.1	Semi-Reboque Tanque - Montagem de Acessórios	Casco, Tampo Frontal, Anéis de Reforço, Selas Frontais, Chapa de Fechamento, Chapa do Pino Rei
2.2	Chassis - Vista Frontal	Subconjunto Chassis, Estrutura do Carro da Suspensão, Subchassis dos Pés de Descanso, Pés de Descanso
2.3	Chassis - Vista Traseira	Subconjunto Chassis, Subchassis Traseiro, Estrutura do Carro da Suspensão
2.4	Carro da Suspensão - Montagem	Carro da Suspensão, Sistema de Suspensão
2.5	Semi-Reboque Tanque - Detalhe Frontal	Tampo Frontal, Anel de Reforço, Empalmes, Selas Frontais, Pino Rei, Chapa do Pino Rei, Chapa de Fechamento (Lateral)
2.6	Quinta Roda - Detalhe	Região de Apoio no Veículo de Tração
2.7	Semi-Reboque Tanque - Detalhe do Pino Rei	Elemento de Engate
2.8	Semi-Reboque Tanque - Detalhe dos Pés Traseiros	Pés Traseiros, Empalmes, Tampo Traseiro, Travessas Traseiras, Calços
2.9	Feixe de Molas	Feixe de Molas, Balancim, Suporte Fixo
2.10	Componentes da Suspensão - Corte Longitudinal	Feixes de Molas, Eixos, Suportes, Balancins
2.11	Semi-Reboque Tanque Acoplado a Cavalos Mecânicos	Equipamento Acoplado a Veículo de Tração
2.12	Conjunto Semi-Reboque Tanque e Cavalos Mecânicos	Vista de Conjunto

Tabela 2.1 - Relação de Figuras e de Detalhes Apresentados



**Figura 2.2 - Chassis - Vista Frontal**

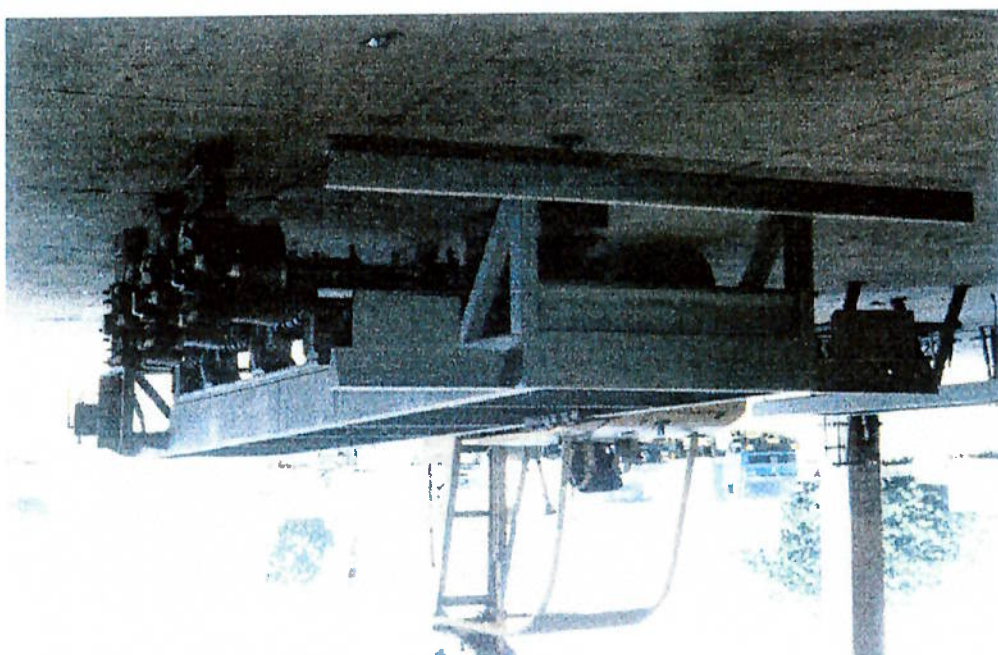


**Figura 2.1 - Semi-Reboque Tanque - Montagem de Acessórios**

**Figura 2.4 - Carro da Suspensão - Montagem**



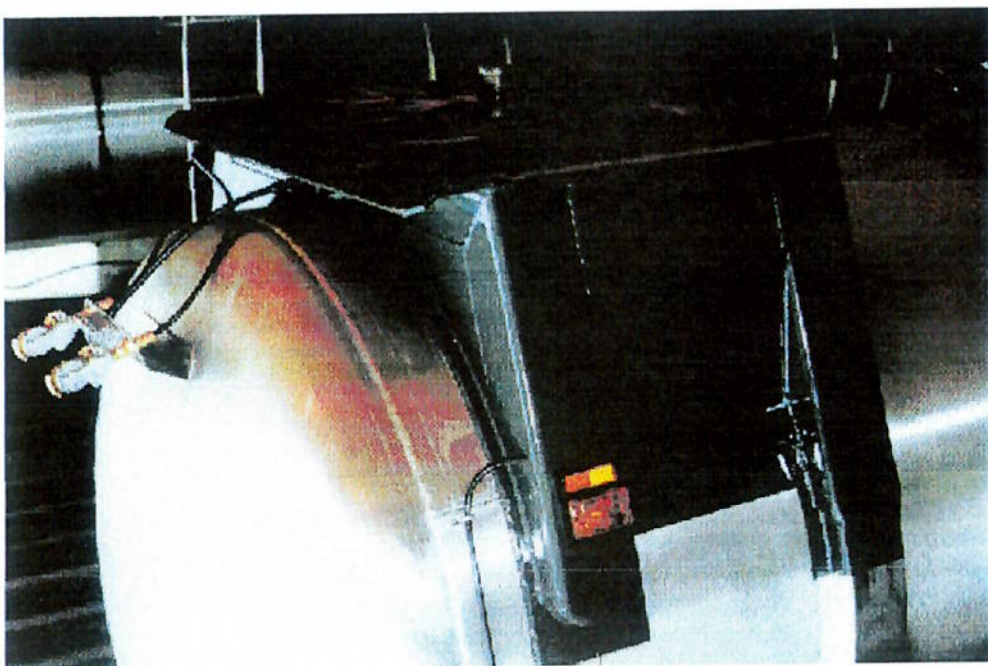
**Figura 2.3 - Chassis - Vista Traseira**



Executados em perfil "U", **Anéis de Reforço** estão dispostos em locais específicos sobre o **Casco** cilíndrico, perfazendo um ângulo de abraçamento, na sua parte superior, de cerca de 304 graus. Estes **Anéis** estão dispostos: quatro nas regiões respectivas de apoio, nos pontos de recebimento, pelo **Chassis**, das reações ao carregamento provenientes da **Suspensão**; um na Segunda **Sela Frontal**, na região do **Pino Rei**, tal como detalhado na Figura 2.5, e um na região onde situam-se os **Pés de Descanso**, conforme indicado nas Figuras 2.1 e 2.2, utilizados quando o Equipamento encontra-se desengatado do veículo de tração.

Os **Anéis de Reforço**, que constam das Figuras 2.1 e 2.5, são fabricados a partir de chapa de Aço Inoxidável ASTM A 240 Tp 304L, de espessura 4,0 mm e soldados sobre **Empalmes** (em Inglês, "Pad") do **Casco** cilíndrico. Tais **Empalmes**, por sua vez, são reforços soldados, executados em chapa de Aço Inoxidável ASTM A 240 Tp 304L de espessura 4,0 mm e possuem um ângulo de abraçamento de 360° em torno da seção transversal do **Casco**. A largura dos **Empalmes** excede simetricamente os limites da seção transversal dos **Anéis de Reforço**.

**Figura 2.5 - Semi-Reboque Tanque - Detalhe Frontal**



O apoio do Vaso é feito através de Selas, conforme Figuras 2.1 e 2.5, compostas de duas chapas de Aço Carbono ABNT/SAE 1010 de espessura 6,4 mm (1/4"), fechamentos laterais e inferior executados com perfis "U" de chapa dobrada do mesmo material e espessura.

Na região da Primeira Sela Frontal, como não há Anel de Reforço, o Empalme respectivo, também executado em chapa de Aço Inoxidável ASTM A 240 Tp 304 espessura 4,0 mm, tem ângulo de abragamento suficiente para apoiar a própria Sela na parte inferior do Casco.

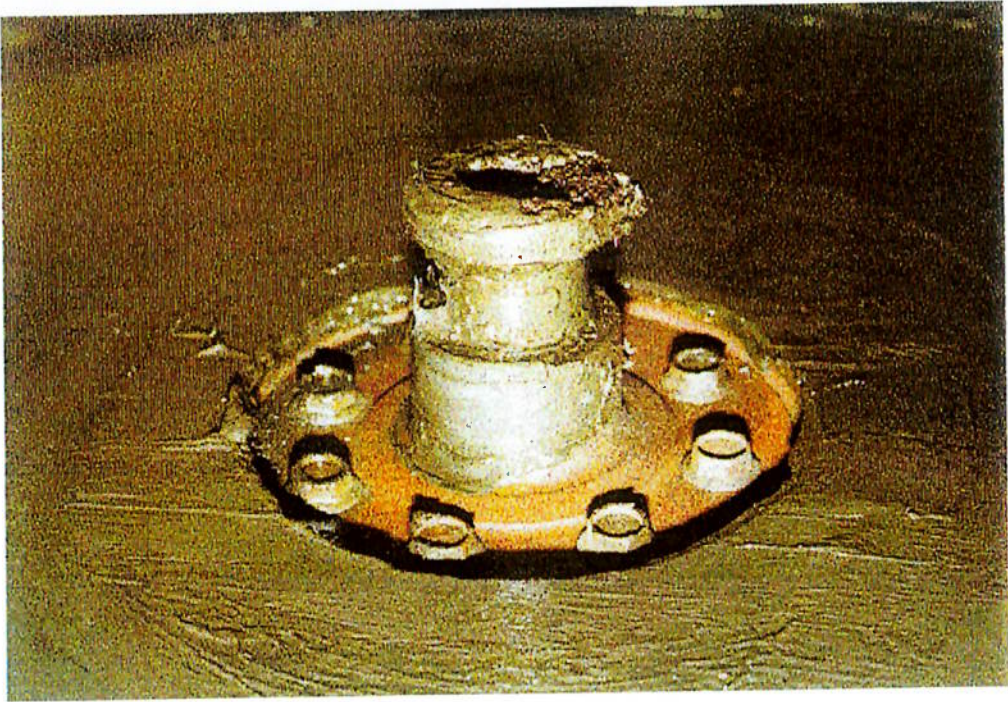
Entre as duas primeiras Selas Frontais, na parte inferior do Casco, entre este e a Chapa do Pino Rei, há um Quadro de Reforço (não visível externamente) composto de Cantoneiras, formando um conjunto disposto no plano horizontal, com dimensões de, aproximadamente, (520x400)mm e cuja Linha de Centro coincide com a do Pino Rei. As Cantoneiras têm dimensões (60x100x6,4)mm e são executadas em chapa dobrada de Aço Carbono ABNT/SAE 1010 espessura 6,4 mm (1/4").

Fechando inferiormente este conjunto das duas primeiras Selas Frontais, há uma chapa de aço carbono ABNT/SAE 1010, de espessura 9,5 mm (3/8"), denominada Chapa do Pino Rei, mostrada na Figura 2.5, através da qual o Semi-Reboque Tanque apoia-se sobre a Quinta Roda do veículo traçador.

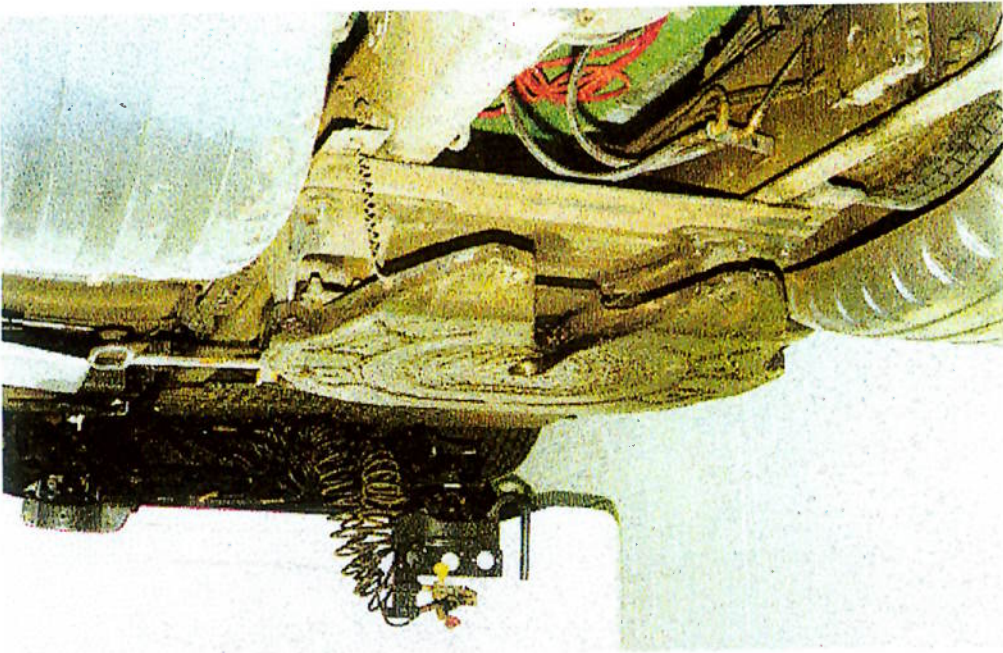
Denominada como Quinta Roda, este dispositivo do cavalo mecânico é uma placa articulada, que apresenta rotação livre no plano longitudinal vertical do veículo, montada sobre o chassis, na região próxima do seu eixo traseiro, sobre a qual apoia-se o Conjunto Semi-Reboque Tanque, através da Chapa do Pino Rei, como indicado na Figura 2.6. O engate propriamente dito é feito pelo Pino Rei, indicado na Figura 2.7, que está posicionado no centro das duas Selas Frontais, projetando-se verticalmente para baixo, a partir da Chapa do Pino Rei anteriormente descrita.

Supõe-se que a Chapa do Pino Rei apoia-se totalmente na Quinta Roda do denominado cavalo-mecânico. Através da observação desses veículos, verifica-se que esta hipótese é bastante plausível, havendo, inclusive, necessidade de lubrificação da interface Quinta Roda - Chapa do Pino Rei, para permitir melhor deslizamento destes componentes entre si, quando da execução de uma curva pelo conjunto cavalo-mecânico e Semi-Reboque.





**Figura 2.7 - Semi-Reboque Tanque - Detalhe do Pino Rei**



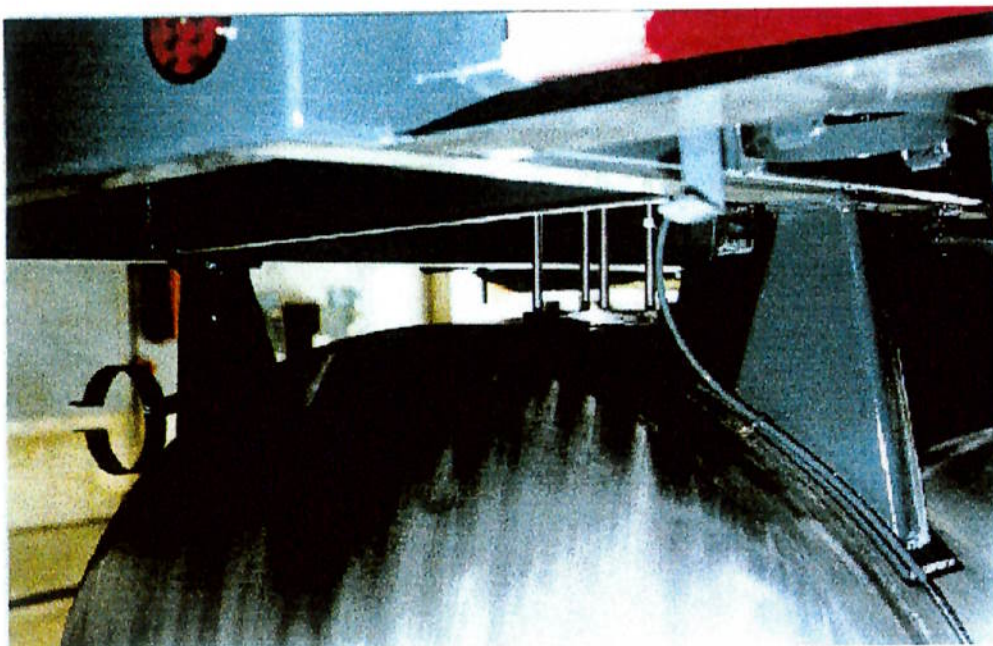
**Figura 2.6 - Quinta Roda - Detalhe**

Subconjuntos: o **Carro da Suspensão**, seu trecho mais central em relação ao eixo longitudinal do Conjunto, região sob a qual situam-se os **Feixes de Molas** e os **Eixos da Suspensão**; **Subchassis dos Pés de Descanso**, trecho da parte frontal do Conjunto e

O **Chassis**, indicado nas Figuras 2.2 e 2.3, é composto, basicamente, de três para apoio, são soldados **Calços de chapa de Aço Carbono ABNT/SAE 1010** com inferior das **Selas** e entre as **Longarinas** e os **Pés Traseiros**, onde se dá o contato apoiam-se sobre as **Longarinas** que compõem o **Chassis**. Entre as **Longarinas** e a parte

As **Selas** que estão na região do **Carro da Suspensão**, mostrado na Figura 2.4, **Traseiro** nas direções longitudinal e circunferencial do **Casco**. **ASTM A240 Tp 304** de espessura 4,0 mm, cujas dimensões excedem as do **Pé 25 graus**. Entre os **Pés Traseiros** e o **Casco** são soldados **Empalmes de aço inoxidável** espessura 6,4 mm (1/4"), que têm um ângulo de contato com o **Costado** da ordem de indica a Figura 2.8, executados em chapa de **Aço Carbono ABNT/SAE 1010**, de Na parte traseira, o **Casco** apoia-se sobre dois **Pés Traseiros** cuneiformes, como

Figura 2.8 - Semi-Reboque Tanque - Detalhe dos Pés Traseiros



Subchassis Traseiro, região sobre a qual apóiam-se os Pés Traseiros e onde está fixado o Para-Choque Traseiro.

Longarinas e Travessas que compõem o Chassis são todas executadas em chapa de Aço Carbono ABNT/SAE 1010.

No trecho denominado Subchassis dos Pés de Descanso, visto na Figura 2.2, as Longarinas têm secção transversal constante com dimensões (60x180x6,4)mm.

No trecho Carro da Suspensão, mostrado na Figura 2.4, as Longarinas Principais têm comprimento de 4000 mm, secção transversal com altura variável, apresentando, na parte mais à frente, dimensões de (90x330x6,4)mm, até medidas de (90x250x6,4)mm, na região traseira do Subconjunto.

O Subchassis Traseiro, indicado na Figura 2.3, apresenta Longarinas também de altura variável, com dimensões de (90x250x6,4)mm, na sua parte frontal, e de (90x180x6,4)mm, na região traseira.

As Travessas Frontais, que pertencem ao Subchassis dos Pés de Descanso têm perfil com dimensões aproximadas de (60x180x6,4)mm.

As Travessas Principais, que compõem o Carro da Suspensão têm largura de aba de 60mm, espessura de 6,4mm e altura correspondente àquela da Longarina no local de sua fixação.

Já as duas últimas Travessas Traseiras, do Subchassis Traseiro, têm largura de aba de 60mm, espessura de 4,8 mm (3/16") e também altura correspondente à da Longarina onde estão localizadas.

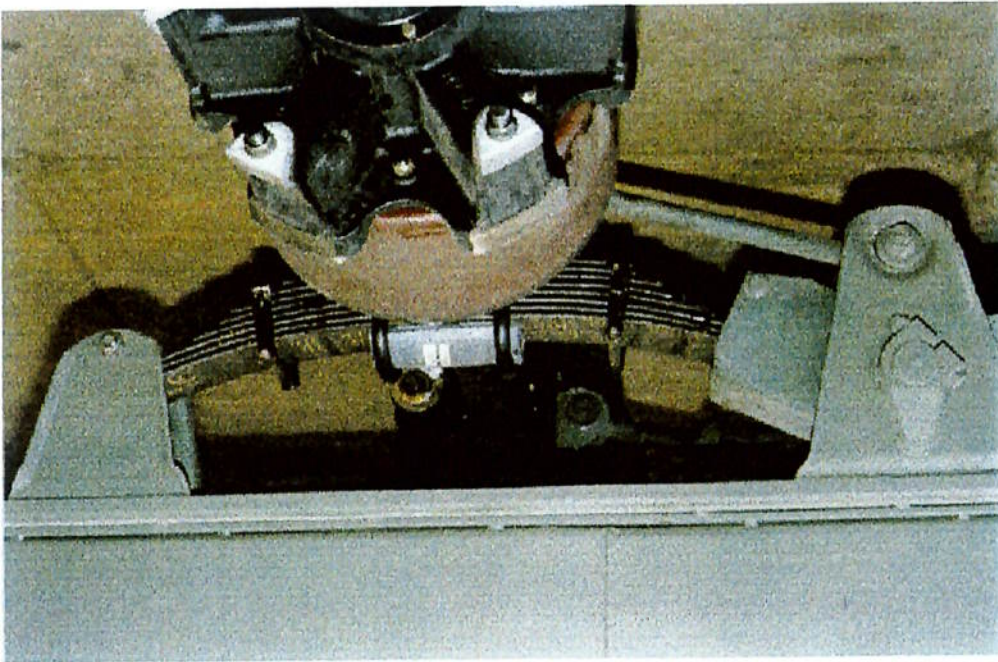
Os componentes da Suspensão - três Eixos completos incluindo Rodas e Sistema de Freios, Feixes de Molas, Suportes e demais acessórios, assim como Pneus, são adquiridos aos respectivos fabricantes e montados no Carro da Suspensão.

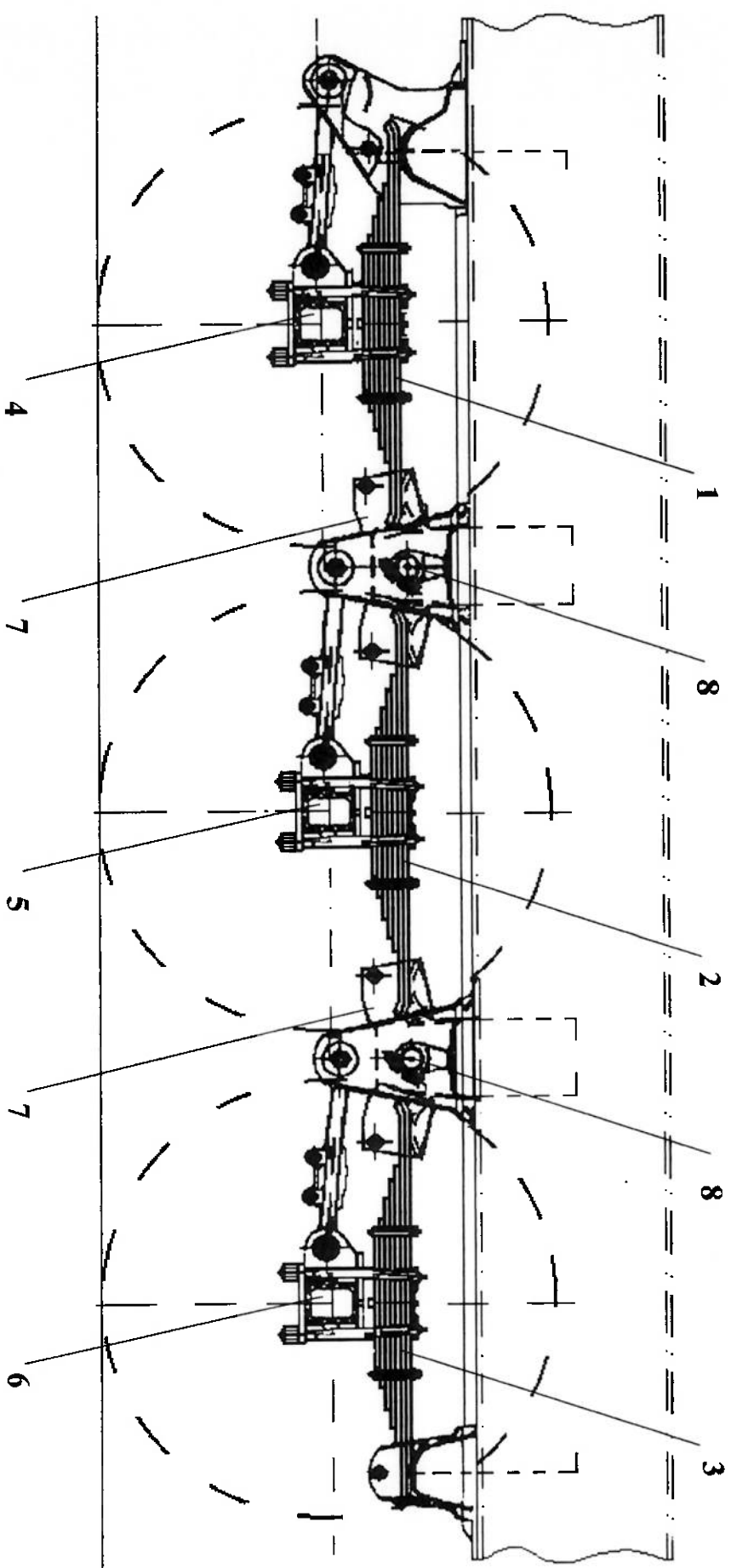
O Sistema de Suspensão é composto por três Feixes de Molas em cada lado do Equipamento, aqui denominados Feixe de Molas Frontal, Feixe de Molas Intermidiário e Feixe de Molas Traseiro. Da mesma forma, os Eixos da Suspensão são denominados, neste Trabalho, Eixo Frontal, Eixo Intermidiário e Eixo Traseiro. Estes componentes estão indicados nas Figuras 2.9 e 2.10.

Tomando-se como referência a Figura 2.10, que mostra desenho esquemático, através de corte feito por um plano vertical que passa pela Linha de Centro Longitudinal da Suspensão, verifica-se que o Feixe de Molas Intermidiário (item 2 da citada

Figura) apoia-se em Balancins (item 7), fixados ao Conjunto da Suspensão por meio de articulações (item 8). O Feixe de Molas Frontal (item 1) tem sua extremidade voltada para a frente em contato com um apoio fixo e sua extremidade voltada para trás apoiada em Balancim. Já o Feixe de Molas Traseiro (item 3) tem sua extremidade frontal apoiada em Balancim e sua extremidade voltada para trás em contato com um apoio fixo. Ainda na Figura 2.10, observam-se o Eixo Frontal (item 4), Eixo Intermediário (item 5) e Eixo Traseiro (item 6), fixados aos Feixes de Molas respectivos por meio de grampos, solidarizando estes componentes, correspondentemente, entre si.

Figura 2.9 - Feixe de Molas





- Legenda: 1 - Feixe de Molas Frontal; 2 - Feixe de Molas Intermediário; 3 - Feixe de Molas Traseiro; 4 - Eixo Frontal;**  
**5 - Eixo Intermediário; 6 - Eixo Traseiro; 7 - Balancim; 8 - Articulação.**

**Figura 2.10 - Componentes da Suspensão - Corte Longitudinal**

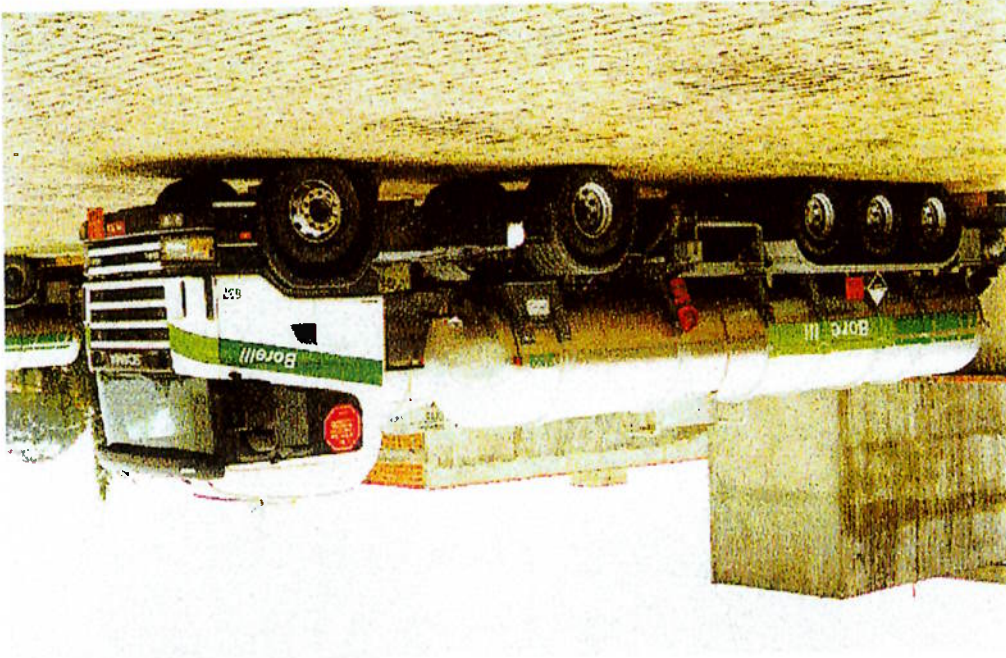
O Conjunto **Semi-Reboque Tanque** possui outros acessórios como Boca de Visita, Escada e Plataforma de Acesso Superior, Pé de Descanso, Válvulas, Sistema de Sinalização e Acessórios de Segurança, tal como indicado nas Figuras 2.11 e 2.12, que terão seus detalhes suprimidos desta descrição, pelo fato de estarem fora do escopo do presente Trabalho.

Na Tabela 2.2 apresentam-se, de forma resumida, os materiais e a espessura das chapas empregadas na fabricação de diversos componentes elencados neste Capítulo.

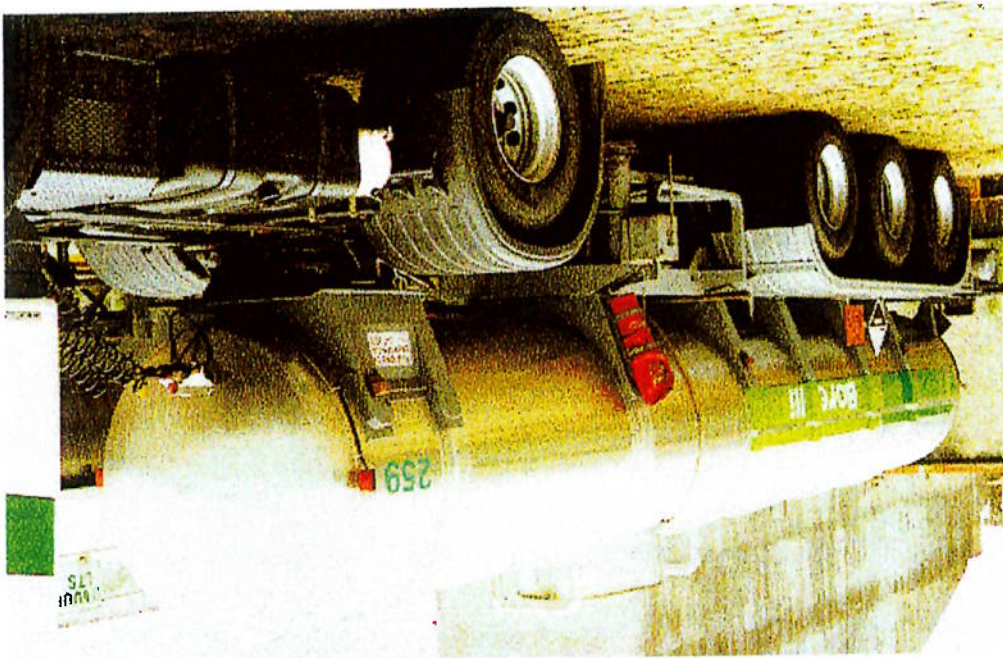
Para a caracterização dos materiais de construção utilizados no **Semi-Reboque Tanque**, quanto a suas propriedades mecânicas, deve-se consultar a Tabela 2.3, onde encontram-se indicados, em conformidade com as denominações de norma.

Da mesma forma, as características de composição química dos citados materiais estão indicadas na Tabela 2.4.

**Figura 2.12 - Conjunto Semi-Reboque Tanque e Cavalo Mecânico**



**Figura 2.11 - Semi-Reboque Tanque Acoplado a Cavalo Mecânico**



COMPONENTE	MATERIAL	ESPESSURA
Casco	Aço Inoxidável ASTM A 240 Tp 316L	4,0 mm
Tampas	Aço Inoxidável ASTM A 240 Tp 316L	4,0 mm
Empalmes	Aço Inoxidável ASTM A 240 Tp 304L	4,0 mm
Anéis de Reforço	Aço Inoxidável ASTM A 240 Tp 304L	4,0 mm
Selas	Aço Carbono ABNT/SAE 1010	6,4mm (1/2")
Pés Traseiros	Aço Carbono ABNT/SAE 1010	6,4mm (1/2")
Calços das Selas	Aço Carbono ABNT/SAE 1010	6,4mm (1/2")
Calços dos Pés	Aço Carbono ABNT/SAE 1010	6,4mm (1/2")
Traseiros	Aço Carbono ABNT/SAE 1010	6,4mm (1/2")
Chapa do Pino Rei	Aço Carbono ABNT/SAE 1010	9,5mm (3/8")
Quadro de Reforço Sobre o Pino Rei	Aço Carbono ABNT/SAE 1010 (cantonetas)	6,4mm (1/2")
Caixa para Pés de Descanso	Aço Carbono ABNT/SAE 1010	6,4mm (1/2")
Chapa de Fechamento	Aço Carbono ABNT/SAE 1010	4,8mm (3/16")
Longarina Frontal	Aço Carbono ABNT/SAE 1010	6,4mm (1/2")
Longarina Principal	Aço Carbono ABNT/SAE 1010	6,4mm (1/2")
Longarina Traseira	Aço Carbono ABNT/SAE 1010	6,4mm (1/2")
Travessas Frontais	Aço Carbono ABNT/SAE 1010	6,4mm (1/2")
Travessas Principais	Aço Carbono ABNT/SAE 1010	6,4mm (1/2")
Travessas Traseiras	Aço Carbono ABNT/SAE 1010	4,8mm (3/16")

**Tabella 2.2 - Especificação de Materiais e Espessuras dos Componentes para Semi-Reboque Tanque**



**Tabela 2.3 - Propriedades Mecânicas dos Materiais de Construção Utilizados no Equipamento Semi-Reboque Tanque**

		MATERIAL				
PROPRIEDADE	NÚMERO 1	NÚMERO 2	NÚMERO 3	NÚMERO 4*	NÚMERO 5*	
Designação Genérica	Aço Inoxidável Austenítico	Aço Inoxidável Austenítico	Aço Carbono	Aço Carbono	Aço Carbono	
Norma	ASTM A 240 Tp 316L	ASTM A 240 Tp 304L	ABNT/SAE 1010	SAE 5160	DIN EN 10025 ** S 355 JO	
Módulo de Elasticidade	$1,93 \times 10^{11}$ N/m <sup>2</sup>	$1,93 \times 10^{11}$ N/m <sup>2</sup>	$2,07 \times 10^{11}$ N/m <sup>2</sup>	$1,93 \times 10^{11}$ N/m <sup>2</sup>	$2,06 \times 10^{11}$ N/m <sup>2</sup>	
Densidade de Massa	8000 Kg/m <sup>3</sup>	8000 Kg/m <sup>3</sup>	7800 Kg/ m <sup>3</sup>	7800 Kg/ m <sup>3</sup>	7800 Kg/ m <sup>3</sup>	
Coefficiente de Poisson	0,305	0,305	0,292	0,291	0,300	
Limite de Resistência Mecânica	#	#	324 MPa	1669 MPa	#	
Limite de Resistência à Tração	485 MPa	485 MPa	#	#	630 MPa máx.	
Limite de Escoramento	170 MPa	170 MPa	179 MPa	1531 MPa	355 MPa máx.	
Aplicação	Casco, Tampas	Anéis de Reforço, Empalmes	Selas, Chassis, Chapa do Pino Rei, Chapa de Fechamento, Quadro de Reforço	Feixes de Molas	Eixos	

\* assumidos como típicos para a construção, conforme fabricante

\*\* anteriormente DIN 17100 St 53-2

**Tabela 2.4 - Composição Química Básica dos Materiais de Construção Empregados no Semi-Reboque Tanque**

	<b>ASTM A 240 Tp 316 L</b>	<b>ASTM A 240 Tp 304 L</b>	<b>ABNT/SAE 1010</b>	<b>SAE 5160</b>	<b>DIN EN 10025 S 355 JO</b>
<b>Carbono [%]</b>	0,03	0,03	0,08 - 0,13	0,56 - 0,64	0,20 máx.
<b>Manganês [%]</b>	2,00	2,00	0,30 - 0,60	0,75 - 1,00	1,60 máx.
<b>Fósforo [%]</b>	0,045	0,045	0,04 máx.	0,035	0,04 máx.
<b>Enxofre [%]</b>	0,030	0,030	0,05 máx.	0,040	0,04 máx.
<b>Silício [%]</b>	0,75	0,75	- X -	0,15 - 0,35	0,55 máx.
<b>Cromo [%]</b>	16,00 - 18,00	18,00 - 20,00	- X -	0,70 - 0,90	- X -
<b>Níquel [%]</b>	10,00 - 14,00	8,00 - 12,00	- X -	- X -	- X -
<b>Molibdênio [%]</b>	2,00 - 3,00	- X -	- X -	- X -	- X -
<b>Nitrogênio [%]</b>	0,10	0,10	- X -	- X -	0,009
<b>Cobre [%]</b>	- X -	- X -	- X -	- X -	- X -
<b>Outros [%]</b>	- X -	- X -	- X -	- X -	- X -

## 2.2 Aspectos do Processo de Fabricação

No que tange à fabricação do Equipamento em estudo, tanto os processos de soldagem como os soldadores devem ser qualificados e a execução das uniões soldadas deve obedecer aos critérios estabelecidos no Código ASME Secção IX [9].

Em um caso típico verificado, para o **Vaso de Pressão** operando como **Semi-Reboque Tanque**, emprega-se a técnica de soldagem por arco tungstênio com atmosfera gasosa, sendo utilizado argônio como gás inerte.

As juntas do **Costado** propriamente dito são de topo, com chanfro em “V” simples formando um ângulo de 60°, sendo que os cordões de solda são executados em ambos os lados das chapas.

Segundo o Código ASME Secção VIII, Divisão I [5], os gomos que formam o **Costado** devem ter suas soldas longitudinais defasadas ao serem justapostos na montagem.

As chapas são calandradas e soldadas formando gomos, montados justapostos, por união soldada, constituindo o **Casco** completo que, em uma fase seguinte, aos **Tampos Torisféricos**, também por junções soldadas, dando origem ao **Vaso de Pressão**.

Os **Tampos Torisféricos**, por sua vez, são formados a partir de discos de chapa soldada, que sofrem um processo de conformação a frio para rebordamento. As localizações dos cordões de solda executados para formar os discos, devem obedecer a determinados critérios, conforme Código ASME Secção VIII, Divisão I [5], de maneira a garantir a resistência mecânica após o processo de fabricação.

O **Chassis** e o **Vaso de Pressão** podem ter sua execução em paralelo. Depois de soldados todos os seus agregados, incluindo **Empalmes** e **Anéis de Reforço**, além das **Selas completas**, o Subconjunto **Vaso de Pressão** é soldado sobre o **Chassis**, através de **Calços**, utilizados como elementos intermediários.

### Capítulo 3

## Descrição do Modelo de Elementos Finitos Para Vaso de Pressão Autoportante Operando Como Semi-Reboque Tanque

### 3.1 Descrição Geral

Neste Estudo, para o desenvolvimento da análise estrutural, elaborou-se um Modelo do Vaso de Pressão Autoportante - Semi-Reboque Tanque, utilizando-se o Método dos Elementos Finitos, mediante o emprego do programa ANSYS, disponível na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Como é usual em estudos de Engenharia, sobretudo utilizando-se o referido Método para simulação numérica, muitos aspectos do Equipamento real são simplificados ou, eventualmente, desconsiderados, quer pela sua irrelevância em função dos objetivos do Trabalho, quer por não ter sido possível o acesso a informações detalhadas do fabricante de algum componente.

Não obstante, eventual falta de informação é analisada e contornada, através de simplificação consistente, para que o Modelo seja fidedigno e permita a obtenção de resultados válidos.

Tem-se em mente preparar um Modelo do conjunto do Equipamento que proporcione resultados relevantes e satisfatórios no tocante a precisão e que seja, ao mesmo tempo, o mais simples possível. Essa diretriz objetiva, sobretudo, otimizar o tempo de processamento e mesmo o de execução do Modelo.

Primordialmente, adota-se como meta a verificação da distribuição de tensões na área de interesse para estudo, ou seja, aquela localizada sobre o conjunto da Suspensão, com a determinação de pontos críticos, tanto quanto a tensões equivalentes de von Mises, para verificação da possibilidade de ocorrência de falha por escoamento, como

também quanto à flutuação de tensão e ao cálculo da vida em fadiga, considerando-se dois Métodos diferentes, como é visto no Capítulo 6. Através do Modelo de Elementos Finitos, pode-se verificar também o comportamento mecânico do Conjunto, a distribuição das massas e consequentes valores de reações de apoio, tanto nos Eixos como também na vinculação ao veículo de tração, através do Pino Rei e apoio da Chapa do Pino Rei sobre a Quinta Roda.

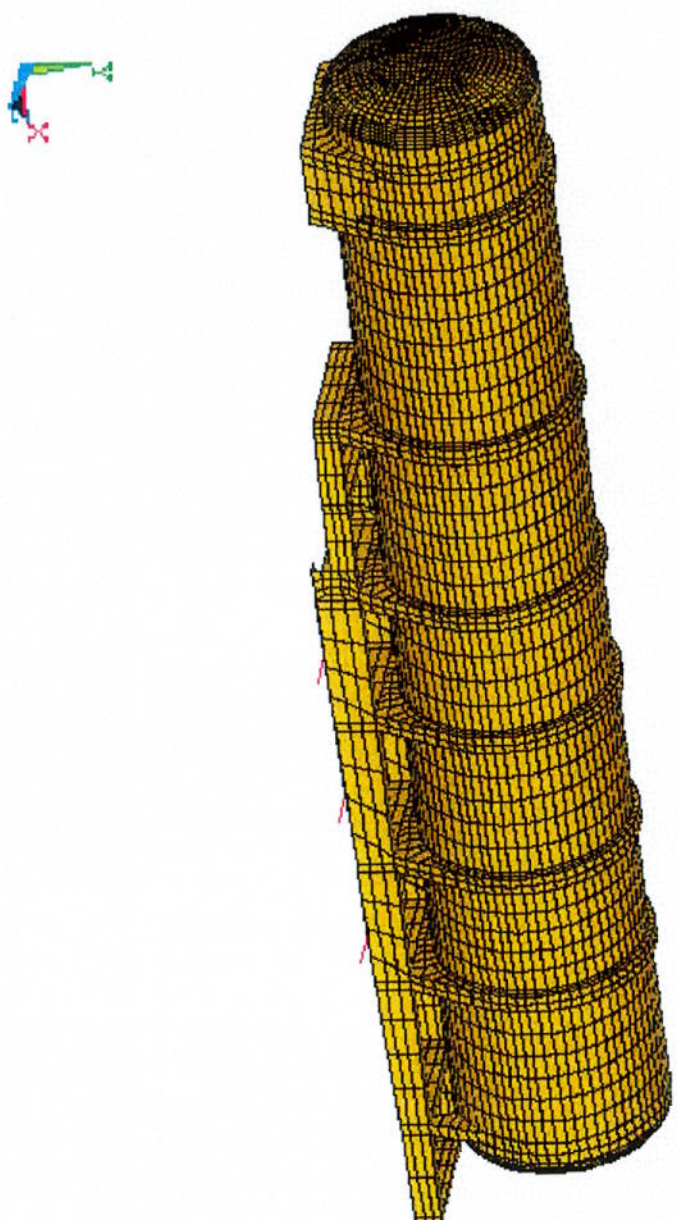
São utilizados, na elaboração da geometria do Modelo, os recursos do pré-processador do programa ANSYS e opta-se por trabalhar com a secção completa do Vaso de Pressão, ao invés de utilizar propriedades de simetria e modelo axisimétrico, pois devem ser aplicadas condições de contorno assimétricas, no intuito de simular a atuação de momento torsor sobre a Estrutura.

Utilizam-se duas concepções de malhas em uma única geometria que caracteriza o Modelo. Uma, denominada Malha Inicial, adotada criteriosamente, porém sem que haja a preocupação de afeiti-la, com a qual determina-se, sobretudo, a região crítica de flutuação de tensão; outra, denominada Malha Refinada, cujas dimensões dos elementos empregados são obtidas através do processo de afeição descrito no Capítulo 4, que inclui um adensamento do reticulado de elementos na região determinada como crítica no procedimento anterior.

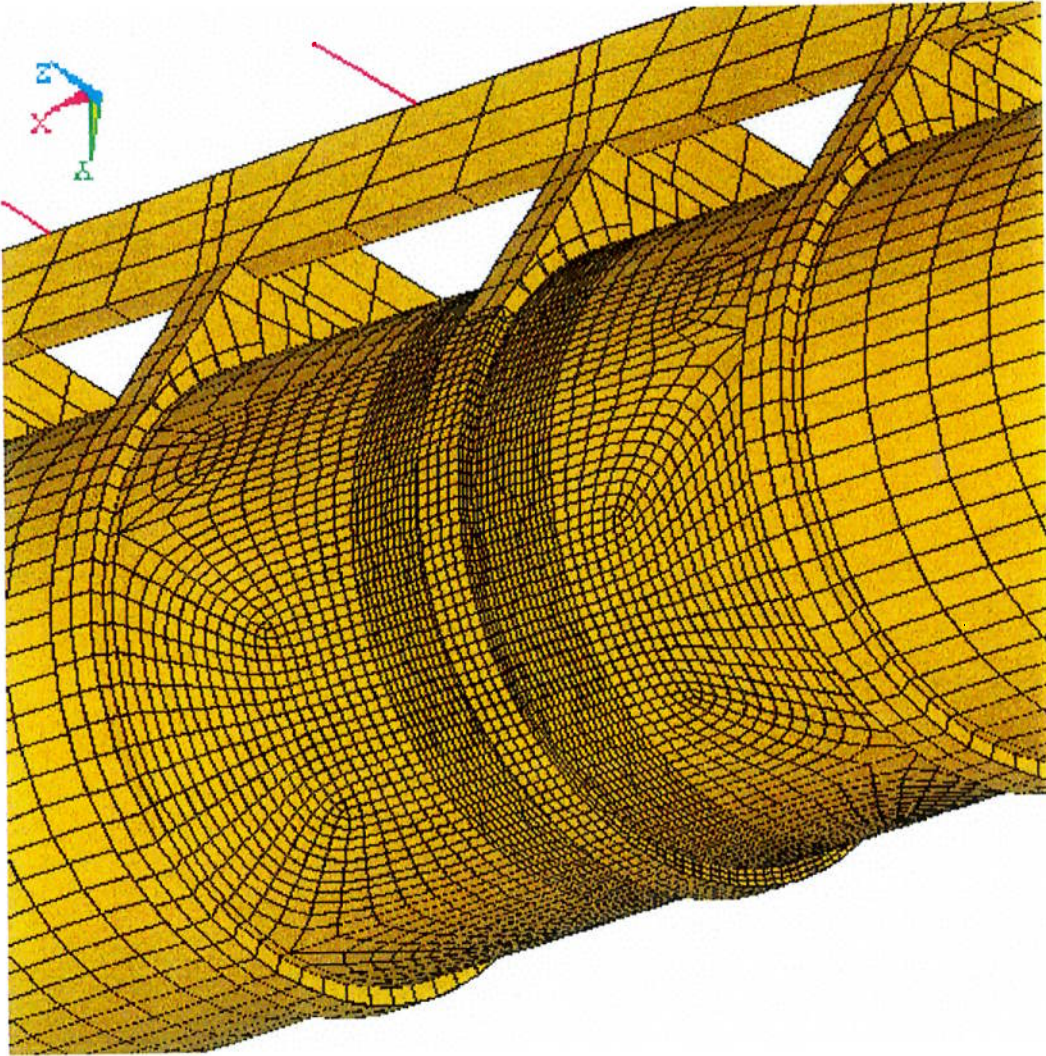
Dessa forma, como indicam a Tabela 3.1 e a Figura 3.1, o Modelo, utilizando a Malha Inicial, compreende aproximadamente 8365 nós, ao passo que, com a Malha Refinada, na região de maior flutuação de tensão, dentro da área de interesse, apresenta cerca de 14929, como observa-se na Figura 3.2.

**Tabela 3.1 Características do Modelo de Elementos Finitos para Semi-Reboque Tanque**

Malha Refinada	14929	15556	89574 aprox.
Malha Inicial	8365	8932.	50190 aprox.
Nós	Elementos	Equações	



**Figura 3.1 - Vista em Perspectiva do Modelo de Elementos Finitos  
com Malha Inicial**



**Figura 3.2 - Detalhe do Modelo de Elementos Finitos - Região com Malha Refinada**

A geometria é obtida através da análise de um Equipamento real, a partir de verificações feitas mediante desenho dimensional e, até onde foi possível, por levantamentos "in loco".

Partindo desses dados coletados, realizam-se estudos geométricos e dimensionais, utilizando-se o programa AUTOCAD para, em seguida, executar-se o desenho do Equipamento em três dimensões, através do pré-processador do programa ANSYS. Com este procedimento, obtém-se o desenho espacial do Conjunto, composto por áreas específicas, as quais são discretizadas convenientemente, gerando os elementos necessários para formar o **Modelo de Elementos Finitos**.

Já no desenvolvimento da **Malha Inicial**, como as falhas ocorrem no **Casco** do Equipamento, o enfoque do Estudo está centrado no **Vaso de Pressão**, o que leva à priorização da malha respectiva; o **Chassis**, por não se ter qualquer registro de seu comprometimento no campo, não é considerado como parte crítica e tem sua malha desenvolvida mais simplificada.

São suprimidos detalhes do **Vaso** como Boca de Inspeção e aberturas de menores dimensões para conexões diversas, Escadas, Passarelas e congêneres, que são julgados de importância secundária em relação aos objetivos do Estudo. Também, intencionalmente, Rodas e Pneus não fazem parte do **Modelo** pois fogem à ênfase que deseja-se dar ao Trabalho.

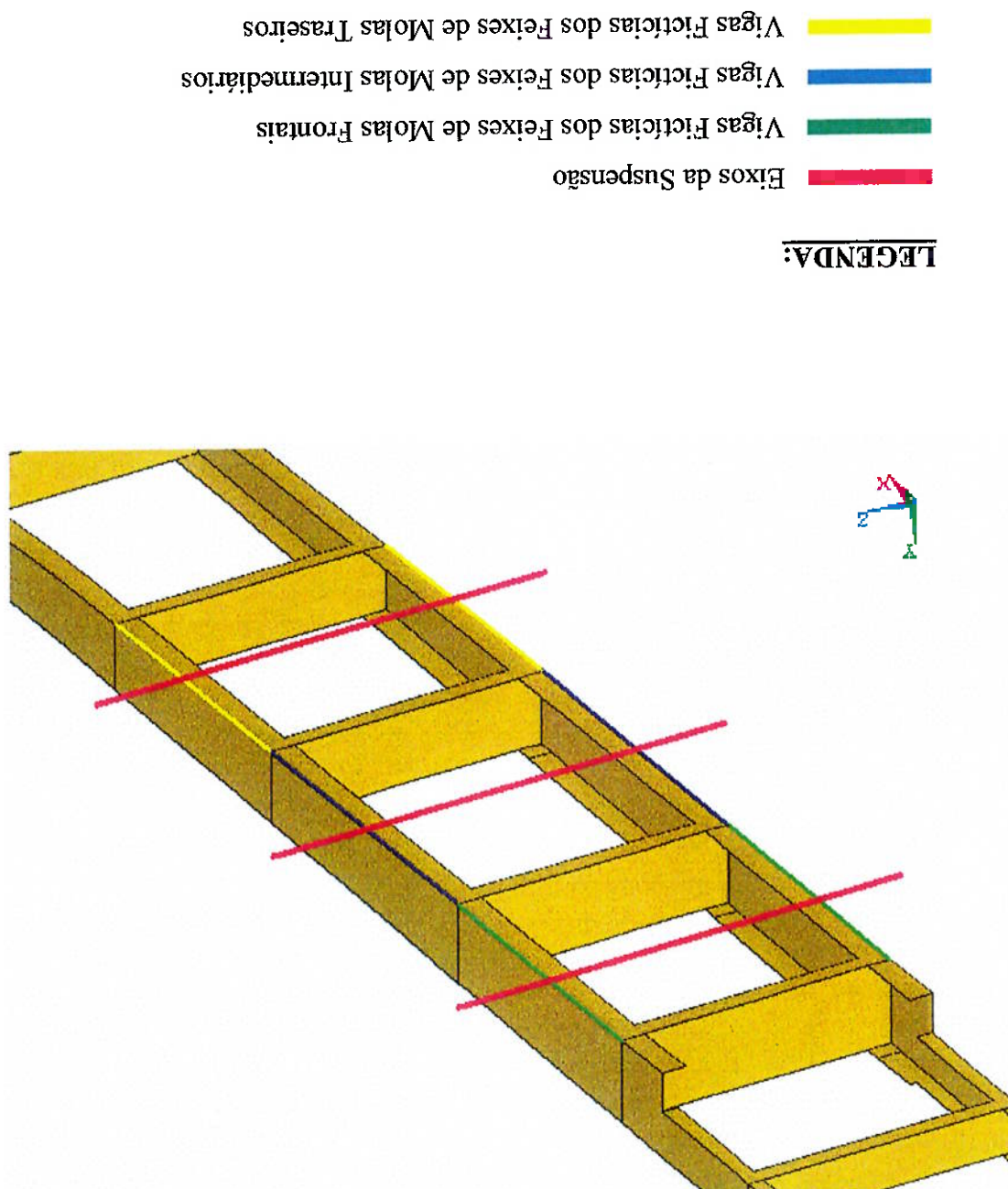
A distribuição e a magnitude das tensões e deformações, na Estrutura do Equipamento em análise, são função direta de sua interação com o solo, através dos apoios dos Pneus e da rigidez dos principais elementos da **Suspensão** como **Feixes de Molas e Eixos**.

Sob o mesmo aspecto, também é bastante importante a articulação da parte frontal do Conjunto, em seu plano de simetria vertical longitudinal, possível através das características de funcionamento da Quinta Roda, sobre a qual se apóia.

Com a introdução dos **Eixos** no **Modelo**, conforme mostra a Figura 3.3, obtém-se uma simulação mais próxima do caso real. Através desses componentes, interligam-se os **Feixes de Molas** respectivos, um em cada lado do **Chassis**, para cada **Eixo**, servindo, este último, de transmissor de esforços e inflúndo no comportamento da Estrutura, sobretudo nos Casos onde há torção.



Figura 3.3 - Detalhe da Posição Relativa de Eixos e Vigas Fictícias



Da mesma forma, aproxima-se da realidade, através da modelagem dos **Feixes**

de **Molas** como **Vigas Fictícias**, o que permite considerar características próprias de rigidez desses elementos e, também, articulações nos pontos de sua junção com o **Chassis**.

Na operação do Equipamento, em campo, os **Feixes de Molas** são componentes absorvedores de deslocamentos advindos do perfil da via e, através das reações dos Pneus com o solo, sofram deflexões e transmitam cargas para os pontos de apoio no **Chassis**, influenciando diretamente na distribuição de tensões da Estrutura, tanto nas solicitações onde predomina flexão como nas que envolvem torção.

No tocante à simulação do comportamento da Quinta Roda, como já descrito, obtêm-se esse efeito, no **Modelo**, através do alinhamento dos três Apoios da **Chapa do Pino Rei**. Os nós, onde representam-se os Apoios sobre o cavalo mecânico, formam uma reta imaginária, na direção transversal do Equipamento, em torno da qual é permitida rotação livre da Estrutura.

Caso o **Modelo** desprezasse **Feixes de Molas** e articulações, localizando as restrições ao deslocamento, correspondentes aos Apoios, diretamente em nós do **Chassis**, teria-se, no Equipamento, uma distribuição de tensões e deformações muito distante da realidade, com regiões “duras” introduzidas pela falta de elementos de apoio com flexibilidade e capacidade de articulação adequadas para permitir a transmissão de esforços convenientemente, como já abordado.

Consideram-se, portanto, na modelagem, os três **Feixes**, representados por elementos de viga, em cujas extremidades, denominadas pontas de **Fixo**, estão os Apoios que simulam o contato do Equipamento com o solo, função desempenhada pelos Pneus, na situação real. Os mencionados **Feixes** são denominados, respectivamente, **Fixo Frontal**, **Fixo Intermediário** e **Fixo Traseiro** e, cada um deles, através dos elementos que o representam, está vinculado aos **Feixes de Molas**, por sua vez, representados pelas correspondentes **Vigas Fictícias**, como descrito a seguir.

Segundo a argumentação apresentada neste Capítulo, para efeito de melhor transmitir os esforços da **Suspensão** para o **Chassis** e o **Vaso**, no **Modelo**, introduzem-se **Vigas Fictícias** articuladas, que simulam o comportamento de deflexão dos **Feixes de Molas**, executando a transmissão de esforços, cuja origem advém do contato Pneu-via tratável, para o Conjunto de interesse. Estas **Vigas** são

representadas, no **Modelo**, como elementos de viga, substituindo os respectivos **Feixes de Molas**, com propriedades equivalentes às daqueles, no tocante à rigidez, e situam-se na linha externa inferior do **Chassis**, como pode ser observado na Figura 3.3.

Como já anteriormente abordado, através da Figura 2.10 do Capítulo 2, em um Equipamento real, os **Feixes de Molas**, num total de seis, apóiam-se da seguinte maneira:

- Os **Feixes de Molas Intermediários** têm ambas as extremidades apoiadas em Balancins;

- Os **Feixes de Molas Traseiros** têm sua extremidade frontal apoiada em Balancim e os **Feixes Frontais** têm sua extremidade traseira apoiada em Balancim;

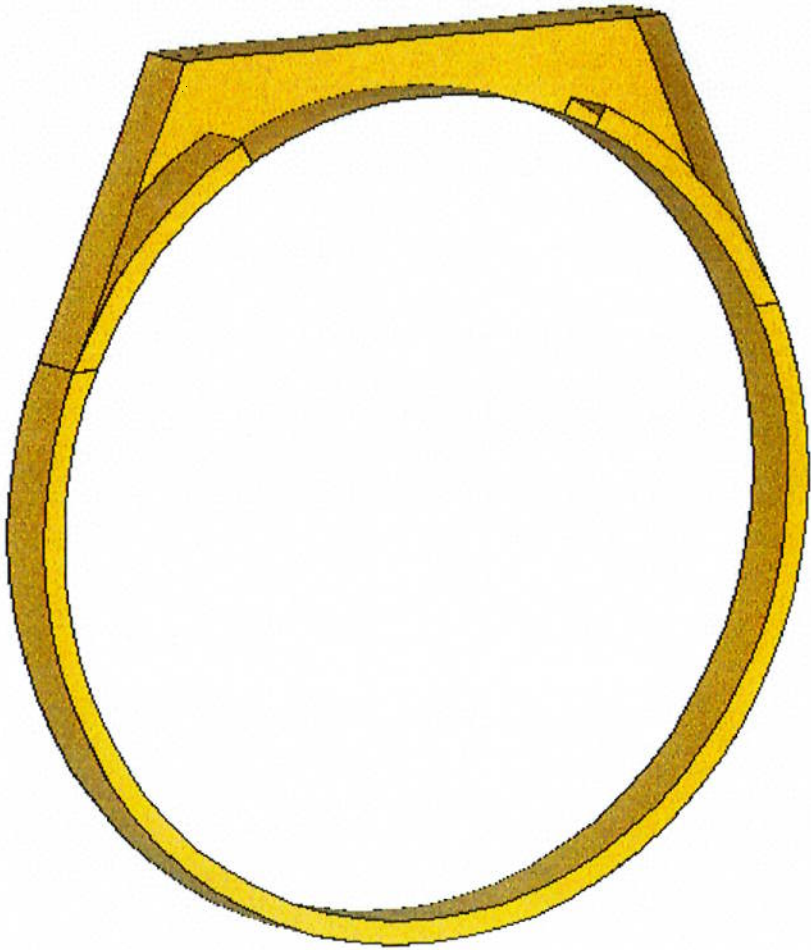
Assim, os **Feixes de Molas** têm ao menos uma de suas extremidades apoiada em Balancim e este, por sua vez, é fixado ao **Chassis** por meio de uma articulação.

Para simplificar o sistema descrito e, ao mesmo tempo, introduzir o comportamento real de flexibilidade na Estrutura, opta-se por representar no **Modelo** as extremidades desses componentes vinculadas ao **Chassis** diretamente por articulações.

Com isto, despreza-se o efeito do escorregamento dos **Feixes de Molas** em contato com os Balancins e os Apoios Fixos. Da mesma forma, desconsidera-se, também, o efeito do atrito entre as lâminas dos **Feixes**, responsável pelo introdução de efeitos de amortecimento das vibrações mecânicas atuantes sobre a Estrutura. Considera-se essa solução, adotada no **Modelo**, como aproximação coerente, cujos resultados finais estão dentro dos objetivos de Engenharia propostos para análise estrutural do Equipamento.

Portanto, os nós geometricamente coincidentes, em cada extremidade dos **Feixes de Molas**, com seus pares pertencentes ao **Chassis**, possuem, entre si, rotação livre na direção transversal ao Conjunto, ou seja, ao redor do eixo Z. Os demais graus de liberdade desses nós são solidários ou, em outras palavras, deslocamentos e rotações, nas demais direções dos nós pertencentes aos **Feixes de Molas** são os mesmos de seus pares pertencentes às **Longarinas**.

Conforme observa-se na Figura 3.4, no que diz respeito aos **Anéis de Reforço** e **Selas**, o **Modelo** é desenvolvido exatamente como constrói-se o Equipamento real. As faces frontal e traseira de determinada **Sela**, em relação às superfícies correspondentes do **Anel de Reforço**, são justapostas umas em relação às outras, mas



**Figura 3.4 - Detalhe de Anel de Reforço Típico**

não solidarizadas. A união entre **Sela** e **Anel de Reforço** dá-se, somente, na sua junção horizontal da junção, que prolonga-se, até o **Casco**, através das regiões correspondentes às faces frontal e traseira da **Sela**.

No que se refere à geometria do **Modelo**, o **Casco** é representado pelo seu raio externo real, como mostram os itens "a" e "b" da Figura 3.5. O programa de elementos finitos, portanto, considera esse raio externo do **Casco** real como raio médio do **Casco** modelado e, a partir deste último, leva em conta, simetricamente, as espessuras dos elementos que compõem, tanto a região sem reforços do **Costado**, como a região que inclui os **Empalmes**, conforme indica o item "c" da Figura 3.5, onde também são ilustrados nós da Estrutura para **Malha Inicial**.

Na modelagem com **Malha Refinada**, as considerações feitas acima são as mesmas, diferenciando-se, apenas, pela introdução de um número maior de nós, na região do **Anel Reforço** que apresenta maior flutuação de tensão.

O Equipamento **Semi-Reboque Tanque** é praticamente todo fabricado em chapa de aço, tanto nas partes do **Vaso de Pressão** como nas **Selas** e no **Chassis**.

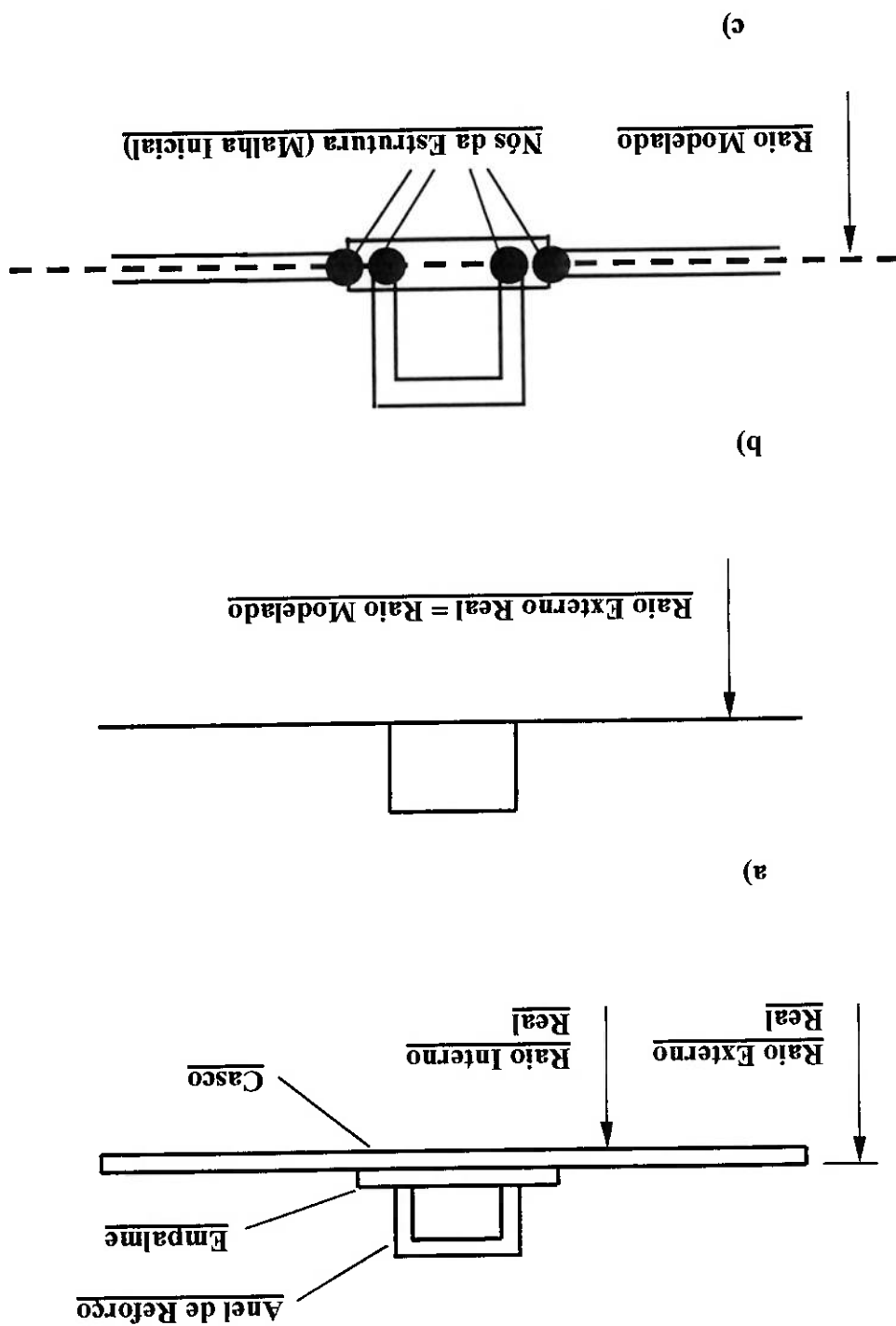
Conclui-se, assim, pela utilização de elementos do tipo **Casca** ("Shell"), que melhor simulam as partes fabricadas em chapa e elementos do tipo **Viga** ("Beam") para simular o comportamento dos **Fixos**, **Feixes de Molas** e **Quadro de Reforço**, localizado na região do **Pino Rei**, conforme observa-se na Tabela 3.2.

O **Elemento Casca** adotado é tridimensional, possui quatro nós, permite obtenção de tensões de membrana e tensões de flexão e apresenta seis graus de liberdade por nó.

O **Elemento Viga** utilizado possui dois nós, seis graus de liberdade, é tridimensional e permite obter tensões devidas a tração, compressão, flexão e torção.

Figura 3.5 - Detalhe do Modelo de Elementos Finitos - Secção Longitudinal do Casco e Anel de Reforço Típicos - Sem Escala

a) Arranjo Real; b) Arranjo Como Desenhado No Programa de Elementos Finitos; c) Arranjo Como Considerado Pelo Programa de Elementos Finitos



Os materiais de construção mecânica utilizados no Equipamento estudado estão descritos, mais pormenorizadamente, no Capítulo 2 e suas propriedades respectivas encontram-se indicadas nas Tabelas 2.3 e 2.4.

Por sua vez, a Tabela 3.3 traz a indicação dos atributos de elementos utilizados no Modelo de Elementos Finitos, resultado dos critérios e simplificações adotadas para construí-lo, em função dos objetivos do Trabalho, características específicas do Equipamento em si, de sua fabricação e condições de operação em campo.

CARACTERÍSTICAS	TIPO DE ELEMENTO	
Elastico, tridimensional, quatro nós, seis graus de liberdade por nó; permite obter tensões de membrana e flexão	Casca ("Shell")	Viga ("Beam")
Elastico, tridimensional, uniaxial, dois nós, seis graus de liberdade por nó; permite obter tensões de tração, compressão, flexão e torção		

**Semi-Reboque Tanque de Elementos Finitos**

**Tabela 3.2 Tipos de Elementos Utilizados no Modelo**

**Tabela 3.3 Atributos dos Elementos Utilizados no Modelo do Semi-Reboque Tanque**

ATRIBUTO	TIPO DE ELEMENTO	SECÇÃO	LOCALIZAÇÃO
Tipo 1	Casca	Esp. 4 mm	Casco, Tampos, Anéis de Reforço
Tipo 2	Casca	Esp. 8 mm	Superposição dos Empalmes e Casco
Tipo 3	Casca	Esp. 6,4 mm	Selas, Pés Traseiros, Longarinas e Travessas Principais, Caixa de Apoio do Pé de Descanso
Tipo 4	Casca	Esp. 15,9 mm	Superposição da Base das Selas e Chapa do Pino Rei
Tipo 5	Casca	Esp. 9,5 mm	Chapa do Pino Rei
Tipo 6	Casca	Esp. 19,2 mm	Superposição das espessuras das Bases das Selas, Calço e Abas da Longarina
Tipo 7	Casca	Esp. 4,8 mm	Travessas Traseiras
Tipo 8	Viga	$I_z = 21,68e-8 m^4$	Feixes de Molas Frontais
Tipo 9	Viga	$I_z = 32,72e-8 m^4$	Feixes de Molas Intermediários
Tipo 10	Viga	$I_z = 18,27 e-8 m^4$	Feixes de Molas Traseiros
Tipo 11	Casca	Esp. 4,8mm	Chapa de Fechamento
Tipo 12	Viga	$I_z = I_x = 8,33e-7 m^4$ $I_y = 2,18e-9 m^4$	Quadro de Reforço
Tipo 13	Viga	$I_x = 11,5e-6 m^4$ $I_y = 9,37e-6 m^4$	Eixos



### 3.2 Cálculo das Propriedades das Vigas Fictícias que Simulam os Feixes de Molas

Para determinação das características das Vigas Fictícias que simulam os Feixes de Molas, a partir do valor da constante de rigidez  $K$  do Feixe de Molas real típico, fornecido pelo fabricante, calculam-se Vigas Fictícias Equivariantes que, respectivamente, têm comportamento idêntico e apresentam a mesma rigidez dos Feixes originais.

Os Feixes de Molas reais são formados por um conjunto de lâminas, montadas solidariamente por meio de um grampo - por isso o nome Feixe - permitindo deflexões na direção vertical, que causam cargas verticais no conjunto da Estrutura. Apresentam um valor da constante de rigidez  $K$ , que os caracteriza com relação à rigidez a deflexões; quanto maior seu valor, mais rígido é o Feixe e menor a deflexão que apresenta na direção vertical (eixo  $Y$ ). Pode-se perceber, mais uma vez, a importância que a deflexão permitida pelos Feixes tem, exercendo grande influência na distribuição de tensões e deformações na Estrutura do Vaso de Pressão.

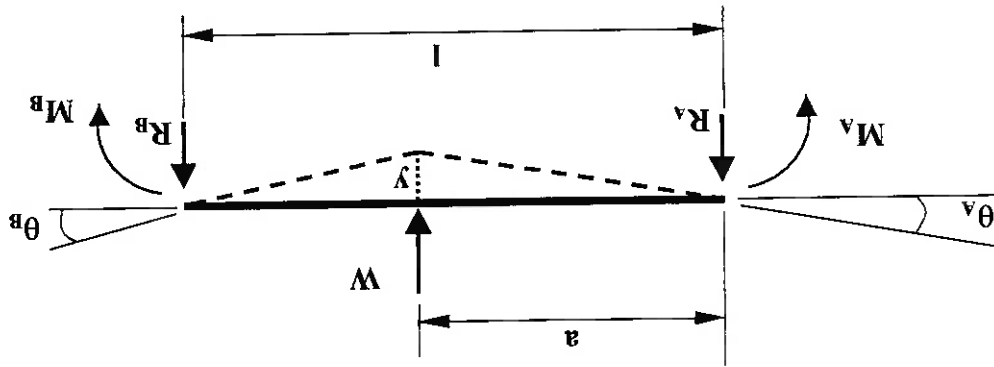
Para simular o efeito descrito, utilizam-se, no Modelo, as denominadas Vigas Fictícias Equivariantes, fazendo-se com que sua rigidez, na direção vertical, seja igual à dos Feixes de Molas respectivos do caso real. As propriedades de rigidez de uma viga sujeita a carga concentrada são função, basicamente, das características geométricas de sua seção transversal e das distâncias entre carga aplicada e apoios. Cabe salientar que, ao incluir no Modelo, somente uma articulação nas junções das Vigas Fictícias com o Chassis, excluindo-se os Balancins, a distância entre apoios das Vigas Fictícias é maior que a dos correspondentes Feixes reais, o que constitui uma das aproximações da modelagem adotada.

Utilizando-se as formulações analíticas para viga sujeita a carga concentrada intermediária de ROARK e YOUNG [41], cuja origem baseia-se na teoria da linha elástica para deflexão de vigas carregadas transversalmente, calculam-se os momentos de inércia equivalentes das Vigas Fictícias, impondo-se que, para cada uma delas, a respectiva rigidez e, consequentemente, a deflexão no local de aplicação da carga é igual à do Feixe real. Os procedimentos descritos são, portanto, utilizados nos cálculos observados a seguir.

**3.2.1 Deflexão para o Caso de Viga Sujeita a Carga Concentrada**

**Intermediária**

O caso geral de viga sujeita a carga concentrada intermediária, conforme ROARK e YOUNG [41], é indicado na Figura 3.6, abaixo:



**Simbologia:**

- $y$  : deflexão em um ponto ao longo da viga;
- $y_A; y_B$  : deflexão nos apoios A e B, respectivamente;
- $\theta_A; \theta_B$  : deslocamento angular nos apoios A e B, respectivamente;
- $M_A; M_B$  : momento fletor nos apoios A e B, respectivamente;
- $R_A; R_B$  : reação de apoio em A e B, respectivamente;
- $x$  : distância do ponto analisado ao apoio A;
- $a$  : distância do ponto de aplicação da carga ao apoio A;
- $l$  : comprimento total da viga;
- $W$  : carga concentrada aplicada;
- $E$  : módulo de elasticidade do material de construção da viga;
- $I$  : momento de inércia de área da secção transversal da viga.

**Figura 3.6 - Arranjo para o Caso Geral de Viga Sujeita a Carga Concentrada**

A deflexão  $y$  em um ponto ao longo da viga, conforme arranjo e simbologia indicados na Figura 3.6, é dada por:

$$y = \gamma^a + \theta^a x + \frac{2EI}{EI} M^a x^2 + \frac{6EI}{EI} R^a x^3 - \frac{6EI}{EI} \langle x-a \rangle^3 \quad (3.1)$$

O valor de  $R^a$  é dado por:

$$R^a = \frac{l}{W} (l-a) \quad (3.2)$$

e o valor de  $\theta^a$  é obtido por:

$$\theta^a = \frac{-6EI}{W} \frac{1}{a} (2l-a)(l-a) \quad (3.3)$$

Nos casos estudados tem-se:

$x = a$ , pois deseja-se calcular a deflexão no ponto de aplicação da carga;  
 $\gamma^a = 0$ , uma vez que a deflexão no apoio é nula;  
 $M^a = 0$ , tratando-se de apoio do tipo articulação.

Fazendo-se as substituições, obtêm-se a particularização:

$$\gamma_{x=a} = a \left[ \frac{-6EI}{W} \frac{1}{a} (2l-a)(l-a) \right] + \frac{6EI}{W} \frac{a^3}{l} (l-a) \quad (3.4)$$

ou seja, a formulação analítica para deflexão em viga sujeita a carga concentrada intermediária, articulada em suas extremidades.

A relação entre carga e deflexão para o regime linear elástico é dada por:

$$F = K y \quad (3.5)$$

onde:

$F$  : carga aplicada;  
 $K$  : constante de rigidez para regime linear elástico;  
 $y$  : deflexão na direção de aplicação da carga.

Como condição de equivalência entre Feixe de Molas real e Viga Ficticia

tem-se:

$$K_{real} = K_{ficticia} \quad (3.6)$$

com:

$K_{real}$  : constante de rigidez, para regime linear elástico, do Feixe de

Molas real;

$K_{ficticia}$  : constante de rigidez, para o regime linear elástico, da Viga Ficticia

Equivalente correspondente.

Sendo que o coeficiente de rigidez do Feixe de Molas real típico, fornecido pelo

fabricante é:

$$K_{real} = 15,52 \times 10^5 \text{ N/m} \quad (3.7)$$

**3.2.2 Cálculo do Momento de Inércia de Área Equivalente ao do Feixe de Molas Intermediário**

A Figura 3.7, abaixo, indica os arranjos do caso real e do Modelo para o Feixe de Molas Intermediário.

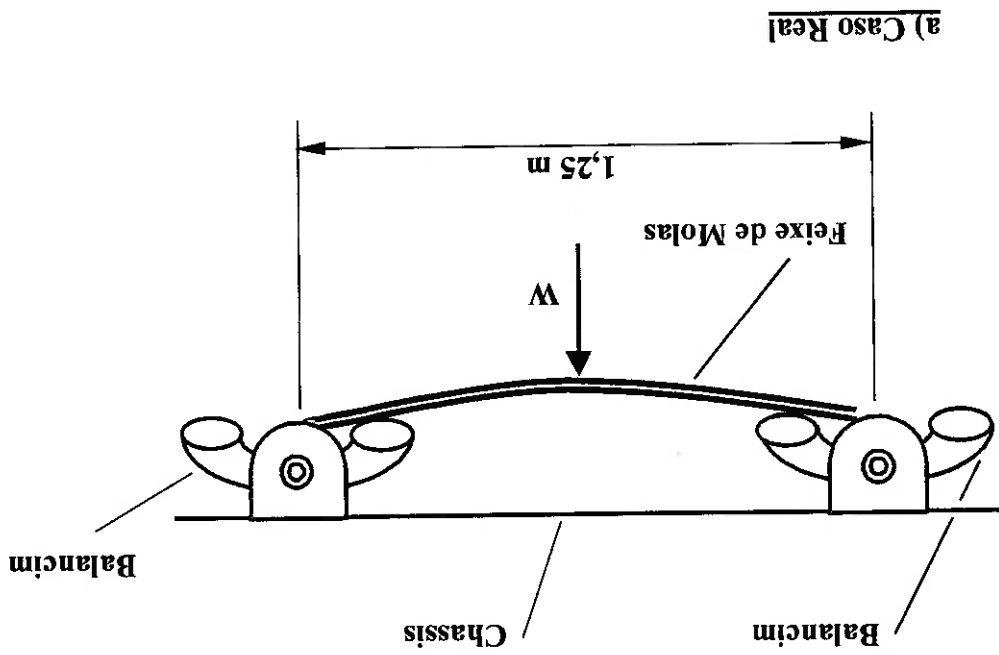


Figura 3.7 - Arranjo para Feixe de Molas Intermediário - Sem Escala -  
a) Caso Real; b) Modelo para Viga Fictícia

sendo a equação (3.4) particularizada para o tipo de condição que se apresenta nos itens estudados:

$$y_{x=a} = a \left[ -\frac{Wa}{6EI} (2l-a)(l-a) \right] + \left[ \frac{a^3}{W} \right] \left[ \frac{6EI}{l} (l-a) \right]$$

e considerando-se que, no item em curso,  $l = a/2$ , recai-se no caso de carga

aplicada no centro da viga, cuja deflexão correspondente é dada por:

$$y_{fictiva} = -\frac{Wl^3}{48EI} \quad (3.8)$$

$$\text{sendo } \frac{K_{fictiva}}{l^3} = \frac{48EI}{l^3} \quad (3.9)$$

Ou seja, a rigidez está relacionada com o momento de inércia da secção transversal da viga, o qual deve ser determinado.

Substituindo-se os valores pertinentes e usando-se da condição de equivalência, dada pela equação (3.6), calcula-se o momento de inércia equivalente da **Viga Fictiva**, para o **Feixe de Molas Intermediário**, com o emprego da relação:

$$\frac{1}{1,25^3 m^3} = \frac{15,52 \times 10^5 N/m^2}{48 \times 1,93 \times 10^{11} N/m^2 \times I_{eq}} \quad (3.10)$$

$$\text{Portanto, } I_{eq} = 32,72 \times 10^{-8} m^4 \quad (3.11)$$

### 3.2.3 Cálculo do Momento de Inércia de Área Equivalente ao do Feixe de

#### Molas Frontal

Indicam-se, na Figura 3.8 abaixo, os arranjos do caso real e do Modelo para o Feixe de Molas Frontal.

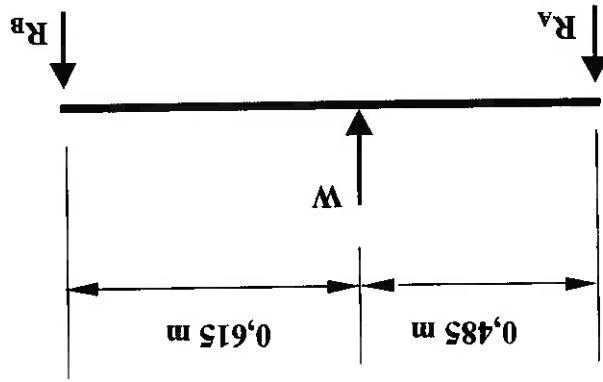
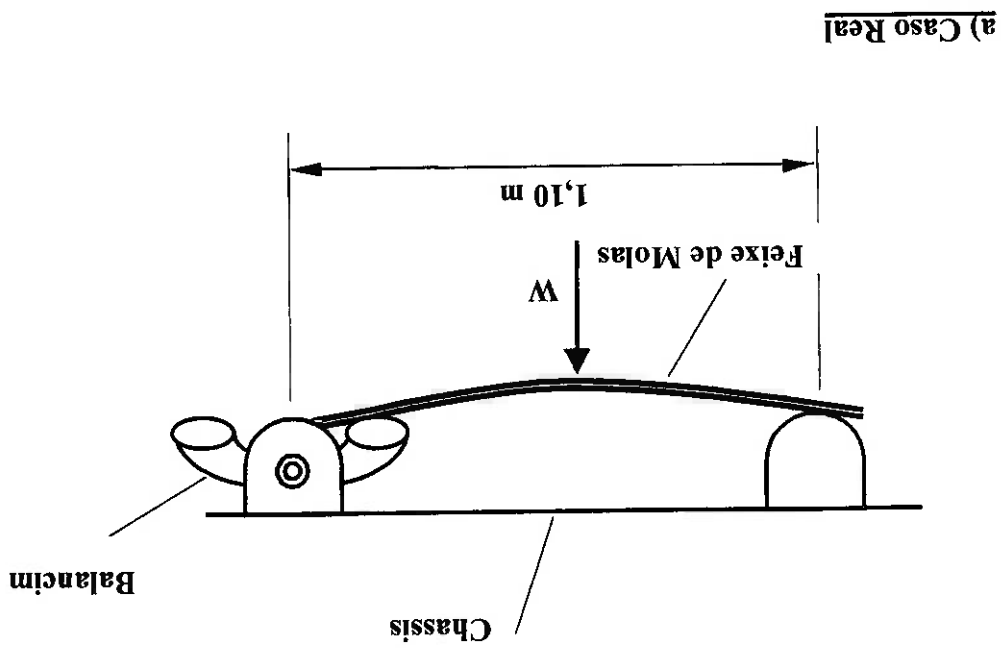


Figura 3.8 - Arranjo para Feixe de Molas Frontal - Sem Escala -  
a) Caso Real; b) Modelo para Viga Fictícia

Tomando-se, novamente, a equação (3.4), particularizada, a partir da condição geral dada por ROARK e YOUNG [41], a deflexão, no ponto de aplicação da carga, conforme indicado na Figura 3.8, é dada por:

$$y_{x=a} = a \left[ \frac{-Wa}{6EI} (2l-a)(l-a) \right] + \frac{a^3}{6EI} \left[ \frac{1}{W} (l-a) \right]$$

Para  $x = 0,485$  m, fazendo-se as substituições obtêm-se:

$$y_{x=0,485} = \frac{-0,16176W}{6EI} \quad (3.12)$$

com:

$$\frac{K_{ficticia}}{1} = \frac{6EI}{0,16176} \quad (3.13)$$

$$\text{Sendo: } \frac{K_{real}}{1} = \frac{15,52 \times 10^5 N}{1} \quad (3.14)$$

e a condição de equivalência dada pela equação (3.6) :

$$K_{real} = K_{ficticia}, \text{ tem-se:}$$

$$\frac{15,52 \times 10^5}{1} = \frac{6EI_{eqn}}{0,16176} \quad (3.15)$$

Efetuando-se os cálculos, obtêm-se o momento de inércia equivalente da Viga

Ficticia para o Feixe de Molas Frontal:

$$I_{eqn} = 21,68 \times 10^{-8} \text{ m}^4 \quad (3.16)$$

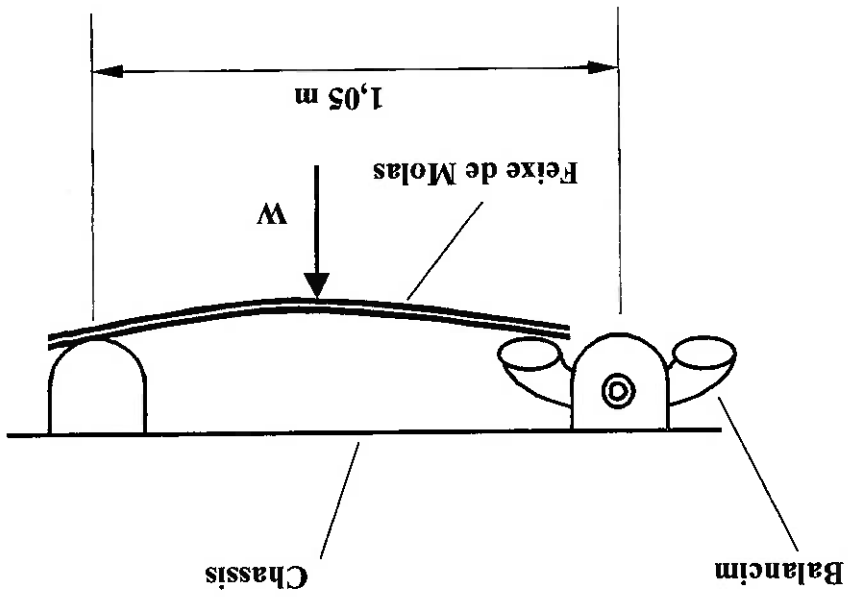


### 3.2.4 Cálculo do Momento de Inércia de Área Equivalente ao do Feixe de

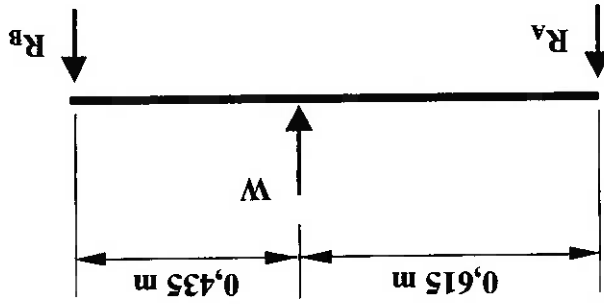
#### Molas Traseiro

Constam da Figura 3.9, abaixo, os arranjos do caso real e do Modelo para o

Feixe de Molas Traseiro.



a) Caso Real



b) Modelo para Viga Fictícia

Figura 3.9 - Arranjo para Feixe de Molas Traseiro - Sem Escala -  
a) Caso Real; b) Modelo para Viga Fictícia

A partir da equação (3.4) já utilizada, fazendo-se as substituições, conforme croquis da Figura anterior, obtêm-se

$$y_{x=0,435} = \frac{-0,13632 W}{6EI} \quad (3.17)$$

onde

$$\frac{K_{ficticia}}{1} = \frac{6EI}{0,13632} \quad (3.18)$$

Sendo a condição de equivalência, dada pela equação (3.6):

$$K_{real} = K_{ficticia}, \text{ faz-se}$$

$$\frac{15,52 \times 10^5 N/m}{1} = \frac{6 \times 1,93 \times 10^{11} N/m^2 \times I_{eq}}{0,13632 m^3} \quad (3.19)$$

obtendo-se o momento de inércia equivalente da Viga Ficticia para o Feixe de

Molas Traseiro, cujo valor é:

$$I_{eq} = 18,27 \times 10^{-8} m^4 \quad (3.20)$$

### 3.3 Condições de Carregamento e de Contorno

São consideradas, para análise, nove situações estáticas, que combinam condições de contorno e de carregamento e incluem a representação, em repouso, na horizontal, tanto do Equipamento carregado como vazio, e em condições instantâneas, específicas da solicitação dinâmica, adotadas como típicas da sua utilização em campo. Dentre estas nove situações, encontram-se duas que, além dos esforços de flexão e torção introduzidos pela liberação de Apoios, consideram os efeitos de desaceleração do Conjunto, simulando uma frenagem durante seu deslocamento linear no plano.

O carregamento dinâmico atuante na Estrutura, induzido pelo contato Pneu-via traseira, quando o Equipamento **Semi-Reboque Tanque** encontra-se em movimento, atrelado a veículo de tração, tem frequência dependente da velocidade com que se desloca. Conforme GILLESPIE [28] para um veículo movimentando-se com velocidade média de 80 km/h, em uma rodovia, tem-se que a aceleração vertical, imposta pelo contato Pneu-via traseira, ou seja, representando a ação do carregamento externo, pode ser indicada por uma função densidade espectral de potência, que tem magnitude crescente com o aumento da frequência. Os maiores valores da densidade espectral são obtidos para frequências superiores a 10 Hz, sendo sua magnitude, nesta faixa, cerca de dez vezes maior que a obtida para frequências da ordem de 3 Hz.

O mesmo autor em referência afirma que a frequência natural de vibração, como um corpo rígido, na direção vertical (eixo Y do Modelo), para veículos pesados, tem magnitude da ordem de 2,5 Hz. Dessa forma, é de se esperar que haja pequena amplificação dinâmica do carregamento pois, para frequências próximas à natural, a energia associada ao carregamento externo é reduzida, enquanto que, para frequências superiores à natural, deve ocorrer restrição amplificação dinâmica, tal como usualmente observado para um sistema massa-mola-amortecedor.

A discussão acima apresentada indica que os efeitos da inércia da Estrutura, sobre seu comportamento dinâmico, são pequenos, fundamentando a aproximação feita neste Estudo, onde considera-se o problema dinâmico como uma sequência de situações estáticas – combinações de condições de carregamento e de contorno – representativa da solicitação real e que se repete ao longo da vida operacional do Equipamento.

No Caso 2 considera-se somente o carregamento devido ao peso próprio, obtido pela ação da aceleração da gravidade sobre a massa dos componentes estruturais do

Equipamento.

Para os Casos 1, 3, 4, 5, 6 e 7 descritos a seguir, além do efeito acima mencionado, é imposto um carregamento estático que corresponde à pressão hidrostática, função da altura do líquido contido no **Vaso de Pressão**.

Dessa forma, a altura do fluido armazenado é responsável pelo surgimento de um gradiente de pressão interna que é aplicado ao longo do eixo Y do **Modelo**, em seu trecho correspondente ao diâmetro do **Casco**. Como é sabido, a pressão hidrostática atua em todas as direções do meio fluido, variando linearmente com a altura da coluna de líquido. Por conseguinte, o gradiente que a representa impõe uma variação de pressão linear de  $P_{min}$  a  $P_{max}$ , em função da altura de líquido ao longo da coordenada Y, que age sobre a superfície interna do **Casco**, incluindo os **Tampos Torisféricos**.

Na Figura 3.10 observam-se o Sistema de Coordenadas Global do **Modelo** e o gradiente de pressão que é aplicado em todas as direções, na superfície interna do **Vaso**

**de Pressão**.

O produto transportado, para o caso em questão, é hidróxido de sódio, também conhecido como soda cáustica, diluído em água a 50%, que apresenta densidade de massa de 1500 kg/m<sup>3</sup>. Considera-se, como aproximação, o preenchimento completo do **Vaso** (100%) uma vez que o transporte deste tipo de produto se dá com a ocupação de 97 a 99 % de sua capacidade máxima.

O gradiente de pressão hidrostática é dado por:

$$P = \rho g h \quad (3.21)$$

onde:

$\rho$  : densidade de massa;

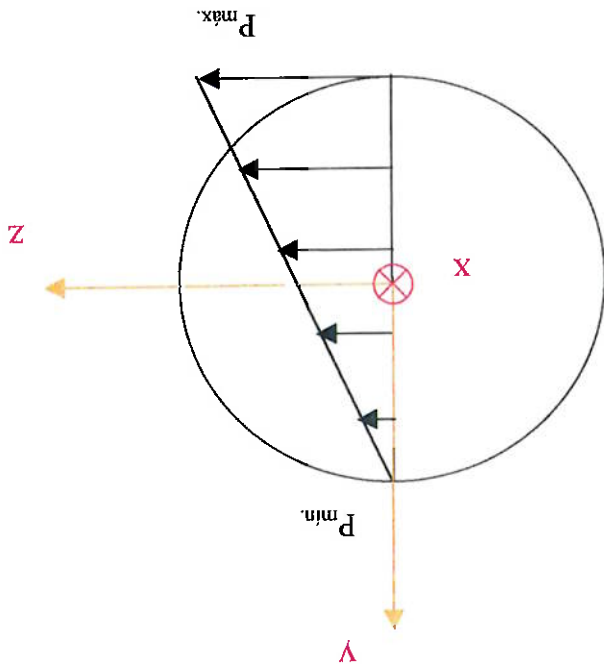
$g$  : aceleração da gravidade (9,81 m/s<sup>2</sup>);

$h$  : altura de líquido.

Figura 3.10 - Seção Transversal do Vaso de Pressão - Detalhe

do Gradiente de Pressão Hidrostática e do Sistema

de Coordenadas Global do Modelo



sendo o diâmetro considerado do Casco cilíndrico horizontal de 1,578 m, fazendo-se as substituições, tem-se, para a pressão máxima no fundo do Vaso:

$$P_{máx.} = 1500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 1,578 \text{ m} \quad (3.22)$$

$$P_{máx.} = 23220,27 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad (3.23)$$

Pode-se, portanto, concluir que o gradiente de pressão, originado pela pressão hidrostática do líquido contido no Vaso, tem como valores limites:

$P_{mín.} = 0$ , que surge na parte superior da superfície interna do Casco;

$P_{máx.} = 23220,27 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ , aplicada na parte mais inferior da superfície interna do

Casco.

O carregamento de pressão na superfície interna do **Vaso de Pressão** é aplicado como pressão atuante na superfície dos elementos que compõem o **Modelo**, ou seja, pressão superficial.

Para as condições de carregamento e de contorno relativas à situação de frenagem, com o Conjunto deslocando-se em plano horizontal, representadas pelos Casos 8 e 9, utiliza-se a abordagem de RANGANATHAN e YANG [40] e conceitos de Mecânica dos Fluidos, para determinar as condições de um gradiente equivalente, aqui denominado gradiente composto de pressão.

Assim como para os Casos descritos anteriormente, que consideram o veículo parado, o gradiente de pressão atua na direção da aceleração que lhe dá origem, ou seja, a aceleração da gravidade, nos Casos 8 e 9, envolvendo a simulação de frenagem, o gradiente de pressão composto também atua na direção da aceleração que o causa, a qual, nesta situação, é a aceleração resultante da soma vetorial entre a aceleração da gravidade  $g$  e desaceleração imposta ao veículo (aceleração de frenagem  $a_f$ ), ambas agindo sobre o sistema Equipamento-líquido transportado.

Na situação de frenagem, portanto, o fluido contido no **Vaso de Pressão** e, subseqüentemente, a parede interna deste último, ficam sujeitos ao chamado gradiente composto de pressão.

Do ponto de vista estrutural, além da pressão devida ao gradiente composto, exercida pelo líquido na parede interna do **Vaso**, considera-se também a combinação das mesmas acelerações da gravidade e de frenagem atuando sobre a massa dos componentes estruturais; estas duas acelerações são, portanto aplicadas, no **Modelo**, às massas de seus elementos constitutivos.

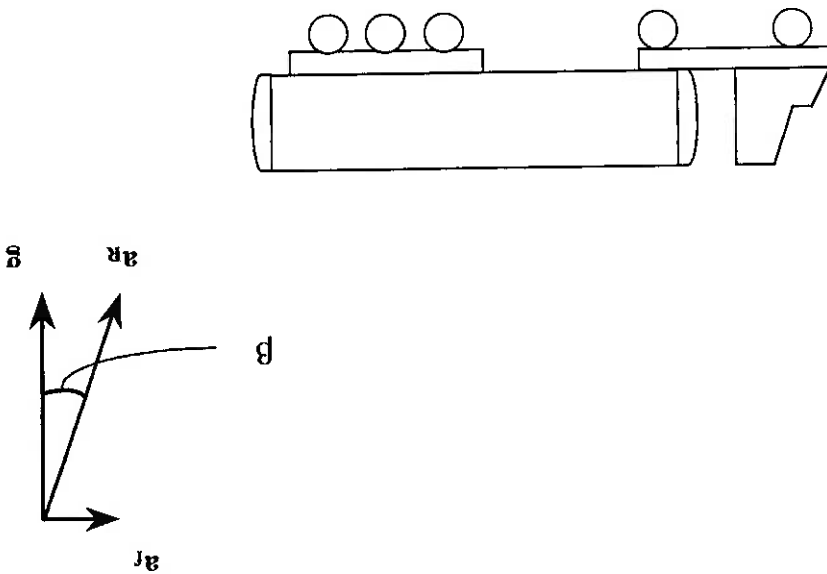
Na Figura 3.11, mostrada a seguir, observam-se, esquematicamente, as acelerações atuantes sobre a Estrutura e sobre a massa fluida durante a frenagem. Com base no esquema indicado na Figura 3.11, considerando-se uma desaceleração  $a_f = 3,70 \text{ m/s}^2$  juntamente com a aceleração da gravidade  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ , obtêm-se a aceleração resultante  $a_R = 10,48 \text{ m/s}^2$ , cuja linha de ação faz um ângulo com a vertical  $\beta = 20,60^\circ$ .

A aceleração de frenagem  $a_f$ , imposta à Estrutura, equivale a aproximadamente 0,37 g e diz respeito à condição adotada de frenagem, que representa a redução da velocidade de translação do Conjunto de 90 km/h para 20 km/h, percorrendo uma distância de 80 m.

Com relação ao gradiente composto, a variação de pressão, exercida pelo líquido, sobre a parede interna do Vaso de Pressão, ocorre ao longo da linha de ação da aceleração resultante  $a_R$ , desde um ponto de mínima pressão  $P_{r_{min}} = 0$ , localizado na parte superior do abaulamento do Tampo Traseiro até um ponto de pressão máxima  $P_{r_{max}}$ , localizado na região inferior do abaulamento do Tampo Frontal, sendo que a

**Figura 3.11 - Acelerações Atuantes Durante Frenagem**

**Legenda:**  
 $a_f$  : aceleração de frenagem;  
 $g$  : aceleração da gravidade;  
 $a_R$  : aceleração resultante;  
 $\beta$  : ângulo entre a direção da aceleração resultante e a vertical.



magnitude de aceleração resultante  $a_R = 10,48 \text{ m/s}^2$  atua sobre a densidade de massa  $\rho$

da solução de soda cáustica.

A aplicação, no Modelo, do gradiente em pauta é feita, como ilustra a Figura 3.12, através de um Sistema Local de Coordenadas, criado especificamente para esse fim, cuja direção de seu eixo S coincide com aquela ao longo da qual atua o gradiente composto.

Faz-se a determinação dos pontos do Equipamento sujeitos ao gradiente de pressão na frenagem, com pressões  $P_{f \text{ máx.}}$  e  $P_{f \text{ mín.}}$ , também com o uso do Sistema Local de Coordenadas. Estes pontos são aqueles pertencentes ao Casco, que apresentam, respectivamente, maior e menor valor da coordenada correspondente ao eixo S do citado Sistema, cuja direção coincide com a da aceleração resultante  $a_R$ , como observa-se na Figura 3.12. A partir de tais coordenadas, calcula-se a distância  $d$  entre os pontos de  $P_{f \text{ máx.}}$  e  $P_{f \text{ mín.}}$ , ao longo da linha de ação do gradiente composto, que é de 4,66 m.

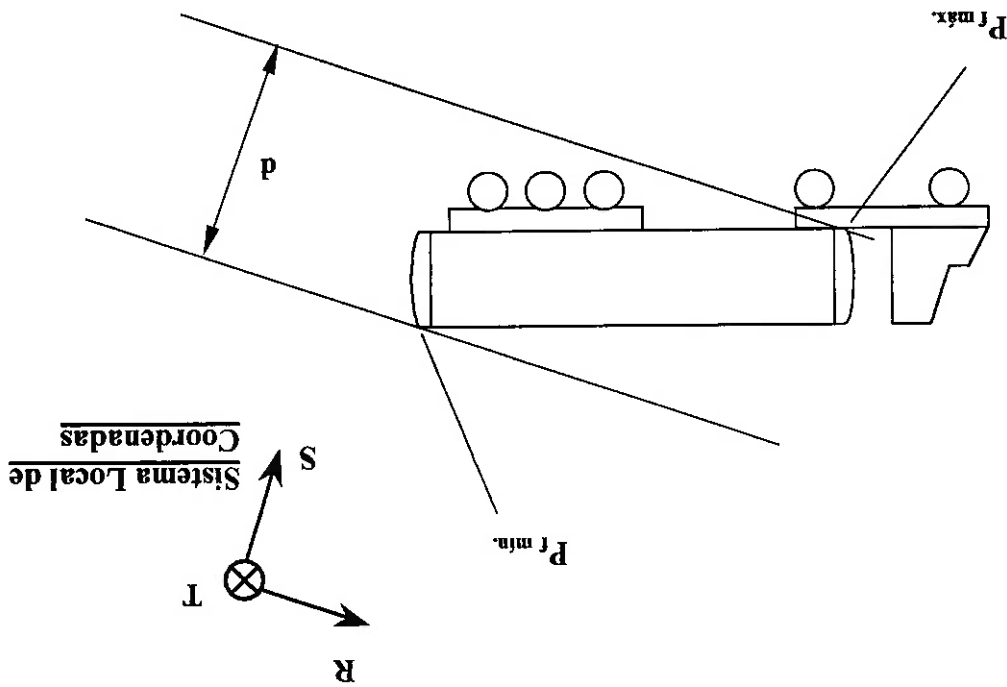


Figura 3.12 - Sistema Local de Coordenadas (R,S,T) para Simulação de Frenagem no Modelo



Analogamente à situação anterior, onde o gradiente de pressão hidrostática ocorre ao longo do eixo Y do Sistema Global, como indicado na Figura 3.10, tem-se aqui, para a pressão devida ao gradiente composto, durante a frenagem, atuando ao longo do eixo S do Sistema de Coordenadas Local:

$$P_f = \rho a_R d \quad (3.24)$$

onde:

$\rho$  : densidade de massa;

$a_R$  : aceleração resultante;

$d$  : distância, no meio fluido, na direção do eixo S.

Fazendo-se as substituições, tem-se:

$$P_f^{max} = 1500 \text{ kg/m}^3 \times 10,48 \text{ m/s}^2 \times 4,66 \text{ m} \quad (3.25)$$

$$P_f^{max} = 73255,20 \text{ N/m}^2 \quad (3.26)$$

Assim, conclui-se que, ao ser submetido à frenagem, com desaceleração de magnitude  $a_R = 3,70 \text{ m/s}^2$ , o Equipamento sujeita-se a um gradiente de pressão hidrostática do líquido no interior do Vaso, cujos limites são

$P_f^{min} = 0$ , atuando em um ponto da Linha de Centro longitudinal do Conjunto,

na parte superior do abaulamento do **Tampo Traseiro**;

$P_f^{max} = 73255,20 \text{ N/m}^2$ , atuando em um ponto da Linha de Centro

Longitudinal do Conjunto, na parte inferior do abaulamento do **Tampo Frontal**.

### 3.4 Caracterização dos Casos Envolvendo Condições de Carregamento

#### de Contorno

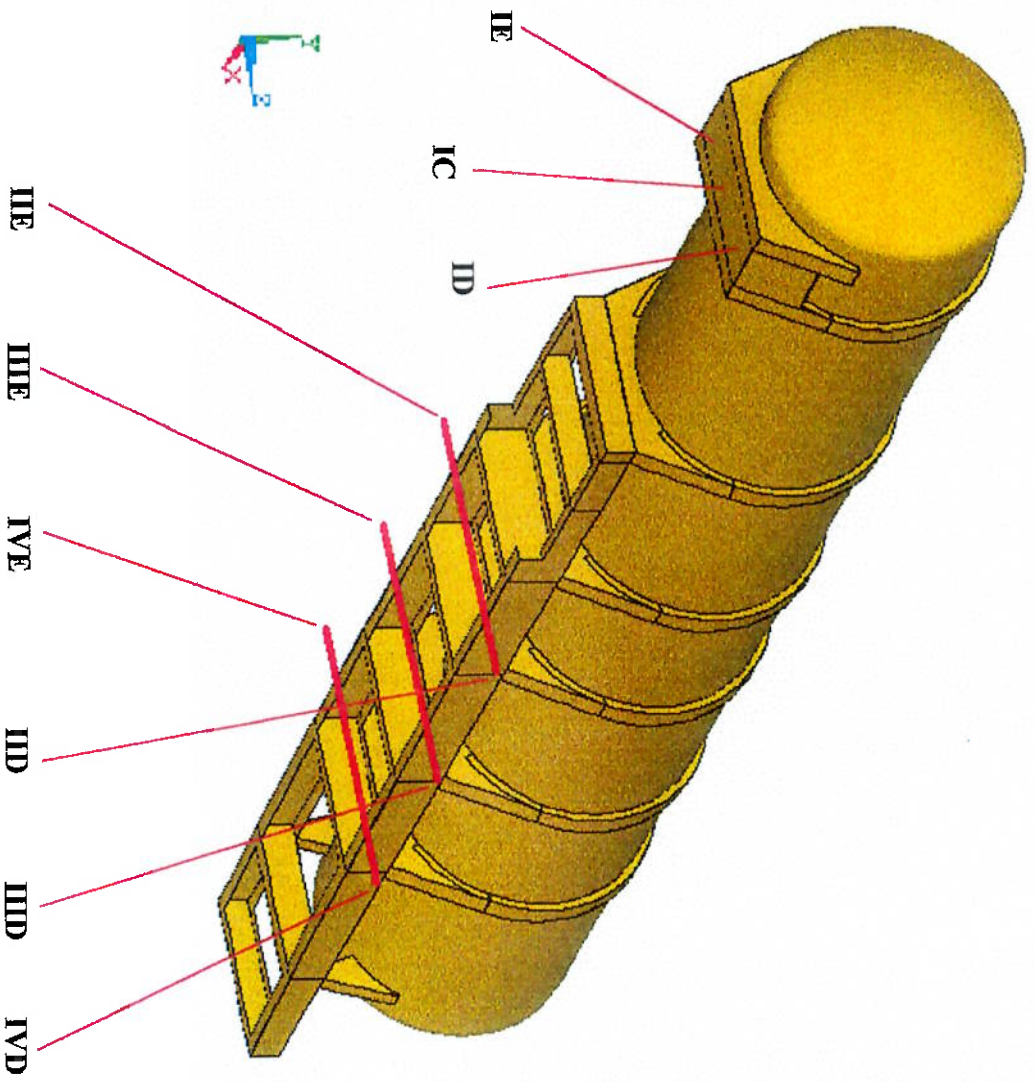
Recomenda-se ao leitor que, para a perfeita compreensão da abordagem das condições de contorno, utilize, juntamente com o texto que se segue, a Figura 3.13 e a Tabela 3.4, mostradas a seguir.

O **Vaso de Pressão Autoportante** com funções de **Semi-Reboque Tanque** apoia-se, na sua parte frontal, sobre a Quinta Roda do cavalo-mecânico, através da **Chapa do Pino Rei**, sendo o engate propriamente dito, feito pelo **Pino Rei**. Na região traseira, apoia-se no solo por meio de Pneus e Rodas, montados em **Eixos** que, por sua vez, são fixos à **Suspensão**, composta, basicamente, por **Feixes de Molas**.

Trata-se de uma Estrutura hiperestática sobre apoios flexíveis (**Feixes de Molas + Rodas + Pneus**) que é submetida à ação do carregamento devido à quantidade de líquido transportado mais peso próprio. A solicitação real imposta ao Equipamento resulta dos efeitos combinados da citada carga com as imperfeições do terreno, denominadas perfil da via, da velocidade de deslocamento do Conjunto e de acelerações nas direções X, Y e Z.

No **Modelo de Elementos Finitos**, tem-se três pontos de Apoio na região da **Chapa do Pino Rei** - ID, IC e IE - e, na região da **Suspensão**, seis Apoios, um em cada uma das pontas dos **Eixos** que a compõem - IID, IIE, IIID, IIIE, IVD, IVE. A localização dos Apoios é mostrada na Figura 3.13 e as restrições impostas a eles, para cada Caso estudado, constam da Tabela 3.4.

Os Casos abordados neste Estudo combinam, portanto, condições de carregamento e de contorno, e são descritos conforme segue.



**Figura 3.13 - Codificação dos Apoios do Modelo de Elementos Finitos**

**Tabela 3.4 - Configuração das Restrições de Deslocamento nos Apoios Estruturais**

CASO	APOIO ID	APOIO IC	APOIO IE	APOIO IID	APOIO IIE	APOIO IIID	APOIO IIIE	APOIO IVD	APOIO IVE
1	RY	RX; RY	RY	RY	RY	RY	RY	RY; RZ	RY; RZ
2	RY	RX; RY	RY	RY	RY	RY	RY	RY; RZ	RY; RZ
3	RY	RX; RY	RY			RY	RY	RY; RZ	RY; RZ
4	RY	RX; RY	RY	RY	RY			RY; RZ	RY; RZ
5	RY	RX; RY	RY	RY	RY	RY	RY	RZ	RZ
6	RY	RX; RY	RY	RY				RY; RZ	RY; RZ
7		RX; RY	RY	RY	RY	RY		RZ	RZ
8	RY	RX; RY	RY	RY	RY	RY	RY	RZ	RZ
9		RX; RY	RY	RY	RY	RY		RZ	RZ

**LEGENDA:**

- RX** - Restrição ao Deslocamento na Direção X (Lingitudinal);
- RY** - Restrição ao Deslocamento na Direção Y (Vertical);
- RZ** - Restrição ao Deslocamento na Direção Z (Transversal);
- ID** - Apoio Direito da Chapa do Pino Rei;
- IC** - Apoio do Pino Rei;
- IE** - Apoio Esquerdo da Chapa do Pino Rei;
- IID** - Apoio da Ponta Direita do Eixo Frontal;
- IIE** - Apoio da Ponta Esquerda do Eixo Frontal;
- IIID** - Apoio da Ponta Direita do Eixo Intermediário;
- IIIE** - Apoio da Ponta Esquerda do Eixo Intermediário;
- IVD** - Apoio da Ponta Direita do Eixo Traseiro;
- IVE** - Apoio da Ponta Esquerda do Eixo Traseiro.

Este Caso 1 aborda uma condição estática, com o Equipamento carregado na sua condição de projeto, estacionado em local plano, com todos os Pneus em contato com o solo, com a **Chapa do Pino Rei e Pino Rei** apoiados na Quinta Roda do cavalo mecânico.

O carregamento deve-se à pressão hidrostática, exercida pela altura do líquido contido no **Vaso**, cujo gradiente atua na direção da aceleração da gravidade.

Como condição de contorno tem-se: três restrições verticais na Linha de Centro transversal (direção Z) da **Chapa do Pino Rei** - Apoios ID, IC e IE - , sendo IC situado no próprio **Pino Rei** e os outros dois, ID e IE, respectivamente, à direita e à esquerda da Linha de Centro longitudinal do Conjunto (direção X), equidistantes de IC; uma restrição horizontal longitudinal (direção X) em IC; uma restrição vertical em cada ponta dos **Eixos** - IID, IIE, IIID, IIIE, IVD e IVE - e uma restrição horizontal em Z (direção transversal) em cada ponta dos **Eixos Traseiros** - Apoios IVD e IVE.

### 3.4.2 Caso 2

Neste Caso, simula-se o Equipamento parado, na horizontal, em local plano, submetido a esforços devidos somente ao peso próprio do Conjunto, sem levar em conta qualquer tipo de carga transportada, com todos os Pneus apoiados no solo e com a **Chapa do Pino Rei** e o próprio **Pino Rei** apoiados sobre a Quinta Roda do cavalo mecânico.

A condição de contorno prevê a mesma vinculação do Caso anterior, qual seja: três restrições verticais na Linha de Centro transversal (direção Z) da **Chapa do Pino Rei** - Apoios ID, IC e IE - , sendo que IC está situado no **Pino Rei** e os outros dois, ID e IE, respectivamente, à direita e à esquerda da Linha de Centro longitudinal do Equipamento (direção X), equidistantes de IC; uma restrição vertical em cada ponta dos

No Caso 4 repete-se a condição de cálculo com o Equipamento na horizontal, considerando-se a liberação dos Apoios relativos aos nós das pontas do Eixo Intermediário da Suspensão, também simulando a passagem do Equipamento por uma depressão do piso. O carregamento imposto permanece como aquele devido à pressão hidrostática que varia com a altura do líquido contido no Vaso.

#### 3.4.4 Caso 4

O Caso 3 diz respeito ao Equipamento carregado, posicionado horizontalmente, havendo a liberação dos Apoios localizados nas pontas do Eixo Frontal da Suspensão, simulando o Equipamento ao transpor uma depressão da via. O carregamento externo é mantido como sendo devido à pressão imposta pela altura do líquido contido no Vaso, atuando na direção da aceleração da gravidade. Como vinculações que formam a condição de contorno, têm-se três restrições verticais na Linha de Centro transversal (direção Z) da Chapa do Pino Rei: uma no Apoio IC, localizado no Pino Rei, duas outras nos Apoios ID e IC, situados respectiva e equidistantemente à direita e à esquerda de IC; uma restrição horizontal em X (direção longitudinal) também no Apoio IC; uma restrição vertical nas pontas dos Eixos Intermediário e Traseiro da Suspensão - IID, IIE, IVD e IVE - e uma restrição horizontal em Z (direção transversal) em cada uma das pontas do Eixo Traseiro, Apoios IVD e IVE.

#### 3.4.3 Caso 3

Eixos - IID, IIE, IIE, IIE, IIE, IIE, IIE, IIE - e uma restrição horizontal em Z (direção transversal) em cada ponta dos Eixos Traseiros - Apoios IVD e IVE.

A condição de contorno que simula tal situação inclui: três vínculos com restrições verticais na Linha de Centro transversal (direção Z) da **Chapa do Pino Rei**; no Apoio IC, localizado no **Pino Rei** e nos Apoios ID e IE, localizados equidistantemente de IC, correspondentemente à sua direita e à sua esquerda; uma restrição horizontal em X (direção longitudinal) no Apoio IC; uma restrição vertical em cada uma das pontas dos **Eixos Frontal e Traseiro da Suspensão**, Apoios IID, IIE, IVD e IVE, e uma restrição horizontal em Z (direção transversal) nas duas pontas do **Eixo Traseiro**, Apoios IVD e IVE.

Salienta-se que as pontas do **Eixo Intermediário** estão livres de seus respectivos Apoios ao solo, de ambos os lados do **Chassis**.

### 3.4.5 Caso 5

Este Caso trata do cálculo considerando o Equipamento na horizontal, com a liberação, na direção vertical, dos Apoios dos nós das pontas do **Eixo Traseiro**, simulando a perda de aderência do Conjunto ao passar por um buraco na pista.

O carregamento imposto ao **Modelo** é dado pela pressão hidrostática devida à altura do líquido contido no **Vaso**, cujo gradiente atua no eixo Y.

Quanto às condições de contorno, têm-se: três vínculos com restrição vertical de deslocamento, na Linha de Centro transversal (direção Z) da **Chapa do Pino Rei**; um central, Apoio IC, localizado no **Pino Rei** e outros dois, Apoios ID e IE, respectivamente à sua direita e à sua esquerda; uma restrição horizontal longitudinal (direção X) também no Apoio IC; uma restrição vertical em cada um dos Apoios IID, IIE, IID e IIE, localizados nas pontas dos **Eixos Frontal e Intermediário** e uma restrição horizontal na direção transversal (eixo Z) nas duas pontas do **Eixo Traseiro**, Apoios IVD e IVE.

Reiteradamente, no que tange à vinculação, os pontos de Apoio do **Eixo Traseiro**, IVD e IVE, estão livres na direção vertical, simulando a falta de contato com o solo dos Pneus do **Eixo Traseiro do Semi-Reboque Tanque**.

### 3.4.6 Caso 6

Nos Casos 6 e 7, impõe-se a presença de esforços devidos à torção, considerando o Equipamento na horizontal, carregado na sua condição de projeto.

Especificamente no Caso 6, a torção é imposta com a liberação dos Apoios IIE, IIIE e IIID, que correspondem, respectivamente, às pontas esquerda do **Eixo Dianteiro**, esquerda e direita do **Eixo Intermediário**. Esta condição de contorno corresponde à passagem do Equipamento sobre uma depressão com formato em “L”, o que levaria à perda de aderência das Rodas frontal e intermediária esquerdas e da Roda intermediária direita do Equipamento.

Prevalece, como carregamento, aquele devido à pressão hidrostática que tem origem na altura do líquido contido no **Vaso**, cujo gradiente atua na direção da aceleração da gravidade.

Assim, a condição de contorno prevê vínculos com: uma restrição vertical (direção Y) e uma restrição horizontal em X (direção longitudinal) no **Pino Rei**, Apoio IC; uma restrição vertical em cada um dos Apoios ID e IE, localizados na **Chapa do Pino Rei**, alinhados à direita e à esquerda de IC; uma restrição vertical em Y e uma restrição horizontal em Z nos Apoios IVD e IVE, nas pontas do **Eixo Traseiro** e uma restrição vertical em Y na ponta direita do **Eixo Frontal**.

### 3.4.7 Caso 7

A condição retratada neste Caso diz respeito à sollicitação gerada pela carga de líquido no interior do **Vaso**, associada a esforços adicionais de torção, introduzidos na Estrutura através da liberação das pontas do **Eixo Traseiro** mais a liberação da ponta esquerda do **Eixo Intermediário**, que simula o instante o instante da passagem do Conjunto sobre uma depressão em forma de “L”, com a perda de aderência das Rodas correspondentes aos Apoios liberados, como descrito.



O Caso 9 tem as mesmas condições de contorno do Caso 7, apresentando um gradiente de pressão hidrostática, como no Caso anterior, relativo à composição das acelerações da gravidade mais a desaceleração do Conjunto, quando sujeito a frenagem durante seu deslocamento em linha reta para a frente.

### 3.4.9 Caso 9

Este Caso é idêntico ao Caso 5 quanto às condições de contorno, porém, no tocante às condições de carregamento, sujeita-se o Equipamento, a um gradiente composto de pressão hidrostática, simulando o carregamento do líquido sobre as paredes do Vaso, na situação em que o Conjunto **Semi-ReboqueTanque** sofre uma desaceleração na sua direção longitudinal, ou seja, uma frenagem durante deslocamento em linha reta para a frente. Tal gradiente, denominado composto, é devido à uma aceleração resultante, cujas componentes são a aceleração da gravidade e a aceleração de frenagem (desaceleração), sendo que o seu cálculo encontra-se detalhadamente exposto no item 3.3.

### 3.4.8 Caso 8

O carregamento prevê a atuação de pressão hidrostática na parede interna do Vaso, devida à altura do líquido em seu interior.

Os vínculos da condição de contorno prevêem: uma restrição vertical (direção Y) e uma restrição horizontal em X (direção longitudinal) no **Pino Rei**, Apoio IC; uma restrição vertical no Apoio IE, alinhado à esquerda do **Pino Rei**, situado na **Chapa** do mesmo nome; uma restrição vertical em cada uma das extremidades do **Fixo Frontal**, Apoios IID e IIE; uma restrição vertical na extremidade direita do **Fixo Intermediário**, Apoio IIID e uma restrição horizontal transversal (eixo Z) em ambas as pontas do **Fixo Traseiro**, Apoios IVD e IVE.

## Capítulo 4

### Aferição do Modelo de Elementos Finitos

#### 4.1 Generalidades sobre o Procedimento de Aferição

Ao utilizar o Método dos Elementos Finitos, para que se conheça o nível de precisão proporcionado pelo **Modelo** elaborado, é recomendável que se faça sua aferição.

O termo precisão aqui, define-se como o grau de convergência, do valor de tensão obtido pelo Método dos Elementos Finitos, em relação àquele calculado pela formulação analítica para um problema estrutural similar ao do caso em estudo.

Assim, o valor numérico indicador da denominada precisão é dado a partir do cálculo de um desvio, expresso em porcentagem, como pode ser observado no desenvolvimento que se segue.

Em regra, a malha de elementos finitos empregada apresenta resultados numéricos tão mais próximos dos obtidos analiticamente quanto maior for o seu grau de refinamento, ou seja, quanto menor for o tamanho dos elementos empregados e consequentemente maior a densidade com que estes se distribuem em uma determinada região da estrutura analisada.

À medida que aumenta-se, progressivamente, o grau de refinamento da malha, tem-se uma convergência dos resultados obtidos pelo Método dos Elementos Finitos, cujos valores tendem a aproximar-se daqueles obtidos analiticamente.

No estudo da falha por fadiga do **Vaso de Pressão Autoprotante** operando como **Semi-Reboque Tanque**, opta-se pela utilização do Método dos Elementos Finitos para a análise de tensões, justamente por não ser possível a utilização de formulação de analítica ou empírica que permita, diretamente, o cálculo para obter-se a distribuição de tensões na Estrutura. Dessa forma, a aferição do **Modelo** deve ser feita ou por refinamentos progressivos da malha, até o ponto em que haja reduzida variação no

campo de tensões, obtido por dois graus de refinamento sucessivos, ou pelo emprego de um **Modelo Auxiliar**, que represente problema estrutural análogo ao estudado, porém com solução analítica conhecida, de forma a permitir a comparação entre os resultados numéricos e analíticos, sendo que a magnitude da diferença entre os mesmos é utilizada como indicador da necessidade de empregar-se uma malha mais refinada.

#### 4.2 Formulação Analítica

O Modelo de Elementos Finitos para o **Semi-Reboque Tanque**, destinado fundamentalmente ao estudo de fadiga, na região sobre o **Carro da Suspensão**, representa uma Estrutura de casca sobre a qual são fixados **Anéis de Reforço**.

Considerando-se primordial neste Estudo a determinação do campo de tensões no **Vaso de Pressão**, na região onde localizam-se os **Anéis de Reforço**, procura-se definir a precisão com que estas tensões são obtidas nas áreas do **Casco** próximas daqueles detalhes estruturais. Para tanto, opta-se pela execução de um **Modelo Auxiliar** de Elementos Finitos, o qual representa uma casca cilíndrica, sem tampos, reforçada com um anel circunferencial externo e submetida à ação de pressão interna uniforme. A distribuição de tensões no **Modelo Auxiliar** representa um problema estrutural similar ao da Estrutura real estudada e também pode ser obtida analiticamente, com o emprego da solução proposta por TIMOSHENKO e WOINOWSKI-KRIEGER [53] e ROARK e YOUNG [41], considerando o campo de tensões em uma casca cilíndrica submetida à ação de pressão interna e de carga radial circunferencial, como indicado na Figura 4.1.

Fazendo uso das propriedades de simetria geométrica e de carregamento da formulação analítica, o **Modelo Auxiliar** elaborado representa 1/8 de uma casca cilíndrica sem tampos, submetida à pressão interna de magnitude 0,1 MPa, de comprimento 5m, raio  $R = 0,789$  m, espessura do casco  $t = 0,004$  m, com um anel flexível de espessura 0,036m, situado na metade do comprimento da casca considerada, conforme observa-se no item a da Figura 4.2. O material de construção considerado nessa modelagem é o Aço Inoxidável ASTM A 240 Tp 316, com coeficiente de Poisson  $\nu = 0,305$  e Módulo de Elasticidade  $E = 1,93 \times 10^{11}$  N/m<sup>2</sup>, idêntico ao utilizado na construção do **Casco** que compõe o Equipamento real.

Figura 4.1 - Esquema da Solução Analítica para Cálculo de Tensões em Casca com Anel Circunferencial Sujeita a Pressão Interna

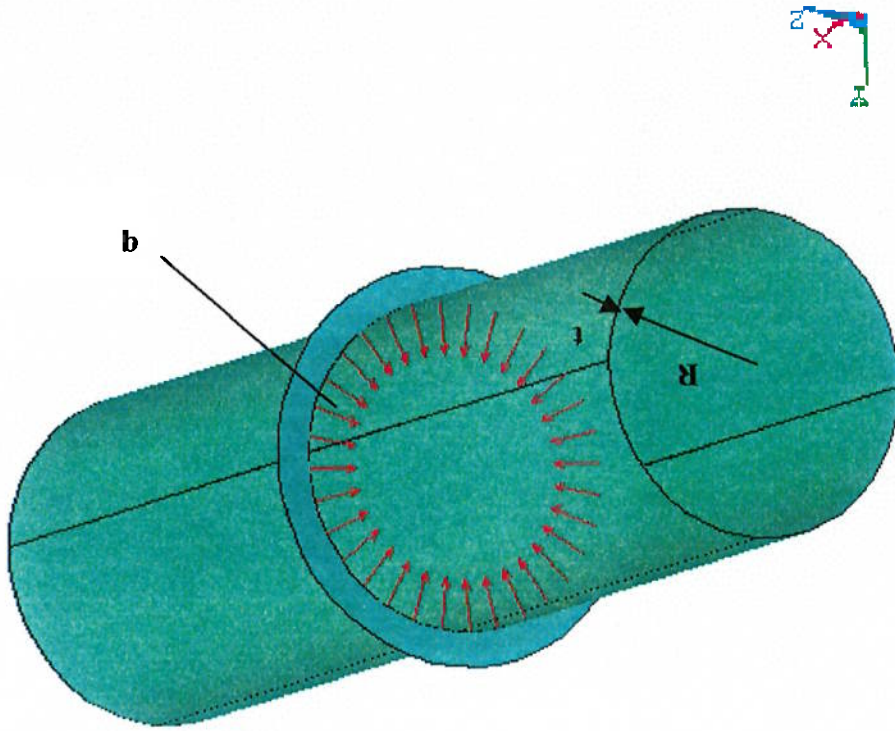
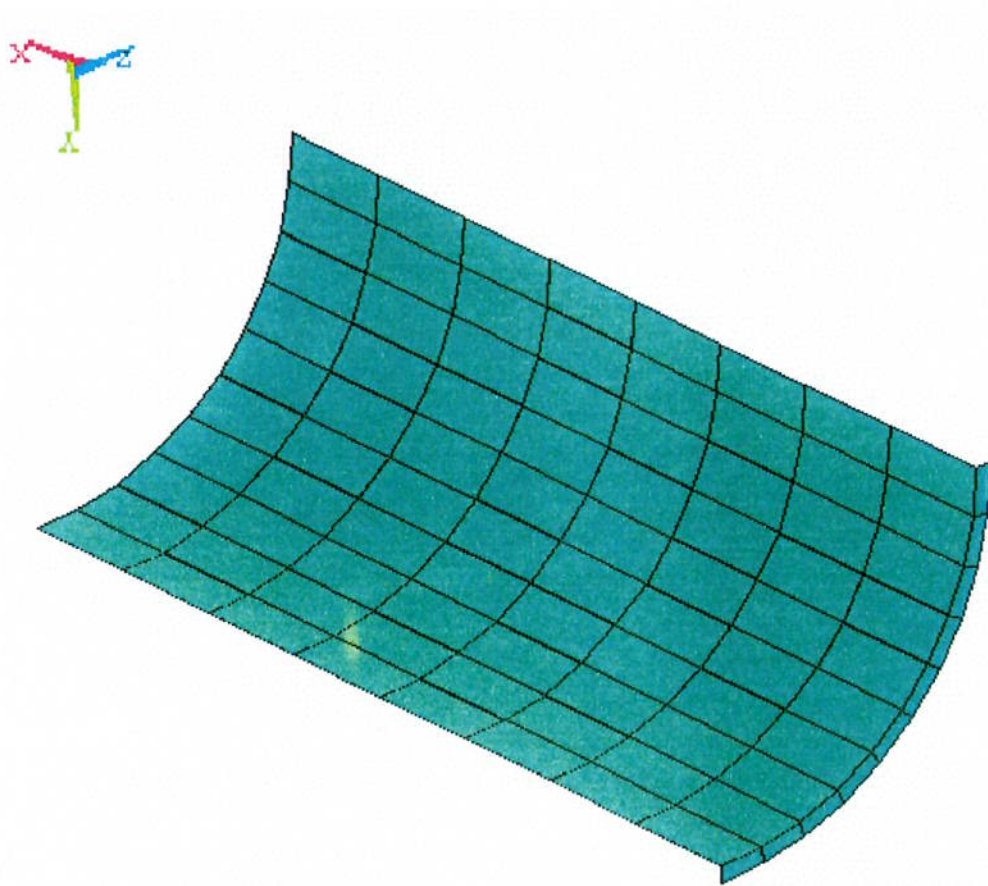
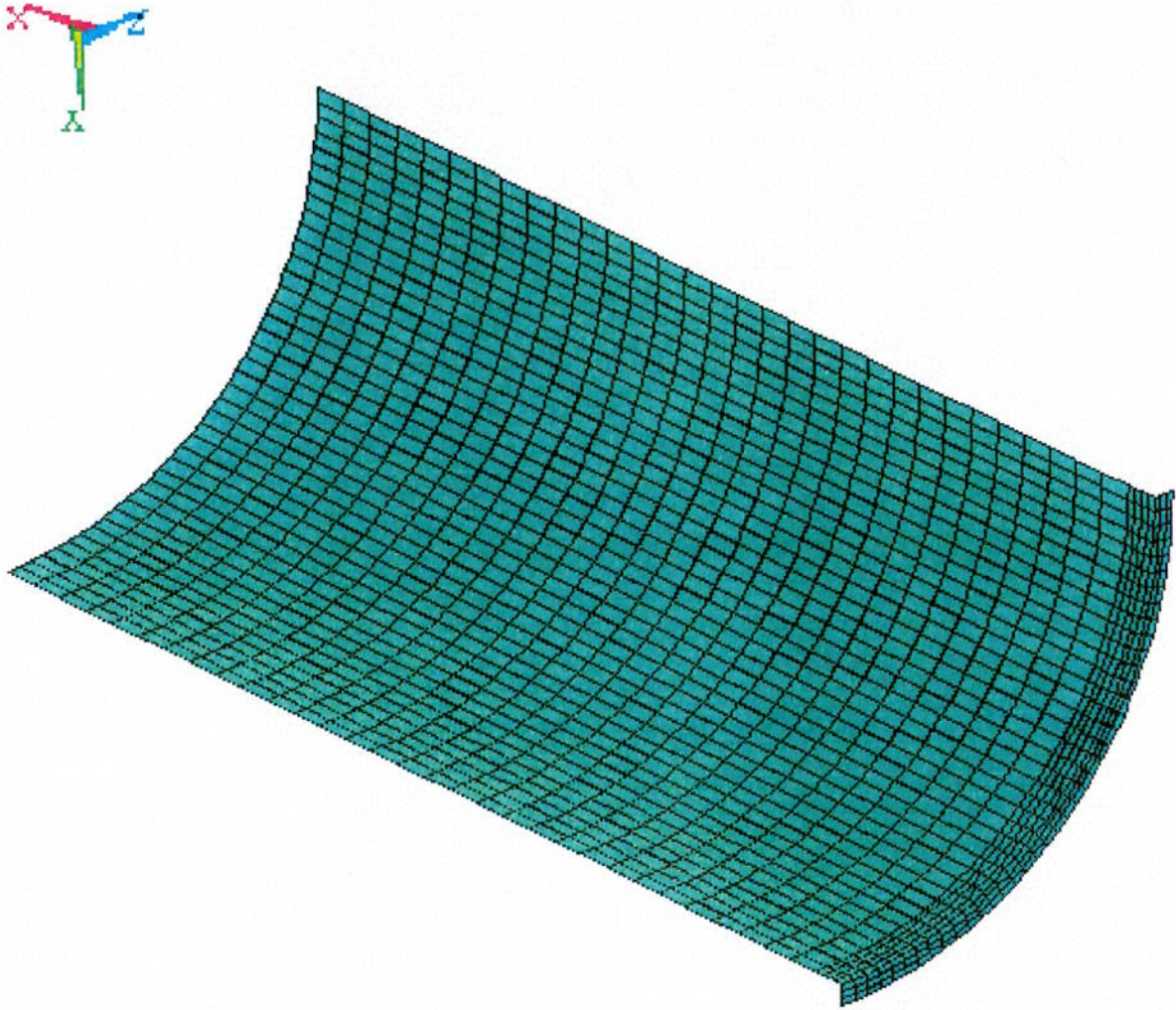


Figura 4.2 - Modelo Auxiliar de Elementos Finitos

a) Malha Número 1





b) Malha Número 4

Figura 4.2 - Modelo Auxiliar de Elementos Finitos

A formulação analítica de TIMOSHENKO e WOJNOWSKI-KRIEGER [53] e de ROARK e YOUNG [41] para uma casca cilíndrica de grande comprimento, submetida a pressão interna  $p$  e a carga radial circunferencialmente distribuída  $q$  é discutida a seguir.

#### 4.2.1 Condição de Validade

A condição de validade desta solução é que a Estrutura cilíndrica seja suficientemente longa, com ambos os extremos a uma distância maior que  $6/\lambda$  unidades de comprimento, medida a partir da posição onde atua o carregamento radial circunferencialmente distribuído, sendo:

$$\lambda = \left[ \frac{3(1-\nu^2)}{R^2 t^2} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (4.1)$$

com:

$R$ : raio médio da casca cilíndrica;

$t$ : espessura da casca cilíndrica;

$\nu$ : coeficiente de Poisson.

#### 4.2.2 Carga Radial Circunferencialmente Distribuída $q$

Para cálculo de tensões, com o emprego da formulação analítica anteriormente citada, necessita-se definir o valor da carga radial circunferencialmente distribuída, sendo esta função das dimensões do anel circunferencial e da própria estrutura, bem

como da pressão interna atuante na casca. De acordo com a referência [41], a magnitude do carregamento radial é definida pela relação:

$$q = \frac{pR^2}{Et} \frac{1}{R^2 + \frac{8D\lambda^3}{hbE}} \quad (4.2)$$

onde:

$q$ : carga radial circunferencialmente distribuída;

$p$ : pressão interna;

$R$ : raio médio da casca cilíndrica;

$E$ : Módulo de Elasticidade;

$t$ : espessura da casca cilíndrica;

$h$ : altura da seção transversal do anel de reforço considerado;

$b$ : altura da seção transversal do anel de reforço considerado;

$\mu$ : coeficiente de Poisson.

#### 4.2.3 Momento Fletor

O momento fletor atuante no plano longitudinal da casca, tal como indicado na Figura 4.1, é calculado pela relação:

$$M = \frac{q}{4\lambda} e^{-\lambda x} (\cos \lambda x - \text{sen } \lambda x) \quad (4.4)$$



sendo que a magnitude máxima ocorre para  $X = 0$ , ou seja, na posição onde atua a carga radial, coincidente com a posição do anel circunferencial.

Esta magnitude máxima é calculada pela relação:

$$M_{\max} = \frac{4\lambda}{q} \quad (4.5)$$

#### 4.2.4 Tensão de Flexão Longitudinal $\sigma_{FL}$

A Tensão de Flexão Longitudinal atuante na casca é definida pela relação:

$$\sigma_{FL} = \frac{6M}{t^2} \quad (4.6)$$

Assim, tem-se a Tensão de Flexão Longitudinal Máxima:

$$\sigma_{FL \max} = \frac{6M_{\max}}{t^2} \quad (4.7)$$

#### 4.2.5 Tensão de Flexão Circunferencial $\sigma_{FC}$

A Tensão de Flexão Circunferencial atuante na casca é dada pela equação:

$$\sigma_{FC} = \mu \sigma_{FL} \quad (4.8)$$

onde:

$\mu$ : coeficiente de Poisson.

Tal como apresentado no item introdutório deste Capítulo, a aferição é feita pelo cálculo do desvio, em valor absoluto, dos valores de tensão obtidos numericamente pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) em relação aos valores obtidos teoricamente, ou seja:

$$DESvio [\%] = \left| \frac{\sigma_{analitica} - \sigma_{MEF}}{\sigma_{analitica}} \right| \cdot 100\% \quad (4.9)$$

com:

$\sigma_{analitica}$  : tensão obtida pela formulação analítica;

$\sigma_{MEF}$  : tensão obtida através do Método dos Elementos Finitos.

e assim obtém-se:

$$PRECISAO [\%] = 100 - DESvio \quad (4.10)$$

#### 4.4 Resultados do Cálculo Analítico

##### 4.4.1 Verificação da Validade

Como a condição de validade, da formulação que ora utiliza-se, impõe que a distância do carregamento ao extremo da Estrutura cilíndrica seja maior que  $6/\lambda$  do carregamento considerado, faz-se:

$$M_{max} = 78,745 \text{ Nm}$$

(4.13)

Utilizando-se a equação (4.5), resulta:

Ocorre sob o anel de reforço, onde  $X = 0$ .

#### 4.4.3 Momento Fletor Máximo $M_{max}$

$$q = 7209,920 \text{ N/m}$$

(4.12)

Fazendo-se as respectivas substituições na equação (4.2) obtém-se:

#### 4.4.2 Carga Radial Circunferencialmente Distribuída $q$

desenvolvido neste Estudo.

correspondendo aos nós com coordenadas  $X = 0$  e  $Z = 0$  no **Modelo Auxiliar** magnitude das tensões na casca, atuantes na linha de centro do anel de reforço, Fazendo-se as substituições nas fórmulas indicadas no item 4.2, tem-se a

radial sobre a distribuição de tensões na Estrutura.

formulação, sendo esta relacionada à diminuição do efeito devido à presença de carga entre **Anéis de Reforço** é superior ao mínimo exigido para garantir a validade da comprimento total do **Costado** do Equipamento é da ordem de 9 m. Ou seja, a distância na região de interesse para estudo do **Semi-Reboque Tanque**, é maior que 0,96 m e o atendida. Para efeito de comparação, a distância entre **Anéis de Reforço** consecutivos, e verifica-se que, pelas características da Estrutura, esta condição está plenamente

$$\frac{\lambda}{6} = \frac{22,89}{6} = 0,262 \text{ m}$$

(4.11)

$$Z = 0 \text{ m}$$

$$Y = 0,789 \text{ m}$$

$$X = 0 \text{ m}$$

A verificação de convergência é realizada para um nó do **Modelo Auxiliar**, localizado sob o anel de reforço, onde tem-se a máxima solicitação tanto de Momento Fletor como de Tensões de Flexão e os resultados obtidos estão dispostos na Tabela 4.1 e Figuras 4.3 e 4.4.

O nó analisado, situado sob o anel de reforço, na interseção da casca com o seu plano de simetria longitudinal vertical, possui a seguinte localização, conforme Sistema Global de Coordenadas Cartesianas do **Modelo Auxiliar** de aferição:

#### 4.5 Verificação de Convergência e Aferição

$$\sigma_{FC} = 9,006 \text{ N/m}^2$$

(4.15)

A partir da equação (4.8), obtém-se:

#### 4.4.5 Tensão de Flexão Circunferencial $\sigma_{FL}$

$$\sigma_{FL} = 29,529 \text{ N/m}^2$$

(4.14)

Mediante a equação (4.7), verifica-se que:

#### 4.4.4 Tensão de Flexão Longitudinal $\sigma_{FL}$

**Tabela 4.1 Comparação entre Tensões Obtidas Analítica e Numericamente**

Malha	Elementos	Solução Numérica		Cálculo Analítico		Precisão [%]	
		σ <sub>FL</sub> [MPa]	σ <sub>FC</sub> [MPa]	σ <sub>FL</sub> [MPa]	σ <sub>FC</sub> [MPa]		
1	8x10	1,301	0,394	29,529	9,006	4,410	4,375
2	16x20	5,748	1,750	29,529	9,006	19,466	19,431
3	32x40	9,594	2,925	29,529	9,006	32,490	32,478
4	(4+31)x40	27,410	8,357	29,529	9,006	92,824	92,794

As indicações das malhas, na Tabela 4.1, são feitas em número de elementos empregados, respectivamente, na direção longitudinal e no arco de circunferência da seção transversal da casca cilíndrica do **Modelo Auxiliar** de aferição, conforme ilustra a Figura 4.2.

Para a Malha Número 4, indicada na Tabela 4.1, composta por (4+31)x40 elementos, tem-se as quatro filas de elementos, adjacentes à singularidade representada pelo anel, com dimensões menores que as demais 31 filas, tal como indica a Figura 4.2.

Neste último caso, verifica-se que a precisão é maior que 92,79 %, o que considera-se aceitável, levando-se em conta os objetivos deste Trabalho.

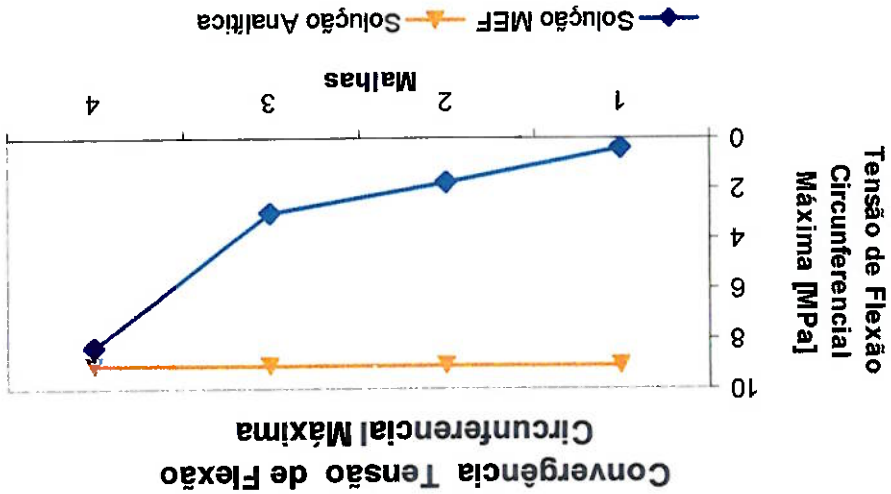


Figura 4.4 - Gráfico de Convergência da Tensão de Flexão Circunferencial Máxima - Modelo Auxiliar

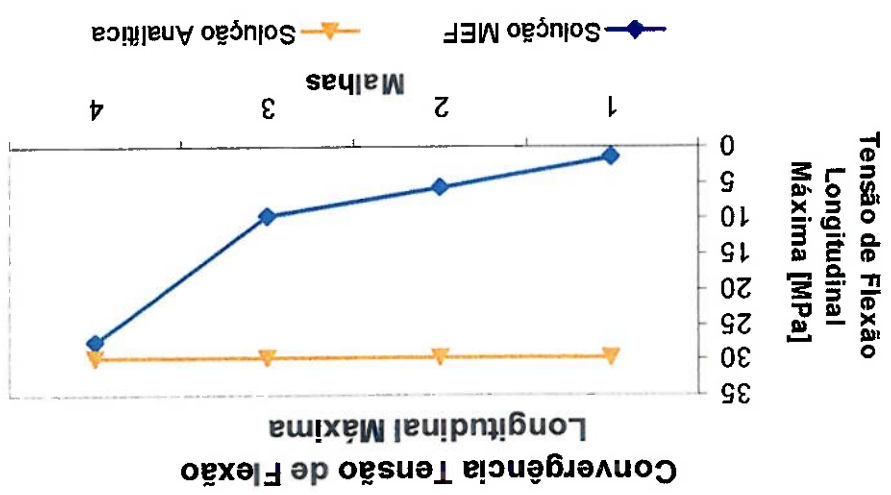


Figura 4.3 - Gráfico de Convergência da Tensão de Flexão Longitudinal Máxima - Modelo Auxiliar

#### 4.6. Conclusão

A precisão da malha mais densa, dentre as verificadas neste Capítulo, denominada Malha Número 4, é de 92,79 % que, como visto, indica o grau de convergência dos resultados numéricos para aqueles obtidos analiticamente. Analisando-se características geométricas do **Modelo** efetivo, os propósitos do Trabalho ora em desenvolvimento, as características de desempenho do equipamento de informática disponível para o cálculo e, sobretudo, o valor da precisão em si, considera-se que o refinamento de tal Malha é adequado.

Adota-se, portanto, Malha com elementos de dimensões (0,0620x0,0195)m nas regiões do **Casco** adjacentes a ambos os lados do **Segundo Anel de Reforço**, no **Modelo** efetivo, a qual corresponde às dimensões dos elementos da Malha Número 4, empregada no processo de aferição apresentado.

Utilizam-se duas malhas distintas de elementos finitos para o estudo dos vários

Casos, tomados como típicos, para a simulação de uso do Equipamento **Vaso de**

**Pressão Autoprotante** operando como **Semi-Reboque Tanque**.

Uma delas, denominada Malha Inicial, apresentando elementos de maior

dimensão, permite que obtenham-se valores de tensão equivalente de von Mises e a

consequente análise preliminar do comportamento estrutural, quanto a possibilidade de

falha por escoamento, na região de montagem dos **Anéis de Reforço**, sobre o **Carro da**

**Suspensão**. Ao mesmo tempo, permite uma verificação inicial das flutuações de tensão,

para pontos de maior magnitude de tensão equivalente de von Mises, nas regiões do

**Casco** relativas a cada um dos **Anéis de Reforço**, empregando-se os Métodos ASME e

de SINES, de maneira a determinar qual dessas regiões apresenta maior valor da

amplitude de tensão equivalente, cálculo que será desenvolvido no Capítulo

subsequente.

Determinada a região de maior amplitude de tensão equivalente, procede-se,

localizadamente, a um refinamento da Malha Inicial, com base no tamanho de elemento

determinado no processo de aferição do **Modelo**, descrito no Capítulo 4. Esta

denominada Malha Refinada permite, conforme é apresentado no Capítulo 6, a

verificação da vida em fadiga pelos mesmos Métodos ASME e de Sines já

mencionados, realizada a partir de valores de tensão mais acurados.

Para a perfeita compreensão do trabalho desenvolvido, cabem algumas

observações feitas a seguir, principalmente sobre critérios de descrição da localização

## Capítulo 5

### Resultados Obtidos

#### 5.1 Considerações Iniciais



de nós e de partes específicas da Estrutura, bem como quanto ao sistema de coordenadas utilizado e tensões analisadas.

Convenciona-se que, quanto à secção transversal, observa-se o Equipamento sempre a partir da sua chamada parte frontal, ou seja, na região onde está engatado ao veículo traçador.

São indicadas, em Tabelas, as componentes de tensão  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$ , as tensões principais  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  e a tensão equivalente de von Mises  $\sigma_e$ , para pontos da Estrutura denominados, no **Modelo de Elementos Finitos** como nós, cujas localizações geométricas são definidas no Sistema Global de Coordenadas, através de seus respectivos valores das coordenadas X, Y, Z.

O Sistema Global de Coordenadas do **Modelo de Elementos Finitos** está localizado na junção do **Tampo Frontal** com o **Casco**, no centro de sua secção transversal, o que indica, em outras palavras, a posição da origem - coordenadas (0,0,0). A coordenada X é crescente com a longitude do **Casco**, a partir da frente do Equipamento, no sentido de sua parte traseira; a coordenada Y é crescente verticalmente para cima, a partir da Linha de Centro longitudinal do **Vaso**, e a coordenada Z é crescente para a direita do Conjunto, olhando-se, também, a partir da frente do Equipamento e do centro da secção transversal do **Vaso**.

A mencionada tensão equivalente  $\sigma_e$  diz respeito ao critério de plastificação de von Mises, utilizado para materiais dúcteis, sendo que o escoamento é a condição crítica para dimensionamento estático de equipamentos construídos com este tipo de material, como é o caso do **Vaso de Pressão Autoprotante - Semi-Reboque Tanque**, em estudo.

No Capítulo 6, portanto, a tensão equivalente obtida, é comparada, através do critério de von Mises, com a tensão de escoamento do material de construção, verificando-se sua resistência em relação à falha por escoamento.

Da mesma forma, o critério adotado para verificação da resistência à fadiga baseia-se nas tensões principais, partindo-se daqueles pontos da Estrutura cuja tensão equivalente de von Mises tem maior magnitude, como é abordado detalhadamente no Capítulo 6.

A tensão equivalente de von Mises ( $\sigma_e$ ), segundo SURESH [50], é dada pela

expressão:

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right]^{1/2} \quad (5.1)$$

onde:

$\sigma_x$ : componente de tensão normal na direção do eixo X;

$\sigma_y$ : componente de tensão normal na direção do eixo Y;

$\sigma_z$ : componente de tensão normal na direção do eixo Z;

$\tau_{xy}$ : componente de tensão tangencial atuando no plano perpendicular ao eixo

X, na direção do eixo Y;

$\tau_{yz}$ : componente de tensão tangencial atuando no plano perpendicular ao eixo

Y, na direção do eixo Z;

$\tau_{zx}$ : componente de tensão tangencial atuando no plano perpendicular ao eixo Z,

na direção do eixo X.

Nos Casos 1 a 5, bem como no Caso 8, descritos, respectivamente, nos itens 3.4.1 a 3.4.5 e 3.4.8 do Capítulo 3, uma vez que a geometria do Equipamento, assim como o carregamento e condições de contorno, são simétricos em relação a um plano vertical longitudinal de simetria, tem-se uma distribuição de tensões e valores das reações de apoio também simétricos, como pode ser constatado nas Tabelas deste Capítulo referentes aos citados itens.

Já nos Casos 6, 7 e 9, abordados, respectivamente, nos itens 3.4.6, 3.4.7 e 3.4.9, do Capítulo 3, tratando-se de condições de contorno assimétricas, que induzem solicitação de torção na Estrutura, obtém-se distribuição de tensões, assim como reações de apoio com valores assimétricos em relação ao plano de simetria vertical longitudinal localizado na Linha de Centro do Conjunto.

Nas Tabelas que se seguem, estão indicados, nos importantes no tocante a magnitude de tensão equivalente, permitindo a análise da resistência ao escoamento e

também aqueles de relevância quanto a flutuação de tensão, para que seja possível a verificação da vida em fadiga.

Adicionalmente, tem-se Tabelas com nós que apresentam valores críticos de tensão equivalente para áreas e componentes de interesse na análise, como nos **Anéis de Reforço e Selas** e mesmo no **Casco**, nos Casos 8 e 9, onde considera-se a desaceleração do Conjunto.

Com o processamento do **Modelo** utilizando malha menos refinada, denominada, neste texto, de **Malha Inicial**, busca-se determinar a região da **Estrutura** que é submetida à maior magnitude de amplitude de tensão equivalente, considerada nos dois Métodos de análise adotados, levando-se em conta a ocorrência de uma sequência de carregamentos e de condições de contorno que constituem os **Casos** analisados neste Estudo. Visando à avaliação da vida em fadiga desta região determinada como crítica para a ocorrência do mecanismo de falha considerado, processa-se o Modelo utilizando-se a malha que apresenta maior refinamento desta área, denominada **Malha Refinada**, com a qual podem-se obter resultados mais próximos da situação real.

Nas Tabelas 5.1 - Descrição da Localização dos Nós e Tabela 5.2 - Coordenadas de Localização dos Nós, indicam-se os nós de relevância para a análise que se desenvolve. Destaca-se, ainda, que os nós de ordem 4000 dizem respeito à **Malha Refinada**.

Na Tabela 5.1, contendo a descrição da localização dos nós de interesse, o Equipamento é sempre considerado como visto a partir de sua frente. Assim, sua lateral direita situa-se na região positiva do eixo Z, da mesma forma que sua lateral esquerda localiza-se na região negativa do mesmo eixo, pertencente ao Sistema de Coordenadas Global. Nós da parte superior do **Vaso** possuem coordenada Y positiva, assim como nós da parte inferior, ou seja, do fundo do **Vaso** apresentam coordenada Y negativa.

Em algumas situações, para descrever um nó, devido ao fato de a **Estrutura** principal, ou seja o **Vaso**, possuir seção transversal circular, utiliza-se como referência a posição correspondente do ponteiro das horas do mostrador de um relógio analógico hipotético, visto a partir da frente do Equipamento, no sentido crescente do eixo X. Assim, como exemplos, a indicação 2 horas corresponde, aproximadamente, a um ângulo de 60° no sentido horário a partir do eixo Y e a indicação 7 horas corresponde a

**Tabela 5.1 - Descrição da Localização dos Nós**

Nº	Localização
5562	Jungão 1º. Anel Reforço/Empalme; lateral direita; abaixo 1/2 altura Costado; p/ trás
5563	Idem; abaixo da altura do 5562; p/ frente
5565	Idem; abaixo 1/2 altura Costado; acima da altura do 5562; p/ frente
5567	Idem; mesma altura do 5562; p/ frente
5596	Jungão 1ª. Sela/Empalme; fundo; p/ trás
5597	Idem; à direita do 5596
5612	Idem; à esquerda do 5596
5700	Jungão 2º. Anel Reforço/Empalme; lateral direita; a 1/2 altura Costado; p/frente
5750	Jungão 2º. Anel Reforço/Sela/Empalme; lateral direita; abaixo 1/2 altura Costado; p/frente
5752	Jungão 2º. Anel Reforço/Empalme; lateral direita; abaixo 1/2 altura Costado; p/frente
5753	Idem; abaixo do 5752
5754	Idem; acima do 5750
5759	Idem; mesma altura do 5754; p/ trás
5928	Jungão 3º. Anel Reforço/Sela/Empalme; lateral direita; abaixo 1/2 altura Costado; p/trás
5931	Jungão 3º. Anel Reforço/Empalme; lateral direita; abaixo 1/2 altura Costado; p/trás
5932	Idem; abaixo do 5931
5934	Jungão 3º. Anel Reforço/Sela/Empalme; lateral direita; mesma altura do 5928; p/frente
5938	Jungão 3º. Anel Reforço/Sela; lateral direita; mesma altura do 5932; p/ frente
6044	Jungão 4º. Anel Reforço/Sela/Empalme; lateral direita; abaixo 1/2 altura Costado; p/ trás
6048	Jungão 4º. Anel Reforço/Empalme; acima do 6044
6053	Jungão 4º. Anel Reforço/Empalme; lateral direita; acima da altura do 6044; p/ frente
6129	Jungão 4º. Anel Reforço/Empalme; abaixo 1/2 altura Costado; lateral esquerda; p/trás
6158	Jungão 4º. Anel Reforço/Sela; fundo; p/ frente
6159	Idem; à direita do 6158
6173	Idem; à esquerda do 6158
6235	Jungão 3º. Anel Reforço/Empalme; lateral esquerda; abaixo 1/2 altura Costado; p/frente
6474	Quina 2º. Anel Reforço; lateral direita; acima 1/2 altura Costado; p/ frente
6558	Quina 3º. Anel Reforço; lateral direita; mesma altura do 6474; p/ frente
7428	Quina Lateral Direita 3ª. SelaXFace Frontal; 5h; p/frente
7502	Quina Lateral Direita 2ª. SelaXFace Frontal; 5h; p/frente
41631	Quina 2º. Anel Reforço; lateral direita; acima 1/2 altura Costado; p/ frente
41633	Quina 2º. Anel Reforço; lateral direita; acima da altura do 41631; p/ frente
43048	Jungão 2º. Anel Reforço/Empalme; lateral direita; abaixo 1/2 altura Costado; p/frente
43049	Idem, abaixo do 43048
43050	Idem, abaixo do 43049
43071	Idem, mesma altura do 43050; p/trás
43703	Idem; lateral esquerda; mesma altura do 43049; p/frente
43704	Idem; lateral esquerda; abaixo do 43703

Tabela 5.2 - Coordenadas de Localização dos Nós

Nº	X [m]	Y [m]	Z [m]
5562	4,23750	-0,26454	0,74333
5563	4,10250	-0,32703	0,71803
5565	4,10250	-0,13422	0,77750
5567	4,10250	-0,26454	0,74333
5596	4,23750	-0,78900	0,00000
5597	4,23750	-0,78518	0,07754
5612	4,23750	-0,78518	-0,07754
5700	5,20250	0,00000	0,78900
5750	5,20250	-0,32703	0,71803
5752	5,20250	-0,13422	0,77750
5753	5,20250	-0,20011	0,76320
5754	5,20250	-0,26454	0,74333
5759	5,33750	-0,26454	0,74333
5928	6,58750	-0,32703	0,71803
5931	6,58750	-0,20011	0,76320
5932	6,58750	-0,26454	0,74333
5934	6,45250	-0,32703	0,71803
5938	6,45250	-0,26454	0,74333
6044	7,63750	-0,32703	0,71803
6048	7,63750	-0,26454	0,74333
6053	7,50250	-0,26454	0,74333
6129	7,63750	-0,26454	0,74333
6158	7,50250	-0,78900	0,00000
6159	7,50250	-0,78518	0,07754
6173	7,50250	-0,78518	-0,07754
6235	6,45250	-0,26454	-0,74333
6474	5,20250	0,16290	0,81896
6558	6,45250	0,16290	0,81896
7428	6,45250	-0,51755	0,68720
7502	5,20250	-0,51755	0,68720
41631	5,20250	0,06551	0,83243
41633	5,20250	0,13062	0,82472
43048	5,20250	-0,24131	0,75119
43049	5,20250	-0,27030	0,74125
43050	5,20250	-0,29889	0,73019
43071	5,33750	-0,29889	0,73019
43703	5,20250	-0,27030	-0,74125
43704	5,20250	-0,29889	-0,73019

um ângulo de 210° no sentido horário a partir também da extensão positiva do eixo Y. Salienta-se que as indicações na citada Tabela são aproximadas, orientativas para o leitor que, desejando identificar a posição precisa de determinado nó, deve recorrer a Tabela 5.2, cujo conteúdo, como já mencionado, apresenta as coordenadas respectivas no Sistema de Coordenadas Global.

Cabe destacar que as expressões “p/ frente” e “p/ trás” são usadas na descrição da localização dos nós, na mencionada Tabela 5.1, para diferenciar seus correspondentes posicionamentos dentro do detalhe construtivo do componente estrutural a que pertencem. Assim, por exemplo, um **Anel de Reforço** tem as Quinas, formadas pelas dobras do perfil “U” de sua seção transversal, diferenciadas pelas expressões mencionadas, de maneira a indicar se o nó está voltado para a frente ou para a traseira do Conjunto.

Também é preciso notar que os **Anéis de Reforço**, em um total de seis, são designados, a partir da frente do Equipamento: **Anel de Reforço Frontal**, **Anel de Reforço dos Pés de Descanso**, **Primeiro**, **Segundo**, **Terceiro** e **Quarto Anel de Reforço** sobre o **Carro da Suspensão**. Da mesma forma, as **Selas** da região do **Chassis** são denominadas, respectivamente, **Sela dos Pés de Descanso**, **Primeira**, **Segunda**, **Terceira** e **Quarta Sela** sobre o **Carro da Suspensão**.

Reitera-se que as duas formas de indicação da localização dos nós - descrição de localização e valores do Sistema de Coordenadas Global, respectivamente, constantes das Tabelas 5.1 e 5.2 - são complementares, permitindo ao leitor a verificação do posicionamento de um nó dentro da região de ocorrência de determinado evento discutido, de maneira adequada à sua perfeita compreensão.

Quanto aos valores de resultados, no tocante a tensões equivalentes para análise da possibilidade de ocorrência de falha por escoamento de componentes, tomam-se aqueles correspondentes à Malha Inicial, para todas as situações consideradas.

Para verificação da resistência ao escoamento do **Casco**, na região localizada sobre o **Carro da Suspensão**, utiliza-se a Malha Inicial, para os Casos em que o valor máximo da tensão equivalente de von Mises recai em detalhe estrutural diferente daquele determinado como crítico quanto à flutuação de tensão. Como já descrito, a Malha Refinada é elaborada através de um adensamento do número de elementos finitos que a compõem, na área que corresponde ao detalhe estrutural, ou seja, ao **Anel de**

**Reforço** selecionado como critico quanto à amplitude de tensão equivalente. Assim, nos Casos em que tem-se a máxima tensão equivalente atuando neste **Anel de Reforço** critico, utiliza-se também a Malha Refinada para determinar o valor mais acurado da respectiva tensão equivalente, como apresentado no Capítulo 6.

No que se refere à análise da vida em fadiga, feita para a região critica determinada previamente, com a Malha Inicial, ou seja a região do **Anel de Reforço** critico, quanto à amplitude de tensão equivalente, utiliza-se a denominada Malha Refinada.

Dessa forma, os resultados da análise, relativa à verificação da possibilidade de ocorrência de falha por escoamento, devem ser tomados como preliminares, servindo como primeira verificação da Estrutura, quanto a este tipo de solicitação e como visualização inicial do comportamento relativo das várias partes que compõem a região de interesse para estudo.

A obtenção de tensões atuantes nos nós, mediante processamento do Modelo de Elementos Finitos, é feita a partir da utilização dos valores das componentes de tensão, fornecidos por elemento, pelo programa ANSYS, considerando-se aquelas componentes que , introduzidas no cálculo da tensão equivalente de von Mises, conduzem ao seu valor de maior magnitude. Dessa forma, leva-se em conta a condição mais desfavorável de resistência da Estrutura.

No caso de um nó que é comum a vários elementos, a solução fornecida pelo programa ANSYS inclui, para cada um destes elementos, as componentes de tensão para o nó considerado. O critério adotado, a favor do conservadorismo e da segurança, considera, para as verificações a serem feitas, as componentes nodais, relativas a um elemento, que resultam na maior tensão equivalente de von Mises.

Da mesma forma, as tensões principais são determinadas a partir das componentes de tensão que conduzem ao maior valor da tensão equivalente de von Mises respectiva.

Através desse procedimento adotado, trabalha-se a favor da segurança, na medida em que as verificações são feitas com base nos resultados numéricos que indicam os esforços de maior magnitude, condição mais desfavorável para a resistência da Estrutura.

## 5.2 Caso 1

Neste item, apresentaram-se, em forma de Tabelas, os resultados obtidos para as reações de apoio e distribuição de tensões, considerando o Modelo submetido às condições de carregamento e de contorno que compõem o Caso 1, descrito no item 3.4.1 do Capítulo 3.

Na Tabela 5.3, têm-se as reações de apoio atuantes na Estrutura, com o Equipamento parado em superfície plana, podendo-se verificar a simetria dos valores obtidos. Sendo a carga vertical, a que é submetido cada um dos Eixos, igual a soma dos valores de reações de apoio em suas pontas, observa-se que os Eixos Frontal, Intermediário e Traseiro apresentam, respectivamente, valores de 51885 N, 89153 N e 74745 N para tal solicitação, totalizando, para os três componentes, 215783 N, ou seja a carga vertical total sobre os Eixos é inferior à admissível pela Lei de Balança. Verifica-se também um desbalanceamento dos valores das cargas verticais totais que incidem em cada um dos Eixos do Semi-Reboque Tanque.

As Tabelas 5.4 e 5.5, indicam magnitudes, no Sistema Global de Coordenadas, para as componentes de tensão, tensão equivalente, calculada conforme o critério de von Mises e para tensões principais, respectivamente obtidas com o processamento do Modelo, utilizando Malha Inicial e Malha Refinada, para os nós do Casco representativos das regiões submetidas a tensões de elevada magnitude, indicando os pontos de concentração de tensão.

Já a Tabela 5.6 apresenta valores, no Sistema Global de Coordenadas, para componentes de tensão e tensão equivalente de von Mises, utilizando o Modelo com Malha Inicial, para nós que representam as regiões submetidas a concentração de tensão, localizados no Anel de Reforço e Sela.



Tabela 5.3 - Reações de Apoio - Caso I

Apoio	$F_x$ [N]	$F_y$ [N]	$F_z$ [N]	$M_x$ [Nm]	$M_y$ [Nm]	$M_z$ [Nm]
ID	31036,00					
IC	19949,00	0,00				
IE	31043,00					
II	25943,00					
IID	44577,00					
IVD	37373,00		-2020,40			
III	25942,00					
III	44576,00					
IVE	37372,00		2020,40			
Total	0,00	297810,00	0,00	0,00	0,00	0,00

**Tabela 5.4 - Tensões no Casco - Caso 1 - Malha Inicial**

Nó	$\sigma_x$ [MPa]	$\sigma_y$ [MPa]	$\sigma_z$ [MPa]	$\tau_{xy}$ [MPa]	$\tau_{yz}$ [MPa]	$\tau_{xz}$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]	$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]	$\sigma_3$ [MPa]
5562	0,00	1,38	18,48	0,00	9,80	0,00	24,62	22,94	0,00	-3,07
5563	0,00	-16,59	-2,48	0,00	15,60	0,00	31,15	7,58	0,00	-26,66
5565	0,00	-6,67	18,96	0,00	10,70	0,00	29,56	22,84	0,00	-10,55
5567	0,00	-17,82	5,54	0,00	16,29	0,00	35,26	13,90	0,00	-26,19
5596	0,00	-28,06	11,39	0,00	0,66	0,00	35,18	11,40	0,00	-28,07
5597	0,00	-25,21	11,26	0,00	2,46	0,00	32,62	11,42	0,00	-25,37
5612	0,00	-25,15	9,62	0,00	-2,63	0,00	31,43	9,82	0,00	-25,35
5700	0,00	-11,78	26,75	0,00	11,75	0,00	39,80	30,05	0,00	-15,08
5750	0,00	-25,23	-0,75	0,00	20,71	0,00	43,65	11,07	0,00	-37,05
5752	0,00	-12,31	24,25	0,00	13,65	0,00	39,96	28,78	0,00	-16,84
5753	0,00	-14,42	20,66	0,00	14,52	0,00	39,56	25,89	0,00	-19,65
5754	0,00	-26,44	9,56	0,00	22,00	0,00	49,95	19,98	0,00	-36,86
5759	0,00	-10,91	20,23	0,00	16,60	0,00	39,70	27,42	0,00	-18,10
5928	0,00	-23,30	1,88	0,00	18,45	0,00	40,14	11,62	0,00	-33,05
5931	0,00	-16,53	14,03	0,00	13,66	0,00	35,52	19,25	0,00	-21,75
5932	0,00	-22,05	14,18	0,00	20,17	0,00	47,12	23,17	0,00	-31,04
5934	0,00	-20,67	4,92	0,00	17,55	0,00	38,44	13,85	0,00	-29,59
5938	0,00	-19,62	15,69	0,00	19,71	0,00	45,87	24,49	0,00	-28,42
6044	0,00	-15,99	-2,24	0,00	13,42	0,00	27,66	5,97	0,00	-24,19
6048	0,00	-15,89	5,94	0,00	14,01	0,00	31,16	12,78	0,00	-22,73
6053	0,00	-2,39	14,34	0,00	9,86	0,00	23,18	18,91	0,00	-6,96
6129	0,00	-15,90	5,95	0,00	-14,01	0,00	31,17	12,79	0,00	-22,74
6158	0,00	-26,28	7,82	0,00	0,40	0,00	30,94	7,82	0,00	-26,28
6159	0,00	-25,73	5,38	0,00	0,48	0,00	28,81	5,39	0,00	-25,74
6173	0,00	-25,11	6,33	0,00	-0,78	0,00	28,83	6,35	0,00	-25,13
6235	0,00	-19,62	15,68	0,00	-19,70	0,00	45,86	24,48	0,00	-28,43

**Tabela 5.5 - Tensões no Casco - Caso 1 - Malha Refinada - Região do Segundo Anel de Reforço**

Nó	$\sigma_x$ [MPa]	$\sigma_y$ [MPa]	$\sigma_z$ [MPa]	$\tau_{xy}$ [MPa]	$\tau_{yz}$ [MPa]	$\tau_{xz}$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]	$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]	$\sigma_3$ [MPa]
43048	0,00	-23,32	10,07	0,00	19,83	0,00	45,38	19,29	0,00	-32,54
43049	0,00	-25,03	14,48	0,00	20,40	0,00	49,46	23,12	0,00	-33,67
43050	0,00	-24,02	16,73	0,00	21,79	0,00	51,79	26,19	0,00	-33,47
43071	0,00	-12,40	27,16	0,00	13,85	0,00	42,47	31,53	0,00	-16,76
43703	0,00	-25,03	14,48	0,00	-20,39	0,00	49,46	23,12	0,00	-33,67
43704	0,00	-24,02	16,74	0,00	-21,78	0,00	51,79	26,19	0,00	-33,47

**Tabela 5.6 - Tensões Equivalentes de von Mises em Componentes - Caso 1 - Malha Inicial**

Nó	$\sigma_x$ [MPa]	$\sigma_y$ [MPa]	$\sigma_z$ [MPa]	$\tau_{xy}$ [MPa]	$\tau_{yz}$ [MPa]	$\tau_{xz}$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]
6558	0,00	29,39	-39,01	0,00	-23,56	0,00	72,09
7428	0,00	-45,87	-11,05	0,00	-18,14	0,00	52,02

## 5.3 Caso 2

Para o Caso 2, constam, das Tabelas que se seguem, os resultados obtidos para reações de apoio e distribuição de tensões, relativos ao **Modelo** submetido às condições de carregamento e de contorno definidas no item 3.4.2 do Capítulo 3.

Através das reações de apoio verticais, apresentadas na Tabela 5.7, observa-se, além da simetria dos valores obtidos, considerando-se o Equipamento apoiado em superfície plana, que a magnitude de sua soma total indica uma estimativa do peso próprio da Estrutura.

As Tabelas 5.8 e 5.9 indicam, respectivamente para Malha Inicial e Malha Refinada, os valores de tensão equivalente de von Mises, de componentes de tensão e de tensões principais para o **Casco**, relativos aos nós que representam regiões submetidas a tensões de elevada magnitude, correspondentes aos pontos de concentração de tensão na Estrutura.

Os valores de tensão indicados nas Tabelas mencionadas, permitem a verificação da flutuação de tensões para um ciclo de carregamento que inclua a condição representada pelo Caso 2.

Como a magnitude de esforços, neste Caso, é reduzida, em relação aos demais, uma vez que o Equipamento é considerado vazio, praticamente não existe possibilidade de falha por escoamento nesta situação. Assim, não são indicados valores de tensão equivalente de von Mises e de componentes de tensão para **Anel de Reforço e Sela**, neste item.

Apóio	F <sub>x</sub> [N]	F <sub>y</sub> [N]	F <sub>z</sub> [N]	M <sub>x</sub> [Nm]	M <sub>y</sub> [Nm]	M <sub>z</sub> [Nm]
ID	0,00	2599,60				
IC		2219,40				
IE		2600,20				
IID		2457,50				
IID		4224,10				
IVD		3541,50	-236,18			
III		2457,40				
III		4223,90				
IVE		3541,40	236,18			
Total	0,00	27865,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela 5.7 - Reações de Apoio - Caso 2

Tabela 5.8 - Tensões no Casco - Caso 2 - Malha Inicial

Nó	$\sigma_x$ [MPa]	$\sigma_y$ [MPa]	$\sigma_z$ [MPa]	$\tau_{xy}$ [MPa]	$\tau_{yz}$ [MPa]	$\tau_{xz}$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]	$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]	$\sigma_3$ [MPa]
5562	0,00	0,53	1,58	0,00	0,49	0,00	1,63	1,77	0,34	0,00
5563	0,00	-1,31	-0,33	0,00	1,11	0,00	2,25	0,39	0,00	-2,03
5565	0,00	-0,49	1,38	0,00	0,73	0,00	2,10	1,63	0,00	-0,74
5567	0,00	-1,39	0,25	0,00	1,14	0,00	2,50	0,84	0,00	-1,97
5596	0,00	-2,72	0,57	0,00	0,06	0,00	3,05	0,57	0,00	-2,72
5597	0,00	-2,48	0,56	0,00	0,25	0,00	2,83	0,58	0,00	-2,50
5612	0,00	-2,46	0,40	0,00	-0,26	0,00	2,72	0,42	0,00	-2,49
5700	0,00	-0,99	1,92	0,00	0,87	0,00	2,97	2,16	0,00	-1,23
5750	0,00	-2,12	-0,13	0,00	1,58	0,00	3,42	0,74	0,00	-2,99
5752	0,00	-1,06	1,80	0,00	1,01	0,00	3,06	2,12	0,00	-1,38
5753	0,00	-1,23	1,56	0,00	1,08	0,00	3,06	1,93	0,00	-1,60
5754	0,00	-2,18	0,70	0,00	1,67	0,00	3,90	1,47	0,00	-2,95
5759	0,00	-0,72	1,71	0,00	1,18	0,00	2,97	2,19	0,00	-1,20
5928	0,00	-1,98	0,14	0,00	1,43	0,00	3,22	0,86	0,00	-2,70
5931	0,00	-1,44	1,06	0,00	1,05	0,00	2,83	1,44	0,00	-1,82
5932	0,00	-1,84	1,15	0,00	1,57	0,00	3,78	1,82	0,00	-2,52
5934	0,00	-1,69	0,43	0,00	1,31	0,00	2,99	1,06	0,00	-2,32
5938	0,00	-1,54	1,35	0,00	1,50	0,00	3,61	1,99	0,00	-2,17
6044	0,00	-1,31	-0,21	0,00	0,99	0,00	2,11	0,37	0,00	-1,90
6048	0,00	-1,22	0,55	0,00	1,04	0,00	2,39	1,03	0,00	-1,70
6053	0,00	-0,27	1,35	0,00	0,38	0,00	1,64	1,44	0,00	-0,36
6129	0,00	-1,22	0,55	0,00	-1,04	0,00	2,39	1,03	0,00	-1,70
6158	0,00	-2,36	0,45	0,00	0,04	0,00	2,61	0,45	0,00	-2,36
6159	0,00	-2,32	0,23	0,00	0,04	0,00	2,44	0,23	0,00	-2,32
6173	0,00	-2,27	0,32	0,00	-0,07	0,00	2,45	0,32	0,00	-2,28
6235	0,00	-1,54	1,35	0,00	-1,50	0,00	3,61	1,99	0,00	-2,17

**Tabela 5.9 - Tensões no Casco - Caso 2 - Malha Refinada - Região do Segundo Anel de Reforço**

Nó	$\sigma_x$ [MPa]	$\sigma_y$ [MPa]	$\sigma_z$ [MPa]	$\tau_{xy}$ [MPa]	$\tau_{yz}$ [MPa]	$\tau_{xz}$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]	$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]	$\sigma_3$ [MPa]
43048	0,00	-1,95	0,71	0,00	1,51	0,00	3,55	1,40	0,00	-2,64
43049	0,00	-2,09	1,04	0,00	1,56	0,00	3,87	1,69	0,00	-2,73
43050	0,00	-2,02	1,20	0,00	1,68	0,00	4,05	1,92	0,00	-2,74
43071	0,00	-0,92	2,20	0,00	0,94	0,00	3,22	2,46	0,00	-1,18
43703	0,00	-2,09	1,04	0,00	-1,56	0,00	3,87	1,69	0,00	-2,73
43704	0,00	-2,02	1,20	0,00	-1,68	0,00	4,05	1,92	0,00	-2,74

### 5.4 Caso 3

As Tabelas que se seguem, apresentam os resultados obtidos para reações de apoio e distribuição de tensões, considerando o Modelo sujeito às condições de carregamento e de contorno descritas no item 3.4.3 do Capítulo 3, as quais compõem o Caso 3.

Indicam-se, na Tabela 5.10, as reações de apoio, simulando-se a liberação das pontas do **Eixo Frontal** do Equipamento, considerado parado em superfície plana.

Nas Tabelas 5.11 e 5.12, indicam-se, no Sistema Global de Coordenadas, as componentes de tensão, tensão equivalente e tensões principais obtidas, respectivamente com o processamento do Modelo utilizando Malha Inicial e Malha Refinada, para os nós do **Casco** que representam áreas submetidas a tensões de elevada magnitude, indicando pontos de concentração de tensão.

A Tabela 5.13 apresenta valores, no Sistema Global de Coordenadas, para componentes de tensão e tensão equivalente de von Mises, utilizando o **Modelo** com Malha Inicial, para nós que representam as regiões submetidas a concentração de tensão, localizados no **Anel de Reforço e Sela**.



**Tabela 5.10 - Reações de Apoio - Caso 3**

Apoio	$F_x$ [N]	$F_y$ [N]	$F_z$ [N]	$M_x$ [Nm]	$M_y$ [Nm]	$M_z$ [Nm]
ID	0,00	36938,00				
IC	0,00	25979,00				
IE		36946,00				
IID		48774,00				
IVD		50202,00	-2475,70			
III		48772,00				
IVE		50201,00	2475,70			
Total	0,00	297810,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela 5.11 - Tensões no Casco - Caso 3 - Malha Inicial

Nó	$\sigma_x$ [MPa]	$\sigma_y$ [MPa]	$\sigma_z$ [MPa]	$\tau_{xy}$ [MPa]	$\tau_{yz}$ [MPa]	$\tau_{xz}$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]	$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]	$\sigma_3$ [MPa]
5562	0,00	4,16	13,47	0,00	6,34	0,00	16,23	16,68	0,95	0,00
5563	0,00	-8,23	-1,26	0,00	10,20	0,00	19,26	6,04	0,00	-15,52
5565	0,00	-2,79	12,46	0,00	7,74	0,00	19,43	15,70	0,00	-6,03
5567	0,00	-8,87	4,96	0,00	10,77	0,00	22,25	10,84	0,00	-14,75
5596	0,00	-22,51	10,88	0,00	0,67	0,00	29,52	10,90	0,00	-22,52
5597	0,00	-20,08	10,87	0,00	1,86	0,00	27,38	10,98	0,00	-20,19
5612	0,00	-20,00	9,50	0,00	-1,96	0,00	26,30	9,63	0,00	-20,13
5700	0,00	-8,66	23,23	0,00	10,88	0,00	34,22	26,59	0,00	-12,02
5750	0,00	-21,89	-2,67	0,00	18,36	0,00	37,94	8,44	0,00	-33,01
5752	0,00	-9,19	22,13	0,00	12,16	0,00	34,94	26,29	0,00	-13,35
5753	0,00	-11,02	19,53	0,00	12,65	0,00	34,61	24,09	0,00	-15,57
5754	0,00	-23,57	6,01	0,00	19,14	0,00	42,81	15,41	0,00	-32,97
5759	0,00	-2,42	20,11	0,00	11,89	0,00	29,71	25,22	0,00	-7,53
5928	0,00	-23,79	4,45	0,00	18,24	0,00	41,10	13,39	0,00	-32,74
5931	0,00	-18,87	11,79	0,00	13,92	0,00	36,04	17,17	0,00	-24,25
5932	0,00	-21,64	17,76	0,00	20,43	0,00	49,20	26,44	0,00	-30,32
5934	0,00	-28,31	2,31	0,00	21,17	0,00	47,08	13,12	0,00	-39,13
5938	0,00	-28,23	13,39	0,00	23,04	0,00	54,29	23,63	0,00	-38,47
6044	0,00	-17,22	-1,12	0,00	14,23	0,00	29,77	7,18	0,00	-25,52
6048	0,00	-16,73	8,30	0,00	15,09	0,00	34,22	15,39	0,00	-23,82
6053	0,00	-6,71	14,58	0,00	12,14	0,00	28,25	20,08	0,00	-12,21
6129	0,00	-16,75	8,30	0,00	-15,09	0,00	34,23	15,39	0,00	-23,84
6158	0,00	-21,48	8,44	0,00	0,29	0,00	26,72	8,44	0,00	-21,48
6159	0,00	-21,07	6,50	0,00	0,48	0,00	24,97	6,51	0,00	-21,07
6173	0,00	-20,42	7,26	0,00	-0,71	0,00	24,89	7,28	0,00	-20,43
6235	0,00	-28,23	13,38	0,00	-23,04	0,00	54,28	23,62	0,00	-38,47

**Tabela 5.12 - Tensões no Casco - Caso 3 - Malha Refinada - Região do Segundo Anel de Reforço**

Nó	$\sigma_x$ [MPa]	$\sigma_y$ [MPa]	$\sigma_z$ [MPa]	$\tau_{xy}$ [MPa]	$\tau_{yz}$ [MPa]	$\tau_{xz}$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]	$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]	$\sigma_3$ [MPa]
43048	0,00	-21,24	5,27	0,00	17,78	0,00	39,22	14,19	0,00	-30,15
43049	0,00	-21,95	8,86	0,00	18,50	0,00	42,20	17,53	0,00	-30,62
43050	0,00	-14,89	24,64	0,00	15,61	0,00	43,90	30,07	0,00	-20,31
43071	0,00	-4,96	24,71	0,00	8,92	0,00	31,57	27,19	0,00	-7,44
43703	0,00	-21,95	8,87	0,00	-18,50	0,00	42,20	17,53	0,00	-30,61
43704	0,00	-14,90	24,64	0,00	-15,61	0,00	43,90	30,06	0,00	-20,32

**Tabela 5.13 - Tensões Equivalentes de von Mises em Componentes - Caso 3 - Malha Inicial**

Nó	$\sigma_x$ [MPa]	$\sigma_y$ [MPa]	$\sigma_z$ [MPa]	$\tau_{xy}$ [MPa]	$\tau_{yz}$ [MPa]	$\tau_{xz}$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]
6558	0,00	37,02	-45,49	0,00	-8,94	0,00	73,23
7428	0,00	-50,27	-8,73	0,00	-21,03	0,00	59,08

## 5.5 Caso 4

Os resultados indicados nas Tabelas seguintes, são aqueles obtidos através do processamento do **Modelo** submetido às condições de carregamento e de contorno descritas no item 3.4.4 do Capítulo 3, sendo relativos às reações de apoio e distribuição de tensões correspondentes.

Indicam-se, na Tabela 5.14, as reações de apoio, simulando-se a liberação das pontas do **Eixo Intermediário** do Equipamento, considerado parado em superfície plana.

Nas Tabelas 5.15 e 5.16, indicam-se, no Sistema Global de Coordenadas, as componentes de tensão, tensão equivalente e tensões principais obtidas, respectivamente com o processamento do Modelo utilizando Malha Inicial e Malha Refinada, para os nós do **Casco** que representam áreas submetidas a tensões de elevada magnitude, indicando pontos de concentração de tensão.

A Tabela 5.17 indica valores, no Sistema Global de Coordenadas, para componentes de tensão e tensão equivalente de von Mises, utilizando o **Modelo** com Malha Inicial, para nós que representam as regiões submetidas a concentração de tensão, localizados no **Anel de Reforço e Sela**.

Tabela 5.14 - Reações de Apoio – Caso 4

Apóio	F <sub>x</sub> [N]	F <sub>y</sub> [N]	F <sub>z</sub> [N]	M <sub>x</sub> [Nm]	M <sub>y</sub> [Nm]	M <sub>z</sub> [Nm]
ID	0,00	34020,00				
IC		22292,00				
IE		34026,00				
ID		37123,00				
IVD		66616,00	-2481,90			
IE		37122,00				
IVE		66614,00	2481,90			
Total	0,00	297810,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela 5.15 - Tensões no Casco - Caso 4 - Malha Inicial

Nó	$\sigma_x$ [MPa]	$\sigma_y$ [MPa]	$\sigma_z$ [MPa]	$\tau_{xy}$ [MPa]	$\tau_{yz}$ [MPa]	$\tau_{xz}$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]	$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]	$\sigma_3$ [MPa]
5562	0,00	-5,44	13,89	0,00	11,32	0,00	26,13	19,11	0,00	-10,66
5563	0,00	-14,28	0,11	0,00	13,47	0,00	27,38	8,18	0,00	-22,36
5565	0,00	-7,02	15,19	0,00	9,49	0,00	25,63	18,69	0,00	-10,53
5567	0,00	-14,84	7,92	0,00	14,47	0,00	32,07	14,95	0,00	-21,87
5596	0,00	-16,19	9,66	0,00	0,42	0,00	22,64	9,67	0,00	-16,20
5597	0,00	-14,33	9,58	0,00	1,38	0,00	20,98	9,66	0,00	-14,41
5612	0,00	-14,39	8,63	0,00	-1,47	0,00	20,30	8,72	0,00	-14,48
5700	0,00	-7,74	22,22	0,00	10,02	0,00	32,04	25,26	0,00	-10,78
5750	0,00	-16,42	0,00	0,00	15,58	0,00	31,58	9,40	0,00	-25,82
5752	0,00	-7,67	19,12	0,00	11,02	0,00	30,58	23,07	0,00	-11,62
5753	0,00	-9,06	15,78	0,00	11,46	0,00	29,46	20,26	0,00	-13,54
5754	0,00	-17,14	8,47	0,00	16,70	0,00	36,70	16,71	0,00	-25,38
5759	0,00	-4,32	17,07	0,00	12,27	0,00	28,90	22,65	0,00	-9,90
5928	0,00	-15,88	4,79	0,00	14,13	0,00	30,83	11,96	0,00	-23,05
5931	0,00	-13,57	8,45	0,00	11,46	0,00	27,64	13,33	0,00	-18,45
5932	0,00	-13,58	16,31	0,00	16,13	0,00	38,12	23,36	0,00	-20,63
5934	0,00	-21,28	1,67	0,00	17,58	0,00	37,66	11,19	0,00	-30,80
5938	0,00	-21,27	11,10	0,00	19,12	0,00	43,68	19,96	0,00	-30,14
6044	0,00	-18,18	0,00	0,00	14,02	0,00	30,33	7,62	0,00	-25,80
6048	0,00	-17,62	8,93	0,00	15,03	0,00	35,00	15,71	0,00	-24,39
6053	0,00	-12,23	12,19	0,00	13,65	0,00	31,72	18,29	0,00	-18,33
6129	0,00	-17,63	8,93	0,00	-15,03	0,00	35,00	15,70	0,00	-24,40
6158	0,00	-14,93	5,89	0,00	0,10	0,00	18,59	5,89	0,00	-14,93
6159	0,00	-14,61	4,75	0,00	0,56	0,00	17,50	4,77	0,00	-14,63
6173	0,00	-14,11	5,25	0,00	-0,73	0,00	17,39	5,28	0,00	-14,14
6235	0,00	-21,28	11,09	0,00	-19,11	0,00	43,68	19,96	0,00	-30,14

**Tabela 5.16 - Tensões no Casco - Caso 4 - Malha Refinada - Região do Segundo Anel de Reforço**

Nó	$\sigma_x$ [MPa]	$\sigma_y$ [MPa]	$\sigma_z$ [MPa]	$\tau_{xy}$ [MPa]	$\tau_{yz}$ [MPa]	$\tau_{xz}$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]	$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]	$\sigma_3$ [MPa]
43048	0,00	-15,53	7,35	0,00	15,40	0,00	33,47	15,09	0,00	-23,27
43049	0,00	-16,71	10,49	0,00	15,78	0,00	36,21	17,72	0,00	-23,94
43050	0,00	-15,53	12,20	0,00	16,61	0,00	37,51	19,97	0,00	-23,30
43071	0,00	-5,95	20,44	0,00	10,12	0,00	29,70	23,87	0,00	-9,38
43703	0,00	-16,71	10,49	0,00	-15,78	0,00	36,21	17,72	0,00	-23,94
43704	0,00	-15,53	12,20	0,00	-16,61	0,00	37,51	19,97	0,00	-23,30

**Tabela 5.17 - Tensões Equivalentes de von Mises em Componentes - Caso 4 - Malha Inicial**

Nó	$\sigma_x$ [MPa]	$\sigma_y$ [MPa]	$\sigma_z$ [MPa]	$\tau_{xy}$ [MPa]	$\tau_{yz}$ [MPa]	$\tau_{xz}$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]
6558	0,00	32,40	-41,64	0,00	-7,20	0,00	65,49
7428	0,00	-37,87	-6,34	0,00	-16,67	0,00	45,48

## 5.6 Caso 5

Para este Caso, as Tabelas que se seguem apresentam resultados do processamento do **Modelo**, sujeito às condições de contorno e de carregamento, descritas no item 3.4.5 do Capítulo 3, indicando valores de reações de apoio e de distribuição de tensões.

A Tabela 5.18 elenca as reações de apoio, a partir da liberação das pontas do **Fixo Traseiro** do Equipamento, considerado parado em superfície plana.

Nas Tabelas 5.19 e 5.20, indicam-se, no Sistema Global de Coordenadas, as componentes de tensão, tensão equivalente e tensões principais obtidas, respectivamente com o processamento do **Modelo** utilizando Malha Inicial e Malha Refinada, para os nós do **Casco** que representam áreas de concentração de tensão.

Da Tabela 5.21 constam magnitudes, no Sistema Global de Coordenadas, das componentes de tensão e tensão equivalente de von Mises, utilizando o **Modelo** com Malha Inicial, para nós que representam as regiões submetidas a concentração de tensão, localizados no **Anel de Reforço e Sela**.



**Tabela 5.18 Reações de Apoio – Caso 5**

Apoio	$F_x$ [N]	$F_y$ [N]	$F_z$ [N]	$M_x$ [Nm]	$M_y$ [Nm]	$M_z$ [Nm]
ID	20885,00					
IC	10053,00	0,00				
IE	20890,00					
IDD	54221,00					
IID	68771,00					
IVD			-1081,80			
IID	54220,00					
IID	68770,00					
IIE			1081,80			
IIE						
IIE						
IIE						
Total	0,00	297810,00	0,00	0,00	0,00	0,00

**Tabela 5.19 - Tensões no Casco - Caso 5 - Malha Inicial**

Nó	$\sigma_x$ [MPa]	$\sigma_y$ [MPa]	$\sigma_z$ [MPa]	$\tau_{xy}$ [MPa]	$\tau_{yz}$ [MPa]	$\tau_{xz}$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]	$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]	$\sigma_3$ [MPa]
5562	0,00	2,15	28,48	0,00	13,57	0,00	36,15	34,22	0,00	-3,59
5563	0,00	-29,67	-5,92	0,00	24,49	0,00	50,38	9,42	0,00	-45,01
5565	0,00	-11,78	30,46	0,00	15,60	0,00	46,42	35,59	0,00	-16,91
5567	0,00	-32,18	4,73	0,00	25,14	0,00	55,73	17,46	0,00	-44,91
5596	0,00	-43,69	13,24	0,00	0,81	0,00	51,63	13,26	0,00	-43,71
5597	0,00	-42,80	9,10	0,00	0,48	0,00	48,01	9,10	0,00	-42,81
5612	0,00	-39,50	10,45	0,00	-4,33	0,00	46,25	10,82	0,00	-39,87
5700	0,00	-18,82	34,66	0,00	14,12	0,00	52,97	38,16	0,00	-22,31
5750	0,00	-35,75	1,40	0,00	27,41	0,00	59,86	15,93	0,00	-50,28
5752	0,00	-19,73	30,63	0,00	17,48	0,00	53,37	36,10	0,00	-25,21
5753	0,00	-22,72	25,49	0,00	19,16	0,00	53,35	32,18	0,00	-29,41
5754	0,00	-36,66	15,19	0,00	29,50	0,00	68,87	28,54	0,00	-50,01
5759	0,00	-27,04	22,53	0,00	26,02	0,00	62,28	33,68	0,00	-38,19
5928	0,00	-27,60	-3,63	0,00	21,65	0,00	45,62	9,13	0,00	-40,36
5931	0,00	-15,31	20,89	0,00	14,76	0,00	40,55	26,15	0,00	-20,56
5932	0,00	-28,31	7,81	0,00	22,52	0,00	51,03	18,61	0,00	-39,12
5934	0,00	-10,73	-5,58	0,00	16,47	0,00	30,00	8,51	0,00	-24,82
5938	0,00	-6,63	21,95	0,00	15,50	0,00	37,30	28,74	0,00	-13,42
6044	0,00	-12,82	-5,29	0,00	11,90	0,00	23,44	3,43	0,00	-21,54
6048	0,00	-13,57	0,69	0,00	11,82	0,00	24,75	7,36	0,00	-20,24
6053	0,00	10,18	15,46	0,00	4,16	0,00	15,40	17,75	7,89	0,00
6129	0,00	-13,58	0,70	0,00	-11,82	0,00	24,77	7,37	0,00	-20,25
6158	0,00	-40,52	8,26	0,00	0,76	0,00	45,24	8,27	0,00	-40,54
6159	0,00	-36,85	8,12	0,00	3,71	0,00	42,01	8,43	0,00	-37,16
6173	0,00	-36,58	5,83	0,00	-3,99	0,00	40,41	6,20	0,00	-36,95
6235	0,00	-6,63	21,94	0,00	-15,50	0,00	37,30	28,73	0,00	-13,42

**Tabela 5.20 - Tensões no Casco - Caso 5 - Malha Refinada - Região do Segundo Anel de Reforço**

N6	$\sigma_x$ [MPa]	$\sigma_y$ [MPa]	$\sigma_z$ [MPa]	$\tau_{xy}$ [MPa]	$\tau_{yz}$ [MPa]	$\tau_{xz}$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]	$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]	$\sigma_3$ [MPa]
43048	0,00	-36,01	13,35	0,00	25,45	0,00	62,44	24,12	0,00	-46,78
43049	0,00	-34,88	24,92	0,00	26,12	0,00	68,95	34,73	0,00	-44,68
43050	0,00	-34,17	28,16	0,00	28,21	0,00	72,86	39,03	0,00	-45,04
43071	0,00	-27,00	35,07	0,00	23,16	0,00	67,19	42,76	0,00	-34,69
43703	0,00	-34,88	24,92	0,00	-26,12	0,00	68,95	34,73	0,00	-44,68
43704	0,00	-34,17	28,16	0,00	-28,20	0,00	72,86	39,03	0,00	-45,04

**Tabela 5.21 - Tensões Equivalentes de von Mises em Componentes - Caso 5 - Malha Inicial**

N6	$\sigma_x$ [MPa]	$\sigma_y$ [MPa]	$\sigma_z$ [MPa]	$\tau_{xy}$ [MPa]	$\tau_{yz}$ [MPa]	$\tau_{xz}$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]
6474	0,00	38,23	-51,16	0,00	-30,53	0,00	93,97
7502	0,00	-60,73	-8,70	0,00	-26,99	0,00	73,62

## 5.7 Caso 6

Neste Caso, bem como nos Casos 7 e 9, abordados em sequência, introduz-se a presença de esforços devidos à torção, considerando-se o Equipamento parado, em superfície plana, com a liberação assimétrica de Apoios, como descrito no item 3.4.6 do Capítulo 3.

Especificamente neste item, liberam-se, na direção vertical, os Apoios relativos às pontas esquerda do **Fixo Frontal**, esquerda e direita do **Fixo Intermediário**, sendo que as reações de apoio correspondentes, estão indicadas na Tabela 5.22.

Nas Tabelas 5.23 e 5.24, indicam-se, no Sistema Global de Coordenadas, as componentes de tensão, tensão equivalente e tensões principais obtidas, respectivamente com o processamento do Modelo utilizando Malha Inicial e Malha Refinada, para os nós do **Casco** que representam áreas submetidas a tensões de elevada magnitude, indicando pontos de concentração de tensão.

A Tabela 5.25 apresenta valores, no Sistema Global de Coordenadas, para componentes de tensão e tensão equivalente de von Mises, obtidos com a utilização do **Modelo com Malha Inicial**, para nós que representam as regiões submetidas a concentração de tensão, localizados no **Anel de Reforço e Sela**.

Tabela 5.22 - Reações de Apoio - Caso 6

Apoio	$F_x$ [N]	$F_y$ [N]	$F_z$ [N]	$M_x$ [Nm]	$M_y$ [Nm]	$M_z$ [Nm]
ID	20907,00					
IC	24250,00	0,00				
IE	50256,00					
IID	60675,00					
IVD	47828,00		-2617,90			
IIE	93896,00		2617,90			
Total	0,00	297810,00	0,00	0,00	0,00	0,00

**Tabela 5.23 - Tensões no Casco - Caso 6 - Malha Inicial**

Nó	$\sigma_x$ [MPa]	$\sigma_y$ [MPa]	$\sigma_z$ [MPa]	$\tau_{xy}$ [MPa]	$\tau_{yz}$ [MPa]	$\tau_{xz}$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]	$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]	$\sigma_3$ [MPa]
5562	0,00	-0,95	20,93	0,00	12,77	0,00	30,79	26,80	0,00	-6,83
5563	0,00	-14,38	-0,67	0,00	15,29	0,00	29,98	9,23	0,00	-24,28
5565	0,00	-6,79	15,07	0,00	10,77	0,00	26,89	19,48	0,00	-11,21
5567	0,00	-13,49	11,88	0,00	16,81	0,00	36,49	20,25	0,00	-21,87
5596	0,00	-14,61	8,88	0,00	0,61	0,00	20,57	8,89	0,00	-14,62
5597	0,00	-14,58	8,65	0,00	0,03	0,00	20,33	8,65	0,00	-14,58
5612	0,00	-11,73	8,91	0,00	-1,01	0,00	18,01	8,96	0,00	-11,78
5700	0,00	-7,54	22,39	0,00	11,69	0,00	33,71	26,41	0,00	-11,56
5750	0,00	-16,75	-0,05	0,00	18,10	0,00	35,53	11,53	0,00	-28,34
5752	0,00	-8,05	18,69	0,00	12,98	0,00	32,71	23,95	0,00	-13,31
5753	0,00	-15,97	-4,15	0,00	16,66	0,00	32,22	7,61	0,00	-27,73
5754	0,00	-15,39	14,86	0,00	20,00	0,00	43,43	24,81	0,00	-25,33
5759	0,00	-0,47	24,60	0,00	14,84	0,00	35,74	31,49	0,00	-7,36
5928	0,00	-17,06	4,47	0,00	16,36	0,00	34,50	13,29	0,00	-25,88
5931	0,00	-14,78	0,90	0,00	15,28	0,00	30,55	10,24	0,00	-24,11
5932	0,00	-12,58	21,40	0,00	19,03	0,00	44,41	29,92	0,00	-21,10
5934	0,00	-21,82	2,65	0,00	19,63	0,00	41,20	13,55	0,00	-32,71
5938	0,00	-19,44	18,09	0,00	22,00	0,00	50,08	28,24	0,00	-29,58
6044	0,00	-19,26	-0,83	0,00	15,54	0,00	32,86	8,02	0,00	-28,11
6048	0,00	-17,53	11,18	0,00	16,87	0,00	38,49	18,98	0,00	-25,32
6053	0,00	-9,63	17,60	0,00	14,99	0,00	35,31	24,24	0,00	-16,27
6129	0,00	-18,26	8,12	0,00	-13,83	0,00	33,49	14,04	0,00	-24,18
6158	0,00	-13,44	5,76	0,00	-0,22	0,00	17,07	5,77	0,00	-13,44
6159	0,00	-13,45	5,27	0,00	0,34	0,00	16,73	5,28	0,00	-13,46
6173	0,00	-12,14	5,22	0,00	-0,93	0,00	15,51	5,27	0,00	-12,19
6235	0,00	-27,89	2,61	0,00	-18,02	0,00	42,80	10,97	0,00	-36,25

**Tabela 5.24 - Tensões no Casco - Caso 6 - Malha Refinada - Região do Segundo Anel de Reforço**

N6	$\sigma_x$ [MPa]	$\sigma_y$ [MPa]	$\sigma_z$ [MPa]	$\tau_{xy}$ [MPa]	$\tau_{yz}$ [MPa]	$\tau_{xz}$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]	$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]	$\sigma_3$ [MPa]
43048	0,00	-13,29	12,24	0,00	18,14	0,00	38,41	21,65	0,00	-22,70
43049	0,00	-16,58	14,38	0,00	18,34	0,00	41,59	22,90	0,00	-25,11
43050	0,00	-15,21	15,52	0,00	19,38	0,00	42,84	24,89	0,00	-24,57
43071	0,00	-4,12	24,87	0,00	11,82	0,00	34,01	29,08	0,00	-8,33
43703	0,00	-11,39	13,41	0,00	-9,29	0,00	26,85	16,50	0,00	-14,48
43704	0,00	-10,61	16,03	0,00	-9,45	0,00	28,42	19,04	0,00	-13,62

**Tabela 5.25 - Tensões Equivalentes de von Mises em Componentes - Caso 6 - Malha Inicial**

N6	$\sigma_x$ [MPa]	$\sigma_y$ [MPa]	$\sigma_z$ [MPa]	$\tau_{xy}$ [MPa]	$\tau_{yz}$ [MPa]	$\tau_{xz}$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]
6558	0,00	33,48	-44,19	0,00	-6,58	0,00	68,43
7428	0,00	-43,76	-8,37	0,00	-19,37	0,00	52,38

## 5.8 Caso 7

As Tabelas apresentadas, neste Caso, indicam resultados obtidos mediante a utilização do **Modelo** de elementos finitos, submetido às condições de carregamento e de contorno descritas no item 3.4.7 do Capítulo 3, sendo relativos às reações de apoio e distribuição de tensões respectivas.

O que caracteriza, destacadamente, este Caso dos demais, é a liberação assimétrica de Apoios do Equipamento, considerado parado, na horizontal, sendo que, especificamente, estão livres, na direção vertical, as pontas esquerda do **Fixo Intermediário**, esquerda e direita do **Fixo Traseiro**. As reações de apoio correspondentes a esta condição são apresentadas na Tabela 5.26.

As componentes de tensão, tensão equivalente e tensões principais obtidas, correspondentemente, com o processamento do **Modelo** utilizando Malha Inicial e Malha Refinada, são indicadas, nas Tabelas 5.27 e 5.28, no Sistema Global de Coordenadas, para os nós do **Casco** que representam áreas submetidas a tensões elevadas, indicando os pontos de concentração de tensão.

Já a Tabela 5.29 mostra valores, no Sistema Global de Coordenadas, para componentes de tensão e tensão equivalente de von Mises, obtidos com o processamento do **Modelo** utilizando Malha Inicial, para nós que representam as regiões submetidas a concentração de tensão, localizados no **Anel de Reforço e Sela**.



Tabela 5.26 - Reações de Apoio - Caso 7

Apoio	$F_x$ [N]	$F_y$ [N]	$F_z$ [N]	$M_x$ [Nm]	$M_y$ [Nm]	$M_z$ [Nm]
IC	0,00	-4822,50				
IE		54324,00				
II		7925,70				
III		129750,00				
IV			-1040,30			
II		110640,00				
IV			1040,30			
IE						
IV						
Total	0,00	297810,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela 5.27 - Tensões no Casco - Caso 7 - Malha Inicial

Nó	$\sigma_x$ [MPa]	$\sigma_y$ [MPa]	$\sigma_z$ [MPa]	$\tau_{xy}$ [MPa]	$\tau_{yz}$ [MPa]	$\tau_{xz}$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]	$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]	$\sigma_3$ [MPa]
5562	0,00	9,40	40,05	0,00	15,05	0,00	44,68	46,21	3,24	0,00
5563	0,00	-33,60	-8,63	0,00	28,69	0,00	58,16	10,17	0,00	-52,40
5565	0,00	-12,40	34,11	0,00	17,99	0,00	52,06	40,25	0,00	-18,54
5567	0,00	-35,28	7,03	0,00	29,72	0,00	64,75	22,36	0,00	-50,61
5596	0,00	-44,08	12,42	0,00	0,53	0,00	51,44	12,43	0,00	-44,09
5597	0,00	-43,79	9,82	0,00	0,34	0,00	49,44	9,82	0,00	-43,79
5612	0,00	-40,89	9,88	0,00	-1,13	0,00	46,66	9,90	0,00	-40,91
5700	0,00	-19,58	37,28	0,00	17,32	0,00	58,34	42,14	0,00	-24,44
5750	0,00	-39,50	0,13	0,00	33,16	0,00	69,75	18,95	0,00	-58,32
5752	0,00	-21,45	32,78	0,00	21,29	0,00	59,98	40,14	0,00	-28,81
5753	0,00	-25,02	26,98	0,00	23,13	0,00	60,28	35,78	0,00	-33,82
5754	0,00	-37,46	24,03	0,00	36,41	0,00	82,81	40,94	0,00	-54,36
5759	0,00	-21,27	37,02	0,00	30,95	0,00	74,06	50,39	0,00	-34,64
5928	0,00	-30,32	-4,25	0,00	27,25	0,00	55,10	12,92	0,00	-47,49
5931	0,00	-25,15	-6,40	0,00	23,59	0,00	46,71	9,61	0,00	-41,16
5932	0,00	-26,62	19,06	0,00	29,54	0,00	64,79	33,56	0,00	-41,12
5934	0,00	14,13	38,75	0,00	13,25	0,00	40,99	44,52	8,36	0,00
5938	0,00	-2,17	36,44	0,00	21,82	0,00	53,29	46,26	0,00	-12,00
6044	0,00	-16,18	-8,06	0,00	16,63	0,00	32,03	5,00	0,00	-29,24
6048	0,00	-14,26	5,70	0,00	17,28	0,00	34,83	15,68	0,00	-24,24
6053	0,00	18,37	29,44	0,00	7,30	0,00	28,69	33,06	14,74	0,00
6129	0,00	-3,81	13,48	0,00	-4,51	0,00	17,57	14,59	0,00	-4,92
6158	0,00	-40,84	7,14	0,00	0,56	0,00	44,85	7,15	0,00	-40,85
6159	0,00	-40,64	5,14	0,00	0,32	0,00	43,45	5,15	0,00	-40,65
6173	0,00	-37,89	4,33	0,00	-0,95	0,00	40,26	4,35	0,00	-37,91
6235	0,00	-8,27	12,96	0,00	-6,66	0,00	21,83	14,87	0,00	-10,18

**Tabela 5.28 - Tensões no Casco - Caso 7 - Malha Refinada - Região do Segundo Anel de Reforço**

Nó	$\sigma_x$ [MPa]	$\sigma_y$ [MPa]	$\sigma_z$ [MPa]	$\tau_{xy}$ [MPa]	$\tau_{yz}$ [MPa]	$\tau_{xz}$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]	$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]	$\sigma_3$ [MPa]
43048	0,00	-31,37	25,09	0,00	31,54	0,00	73,38	39,19	0,00	-45,47
43049	0,00	-37,81	30,45	0,00	31,92	0,00	81,03	43,05	0,00	-50,41
43050	0,00	-36,70	33,00	0,00	34,51	0,00	84,97	47,20	0,00	-50,89
43071	0,00	-24,82	45,57	0,00	26,30	0,00	76,80	54,31	0,00	-33,56
43703	0,00	-31,75	20,66	0,00	-20,28	0,00	57,67	27,59	0,00	-38,68
43704	0,00	-31,47	24,65	0,00	-21,86	0,00	61,70	32,16	0,00	-38,98

**Tabela 5.29 - Tensões Equivalentes de von Mises em Componentes - Caso 7 - Malha Inicial**

Nó	$\sigma_x$ [MPa]	$\sigma_y$ [MPa]	$\sigma_z$ [MPa]	$\tau_{xy}$ [MPa]	$\tau_{yz}$ [MPa]	$\tau_{xz}$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]
6474	0,00	43,11	-55,43	0,00	-31,93	0,00	101,87
7502	0,00	-70,10	-9,83	0,00	-33,02	0,00	87,13

## 5.9 Caso 8

Neste item, as Tabelas seguintes apresentam os resultados obtidos para as reações de apoio e distribuição de tensões, considerando o **Modelo** submetido às condições de carregamento e contorno que compõem o Caso 8, descrito no Capítulo 3, item 3.4.8.

Identicamente ao Caso 5, liberam-se, nesta simulação, os dois Apoios do **Eixo Traseiro** do Equipamento, agora porém, com a superfície interna do **Vaso** submetida a um gradiente composto de pressão, como descrito no Capítulo 3, representando o carregamento do líquido na situação em que o **Semi-Reboque Tanque** sofre uma desaceleração na sua direção longitudinal, ao deslocar-se em linha reta, no plano, para a frente.

Verifica-se, na Tabela 5.30, através das magnitudes das reações de apoio apresentadas, que ocorre uma sobrecarga da parte frontal do Equipamento devida à simulação da frenagem acima descrita, sendo que o Apoio IC, localizado no **Pino Rei**, apresenta uma reação na direção X da ordem de 112000 N, consequência da condição de operação representada no **Modelo**.

Entretanto, constata-se, através da Tabela 5.31 que a máxima tensão equivalente de von Mises, para o **Casco**, na região do **Segundo Anel de Reforço**, utilizando-se Malha Refinada, neste Caso, é de magnitude inferior, se comparada com aquelas obtidas para o Caso 5, que considera o Equipamento parado, com o gradiente de pressão atuando na vertical (eixo Y).

Devido a este fato, desconsidera-se o Caso 8 tanto no que se refere à verificação da possibilidade de ocorrência de falha por escoamento, como quanto à verificação da vida em fadiga. Indica-se, entretanto, na Tabela 5.31, o máximo valor de tensão equivalente que conduz a esta decisão.

N6	$\sigma_x$ [MPa]	$\sigma_y$ [MPa]	$\sigma_z$ [MPa]	$\tau_{xy}$ [MPa]	$\tau_{yz}$ [MPa]	$\tau_{xz}$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]
43050	0,00	-30,00	24,38	0,00	26,98	0,00	66,40

Região do Segundo Anel de Reforço - Malha Refinada

Tabela 5.31 - Tensão Equivalente de von Mises no Casco - Caso 8

Apio	$F_x$ [N]	$F_y$ [N]	$F_z$ [N]	$M_x$ [Nm]	$M_y$ [Nm]	$M_z$ [Nm]
ID	31540,00					
IC	8985,20					
IE	31541,00					
ID	49687,00					
IID	63206,00					
IVD	-995,91					
III	49687,00					
III	63206,00					
IVE	995,91					
Total	112000,00	297850,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela 5.30 - Reações de Apoio - Caso 8

## 5.10 Caso 9

As Tabelas apresentadas neste item, indicam os resultados obtidos para reações de apoio e distribuição de tensões, considerando o **Modelo** submetido às condições de apoio e carregamento e contorno que compõem o Caso 9, descrito no Capítulo 3, item 3.4.9.

Identicamente ao Caso 7, liberam-se, na direção vertical, as pontas esquerda do **Eixo Intermediário**, esquerda e direita do **Eixo Traseiro** do Equipamento, agora considerando-se que a superfície interna do **Vaso**, é submetida a um gradiente composto de pressão, como descrito no Capítulo 3, simulando o carregamento do líquido na situação em que o **Semi-Reboque Tanque** sofre uma frenagem, ao deslocar-se em linha reta, no plano, para a frente.

Na Tabela 5.32 observa-se, mediante análise das reações de apoio, que há uma sobrecarga da região frontal do Equipamento, devida à simulação da frenagem anteriormente descrita, com o Apoio IC, localizado no **Pino Rei**, apresentando reação, na direção X, de magnitude 112000 N, como no Caso precedente.

Porém, constata-se, através da Tabela 5.33 que a máxima tensão equivalente de von Mises, para o **Casco**, na região do **Segundo Anel de Reforço**, utilizando-se Malha Refinada, neste Caso, apresenta valor inferior, se comparada com aquelas obtidas para o Caso 7, que considera o Equipamento parado, com o gradiente de pressão atuando na vertical (eixo Y).

Esse resultado, leva à descon sideração do Caso 9 tanto em relação à análise da possibilidade de ocorrência de falha por escoamento, como quanto à verificação da vida em fadiga. Indica-se, entretanto, na Tabela 5.33, o máximo valor de tensão equivalente que fundamenta a decisão tomada.

Nº	$\sigma_x$ [MPa]	$\sigma_y$ [MPa]	$\sigma_z$ [MPa]	$\tau_{xy}$ [MPa]	$\tau_{yz}$ [MPa]	$\tau_{xz}$ [MPa]	$\sigma_e$ [MPa]
43050	0,00	-32,32	28,83	0,00	32,77	0,00	77,65

Região do Segundo Anel de Reforço - Malha Refinada

Tabela 5.33 - Tensão Equivalente de von Mises no Casco - Caso 9

Apóio	$F_x$ [N]	$F_y$ [N]	$F_z$ [N]	$M_x$ [Nm]	$M_y$ [Nm]	$M_z$ [Nm]
ID	5889,20					
IC	8256,40					
IE	55781,00					
ID	7130,10					
IID	119250,00					
IVD			-957,73			
IE		101550,00				
IVE			957,73			
Total	112000,00	297850,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela 5.32 - Reações de Apoio - Caso 9

## Capítulo 6

### Análise dos Resultados

#### 6.1 Fundamentação Conceitual para a Análise a Ser Desenvolvida

Neste Capítulo, inicialmente, procede-se à análise do projeto do Equipamento, através da comparação da magnitude de tensões máximas equivalentes em relação à tensão limite de escoamento, propriedade do material construtivo, verificando-se o denominado Coeficiente de Segurança ao escoamento para algumas regiões da Estrutura, incluindo Casco, Anéis de Reforço e Selas. Utiliza-se, para tal, o Critério da Máxima Energia de Distorsão ou, como usualmente denominado, Critério de von Mises, que é adequado para materiais ducteis, como os que compõem o Equipamento estudado.

Assim, as tensões máximas equivalentes de von Mises atuantes nas partes do Casco, Anéis de Reforço e Selas do Semi-Reboque Tanque, obtidas pelo Método dos Elementos Finitos, são comparadas com os valores de tensão limite de escoamento do respectivo material empregado na sua fabricação.

Dessa comparação obtém-se um valor estimado do Coeficiente de Segurança empregado no projeto estrutural dos componentes supracitados, considerando-se as condições de contorno e carregamento adotadas como representativas das situações reais de operação do Equipamento. Esta estimativa do Coeficiente de Segurança está relacionada com os esforços estáticos atuantes na Estrutura, não sendo considerada a possibilidade de ocorrência de amplificação dinâmica na análise que se desenvolve.

Salienta-se que os resultados da verificação relativa à falha por escoamento para os componentes Anel de Reforço e Sela, devem ser interpretados como preliminares pois são obtidos, através do Modelo de Elementos Finitos, com a utilização da chamada Malha Inicial, sem que seja enfocada, especificamente, a questão de sua convergência e



precisão, função principalmente da densidade do reticulado de elementos finitos

adotado.

Sendo o objetivo principal do Trabalho a análise de falha através do mecanismo de fadiga, concentram-se as atenções no refinamento da malha do **Casco**, nas proximidades de sua junção com o **Anel de Reforço**, sendo este refinamento, adotado somente na região determinada como crítica quanto a amplitude de tensão equivalente, como é visto mais à frente.

Os resultados da análise de falha por escoamento, ainda que fundamentados nos valores de tensão equivalente obtidos com a Malha Inicial, têm valor significativo, sobretudo quanto ao aumento da compreensão do problema estudado, permitindo a avaliação do comportamento dos estados de tensão nos vários detalhes estruturais que compõem o Equipamento, fornecendo subsídios para a continuidade futura desta Pesquisa.

No que tange às condições de carregamento e contorno adotadas nos vários Casos estudados, sendo estas uma representação da situação real de operação do Equipamento, obviamente incluem simplificações que, no entanto, obedecem a critérios de coerência técnica, dentro de uma filosofia de tornar os resultados o mais próximo possível daqueles que seriam obtidos a partir de um teste de campo que levantasse as cargas reais atuantes sobre a Estrutura. Cabe destacar que, mesmo um teste de campo baseia-se em condições adotadas como típicas da operação do equipamento, podendo deixar de incluir eventuais situações não usuais de sobrecarga do mesmo que conduziriam a solicitações extremas e a um possível comprometimento de sua integridade estrutural.

O cálculo de Coeficientes de Segurança permite, dentre outras análises possíveis, visualizar o grau de robustez do Equipamento e verificar, por exemplo, a presença de níveis exagerados de segurança ou, pelo contrário, situações limites quanto a possibilidade de ocorrência de deformações plásticas.

Em seguimento, procede-se à verificação da vida em fadiga de um detalhe estrutural do Equipamento, mais especificamente, na região de intersecção do **Casco** com os **Anéis de Reforço**, localizados sobre o **Carro da Suspensão**, utilizando-se, na estimativa desta vida, os Métodos ASME e de Sines.

de tensão equivalente, em função dos resultados, indicados no Capítulo 5, obtidos com O procedimento utilizado nesta Dissertação inclui a determinação da amplitude

submetido o objeto de estudo, que corresponde à metade da flutuação de tensão. ordenadas, os valores de  $\sigma_a$ , ou seja, a amplitude de tensão alternada a que está de abscissas, valores de vida em número de ciclos de carregamento  $N_e$ , no eixo de ASME [6], anteriormente citado e apresentada na Figura 6.1. Esta Curva indica, no eixo para aços inoxidáveis da série 3XX - aços cromo-molibdênio - publicada no Código Em ambos os casos utiliza-se, para verificação da vida em fadiga, a Curva S-N

submetidos a condições de carregamento multiaxiais. Método de Langer, também destinado à verificação da vida em fadiga de equipamentos ASME Seção VIII Divisão 2 [6], baseado, segundo FUCHS e STEPHENS [27], no Método de Sines e, posteriormente, utiliza-se o método recomendado pelo Código carregamento multiaxiais, denominado, como indicado em FUCHS e STEPHENS [27], baseada na avaliação das tensões equivalentes média e alternada em condições de empregados dois critérios de análise. Em primeiro lugar, emprega-se a abordagem como ao executar o cálculo da vida em fadiga, com o uso da Malha Refinada, são Tanto ao utilizar a Malha Inicial, para determinar a região crítica da Estrutura, do Equipamento.

Malha Refinada, através da qual, posteriormente, elabora-se o cálculo da vida em fadiga ao refinamento do reticulado de elementos finitos dessa área, obtendo-se a chamada Determinado o nó crítico e sua região correspondente na Estrutura, procede-se flutuações de tensão.

região, é submetido à maior amplitude de tensão equivalente, calculada com base nas determinação é feita através da verificação de qual nó do Modelo, pertencente a esta crítico é aquele submetido à amplitude de tensão equivalente de maior magnitude e sua compõem os Casos estudados, os quais são descritos no Capítulo 3. O detalhe estrutural ocorrência, de forma sequencial, das condições de carregamento e contorno que baseado-se na análise da amplitude de tensão equivalente, considerando-se a intersecções entre Casco e Anéis de Reforço apresenta tendência à falha por fadiga, de maiores dimensões, para determinar o detalhe estrutural crítico, ou seja, qual das Para esta verificação, primeiramente, utiliza-se a Malha Inicial, com elementos

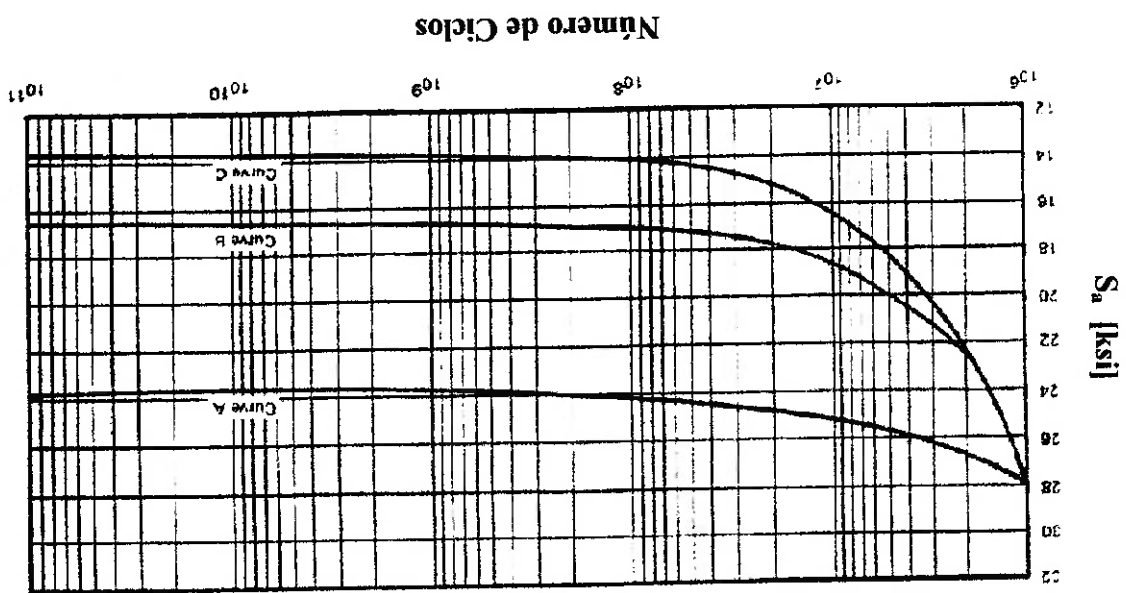
o processamento do Modelo de Elementos Finitos, para as diversas condições de carregamento e de contorno que compõem os Casos adotados.

Assim, a vida em ciclos de carregamento, da Estrutura ou Componente, é determinada através da Curva S-N, utilizando-se, como dado de entrada, o valor da amplitude de tensão equivalente  $\sigma_a$ , calculado por um dos Métodos anteriormente mencionados.

Para o cálculo através do Método de Sines, a amplitude de tensão equivalente é corrigida, segundo a abordagem de Goodman, para levar em conta a influência da tensão média.

A metodologia de cálculo da vida em fadiga, baseada na utilização da Curva S-N, está relacionada à teoria do acúmulo de dano e da fadiga de alto ciclo que, em

**Figura 6.1 – Curva de Projeto a Fadiga - S-N - para Aços Liga da Série 3XX Conforme ASME Seção VIII, Divisão 2 [6]**  
**Curva B**



rápidas palavras, considera que a estrutura sofre um dano cumulativo, a cada ciclo de tensão aplicado, mesmo que o valor dessa tensão seja inferior ao limite de escoamento do material. O somatório dos ciclos de tensão aplicada, correspondentes a cada magnitude de tensão, tem efeito detrimental cumulativo sobre a estrutura, agindo de maneira limitante sobre a vida do material.

Para a análise de fadiga, verificam-se regiões do Casco que apresentaram concentração de tensão, tal como observa-se nos resultados incluídos no Capítulo 5, as quais coincidem com as que frequentemente apresentam trincas, como indicam as Figuras 1.3, 1.4 e 1.5, constantes do Capítulo 1.

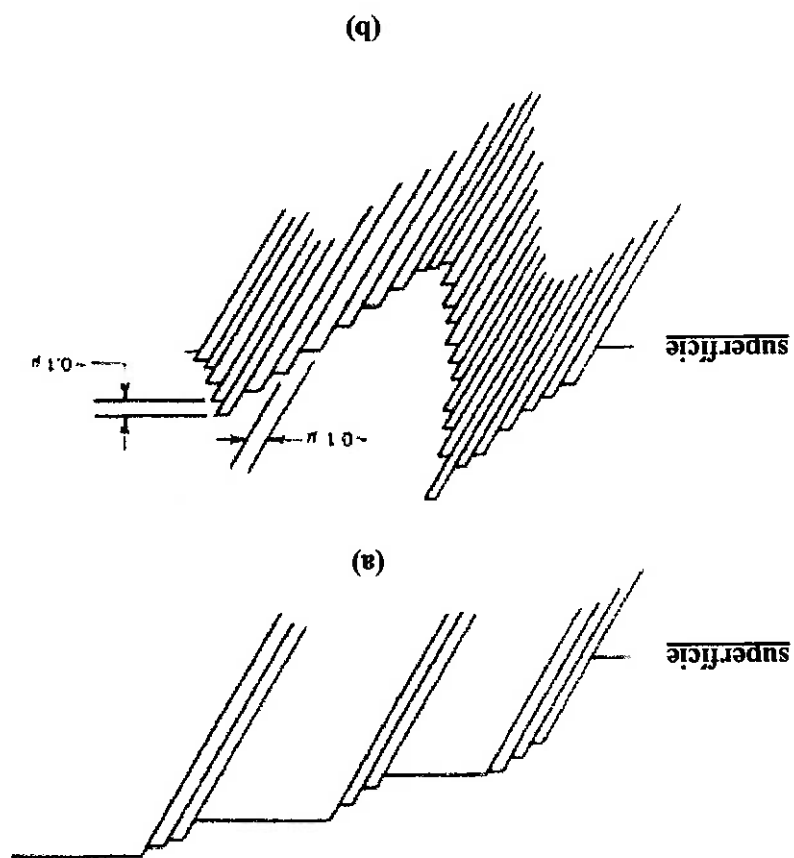
Conforme COLLINS [20] e FUCHS e STEPHENS [27] o fenômeno da fadiga, sob o ponto de vista da mecânica da fratura, pode ser dividido em duas fases distintas: nucleação e propagação de trincas.

A primeira delas dá-se pela presença, nos materiais comercialmente disponíveis para construção mecânica, de imperfeições em sua estrutura, como inclusões, descontinuidades e diferenças de orientação do reticulado cristalino nos contornos de grãos, dentre outras, que originam os chamados planos preferenciais de deslizamento. Quando a máxima tensão de cisalhamento, resultante de um carregamento aplicado, coincide com estes planos preferenciais de deslizamento, a estrutura cristalina do material fica sujeita à ocorrência de deslocamentos relativos, de ordem microscópica, entre suas partes constitutivas, o que pode dar origem à nucleação de trincas, como observado na Figura 6.2.

A nucleação da trinca ocorre, quase que invariavelmente, em ponto de máxima tensão equivalente de von Mises e na região da superfície do material. Seu início de crescimento, denominado fase de nucleação, dá-se, ao longo de uns poucos grãos, segundo a direção da máxima amplitude de tensão de cisalhamento. Numa fase subsequente, denominada de propagação propriamente dita, esta ocorre controlada por e na direção perpendicular à máxima amplitude de tensão de tração, o que pode ser visualizado na Figura 6.3. Na maioria das vezes, o crescimento da trinca dá-se através dos grãos, denominando-se transcristalino, como mostrado na Figura mencionada; entretanto, pode também ocorrer ao longo dos contornos de grãos, embora não tão frequentemente, denominando-se, neste caso, intercristalino.

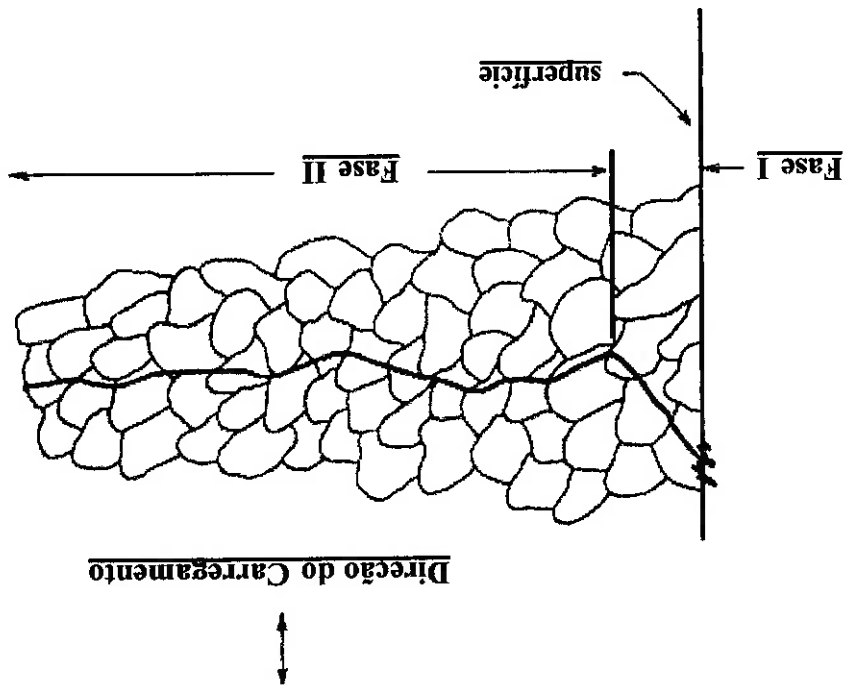
Segundo FUCHS e STEPHENS [27], o mecanismo de fadiga em aços de alta resistência ou metais frágeis, pode não apresentar a formação de planos de deslizamento. Microtrincas formam-se, com frequência, diretamente nas descontinuidades, tais como inclusões ou vazios e propagam-se ao longo de planos de máxima tensão de tração.

**Figura 6.2 - Efeitos do Deslizamento de Planos Preferenciais na Superfície Livre de um Material, Conforme FUCHS e STEPHENS [27] - Cargas Externas (a) Estáticas (b) Cíclicas**



Por outro lado, o caso ora em estudo diz respeito, sobretudo, a regiões soldadas onde, certamente, desde a execução da soldagem, existem microtrinças, além de defeitos como inclusões, vazios, eventuais regiões com falta de penetração e outros que, via de regra, são mantidos em níveis aceitáveis, estabelecidos por normas que garantem o controle da qualidade, mas que, efetivamente, estão presentes, desde a fabricação do Equipamento, sendo considerados agentes que podem precipitar a ocorrência de falha por fadiga, durante sua utilização.

A análise de fadiga, objetivo central desta Dissertação, diz respeito, portanto, à verificação da nucleação de pequenas trinças, devidas aos esforços envolvidos e à presença de defeitos, sobretudo na região do cordão de solda, não detectados nas inspeções de fabricação ou que, nessa fase, encontram-se dentro das tolerâncias



**Figura 6.3 - Direção de Propagação de Trinca Transcrisitalina**  
**Conforme FUCHS e STEPHENS [27]**

permitidas por norma, mas que induzem concentrações de tensão localizadas, as quais potencializam o processo de falha por fadiga. Assume-se, portanto, no tipo de análise que ora se desenvolve, conforme OSGOOD [39], que a falha é tomada em termos da nucleação de trincas, sem que considere-se sua propagação.

A respeito da fase de propagação de trincas, a bibliografia clássica sobre análise de fadiga, constante das referências [20], [27] e [42], define três Modos de Propagação, conforme a relação entre direção do esforço aplicado e direção de propagação da trinca. Como pode ser visto na Figura 6.4, o Modo I corresponde à propagação da trinca na direção perpendicular à de ação do carregamento alternado, sendo caracterizada pela ocorrência de movimentos sequenciais de abertura e fechamento da mesma. No Modo II, o esforço aplicado é na direção paralela ao comprimento da trinca, impondo uma tendência de deslizamento (cisalhamento) entre as duas faces, paralelamente ao seu comprimento. Já no Modo III, o esforço aplicado é na direção transversal ao comprimento da trinca, impondo um movimento de cisalhamento, mas na direção perpendicular ao seu comprimento.

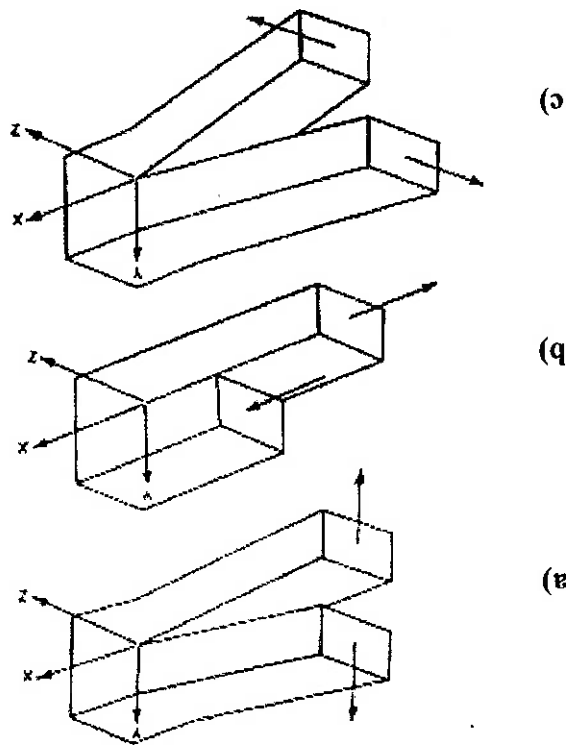
COLLINS [20] menciona o Modo I como o mais agressivo para estruturas e, ao observarmos as Figuras 1.3, 1.4 e 1.5 verifica-se que, na região crítica estudada, mais especificamente nas linhas de solda circunferenciais dos Anéis de Reforço, a propagação da trinca se dá ao longo do cordão de solda, perpendicularmente à direção longitudinal do Vaso, com tendência também a penetrar através da espessura da chapa, provavelmente devido aos esforços de tração longitudinais atuantes no Equipamento, muito embora a ocorrência de ovalização, devido à ação do peso próprio do líquido transportado, também possa induzir a manifestação do Modo III de propagação.

Isto condiz com o fato de que, a rigor, tem-se um caso de fadiga multiaxial, ou seja, a Estrutura, de secção transversal circular, apresenta suas soldas circunferenciais submetidas a tensões multiaxiais, que influenciam a propagação da trinca, na realidade, uma provável composição dos Modos I, II e III.

A Curva S-N, empregada nesta análise de fadiga, é assumida como sendo para a fase de nucleação de trincas, sem que seja feita qualquer consideração sobre sua propagação. Os corpos de prova usualmente adotados para traçagem de Curvas S-N, por apresentarem dimensões reduzidas, levam em conta somente a fase de nucleação da trinca, pois tais características dimensionais fazem com que, uma vez nucleada a trinca,

sua propagação se dê muito rapidamente, em comparação com o período de nucleação, em um curto intervalo de tempo, a ruptura do corpo de prova. No caso particular de juntas soldadas, a utilização da Curva S-N merece atenção especial, uma vez que o processo de fadiga destas uniões é muito dependente de sua geometria, cuja influência é bastante significativa sobre a distribuição de tensões da região estudada. Adicionalmente, como já citado, a presença do cordão de solda introduz defeitos físicos, como porosidades, incrustações e tensões residuais que influenciam o processo de fadiga.

**Figura 6.4 - Modos de Deslocamento de Trinca - (a) Modo I; (b) Modo II e (c) Modo III, Segundo ROLFE e BARSOM [42]**





Dessa forma, a Curva S-N para estruturas soldadas, muitas vezes, é determinada para uma dada geometria específica e com dimensões mais próximas das encontradas em componentes estruturais reais, como apresentado no “Welding Handbook” da “American Welding Society” (AWS) [15], fornecendo, de uma forma simples, a resistência à fadiga de um determinado tipo de junta soldada, já considerando a presença das imperfeições mencionadas e, implicitamente, o tempo de propagação até a ruptura. Adicionalmente, há três outros aspectos de importância que devem ser esclarecidos, como segue:

O primeiro deles é que, na análise a ser desenvolvida no item 6.4, considere-se, como prática sedimentada e conceitualmente firme, que as propriedades, relativas ao ensaio monotônico de tração do material empregado no cordão de solda, são iguais ou melhores que as do material base.

Em segundo lugar, deve-se destacar que a Curva S-N utilizada, conforme SURSH [50] e o próprio Código ASME [6], levantada em laboratório, com o emprego de corpo de prova de dimensões reduzidas e com a presença de união soldada, representa a vida em fadiga para a tensão atuante localmente, na região do cordão de solda, considerado sem defeitos. A presença de tais defeitos no cordão de solda aumenta a magnitude das solicitações locais, causando uma concentração de tensão no mesmo.

O terceiro e último dos aspectos a mencionar, é que a distribuição de tensões no local da solda é influenciada pela geometria das partes unidas e pelo tipo e espessura do próprio cordão de solda, inserido entre elas.

Fazendo-se uma analogia com modelos de análise de fadiga de uniões soldadas para estruturas tubulares apresentados por entidades normativas como “British Standard” (BS) e “American Welding Society” (AWS), dentre outras citadas na publicação de referência [19], tem-se uma elevação da tensão no Casco, na região de sua junção com o Anel de Reforço. Esta elevação a partir da tensão nominal no Casco, definida como aquela atuante na região entre Anéis de Reforço, distante suficientemente destes, pode ser entendida como uma soma de parcelas, devidas ao aumento da tensão causado pela variação localizada da geometria da Estrutura, ou seja, pela existência do Anel de Reforço e pela própria presença do cordão de solda.

Para considerar, especificamente, a concentração de tensão no cordão de solda, devida à presença de defeitos oriundos do processo de soldagem, não considerados no

presente **Modelo**, introduz-se, como será visto detalhadamente no item 6.4.2, o chamado Fator de Concentração de Tensão  $K_f$ , conforme proposto por MITCHELL [34].

Como já mencionado, a Curva S-N utilizada para esta análise leva em conta a existência do cordão de solda, no corpo de prova empregado nos ensaios que lhe dão origem, porém não considera a ocorrência de defeitos na solda, os quais atuam, como concentradores de tensão. E, portanto, necessário, na verificação da vida em fadiga, considerar este fato, através da introdução, nos cálculos, do Fator de Concentração de Tensão  $K_f$ .

## 6.2 Metodologia para Seleção de Pontos Críticos

A seleção dos pontos da Estrutura, sujeitos à maior concentração de tensão, para análise quanto a ocorrência de falha por escoamento, é feita considerando-se, para cada Caso analisado, composto de condições de carregamento e de contorno específicas, o **Modelo**, cuja tensão equivalente, calculada pelo critério de von Mises, é a mais elevada, respectivamente para o **Casco**, **Anel de Reforço** e **Sela**. Estes valores, dentre outros, estão indicados nas tabelas inseridas no Capítulo 5.

Na análise de fadiga, inicialmente, são verificados, através do **Modelo** e para cada Caso em estudo, os nós do **Casco** com tensão equivalente de von Mises mais elevada, nas regiões correspondentes a cada um dos quatro **Anéis de Reforço** montados na região sobre o **Carro da Suspensão do Semi-Reboque Tanque**. Em seguida, verifica-se o comportamento, quanto às flutuações de tensão, para cada um desses nós, levando-se em conta a ocorrência, em uma forma sequencial, dos diversos Casos, envolvendo condições específicas de carregamento e contorno, considerados nesta Pesquisa.

De posse dos nós e de suas respectivas flutuações de tensão, utilizam-se os **Métodos de Sines** e de **Langer** para verificação da vida em fadiga, tanto na sequência de Casos com esforços predominantes de flexão como na sequência de Casos com a introdução de esforços de torção.

Este procedimento é executado, primeiramente, com a denominada **Malha Inicial**, para determinação da região crítica quanto a flutuações de tensão. Determinada tal região, procede-se ao refinamento da malha, com base na aferição descrita no Capítulo 4, e refaz-se o cálculo verificando-se a vida em fadiga.

As tensões equivalentes e tensões principais para os nós do **Casco**, considerados para o estudo de fadiga, estão indicadas nas Tabelas 5.4, 5.11, 5.15, 5.19, 5.23 e 5.27, para o cálculo utilizando-se Malha Inicial e nas Tabelas 5.5, 5.12, 5.16, 5.20, 5.24 e 5.28, relativas ao cálculo com o uso da Malha Refinada, na região determinada como crítica.

### **6.3 Análise Quanto à Possibilidade de Falha por Escocamento**

#### **6.3.1 Determinação das Tensões Críticas**

##### **6.3.1.1 Caso 1**

Neste Caso 1 verifica-se, através da Tabela 5.4 do Capítulo 5, que a máxima tensão equivalente de von Mises para o **Casco** surge na lateral do Equipamento, na região relativa ao **Segundo Anel de Reforço** - nó 5754 (e seu simétrico) - com valor de 49,95 MPa. Este nó situa-se na transição entre o citado **Anel** e o **Empalme** sobre o qual é soldado.

Como trata-se da região do **Segundo Anel de Reforço**, pode-se verificar, através da Tabela 5.5, que com a Malha Refinada, o mesmo Caso 1 apresenta o nó 43050 (e seu simétrico 43704) como crítico quanto à falha por escocamento, cuja tensão equivalente, calculada pelo critério de von Mises, atinge magnitude de 51,79 MPa. Estes nós estão situados, respectivamente, nas laterais direita e esquerda do Equipamento, também na linha de transição entre **Anel** e **Empalme**, na mesma área de ocorrência do nó crítico, considerando-se a utilização da Malha Inicial.

Cabe lembrar que os mencionados nos situam-se sobre a região da **Segunda**

**Travessa do Chassis**, a qual recebe esforços provenientes dos **Primeiro e Segundo**

**Eixos do Equipamento**.

Os **Anéis de Reforço**, cujo material de construção é aço inoxidável, estão

sujeitos a tensões equivalentes que podem atingir valores da ordem de 72,09 MPa, como indica a Tabela 5.6, para o caso do **Terceiro Anel de Reforço**, no 6558 e seu simétrico,

situados respectivamente, nas regiões das laterais direita e esquerda do Equipamento.

Nas junções das laterais das **Selas** com suas respectivas faces frontais ou

traseiras, verificam-se tensões equivalentes que podem atingir magnitude de

52,02 MPa, como no caso da **Terceira Sela**, no 7428 e seu simétrico, conforme

Tabela 5.6.

### 6.3.1.2 Caso 2

As condições de carregamento e de contorno deste Caso, que considera o

Equipamento vazio, com todos os Apoios em contato, respectivamente, com o solo e

com a Quinta Roda, induzem tensões bastante reduzidas na Estrutura o que, do ponto de

vista da ocorrência de falha por escoamento, apresenta pouca relevância.

Nesta fase do Estudo, portanto, nenhuma conclusão adicional é tirada, além de

que o peso próprio do Equipamento, conforme **Modelo**, que excetua componentes

acessórios, como já descrito, é de 27865 N, o que equivale a 2,85 t aproximadamente,

como pode ser observado na Tabela 5.7.

A relevância deste Caso surgiria se fosse adotado, como critério de análise de

fadiga, um ciclo em termos do número de viagens do Equipamento, ou seja, abrangendo

uma fase em que o mesmo se desloca vazio e outra, em que se desloca totalmente

carregado.

Nesta condição, a máxima tensão equivalente de von Mises no Casco surge na

lateral do Equipamento, na linha de transição do Terceiro Anel de Reforço com o Empalme respectivo. Como pode ser verificado na Tabela 5.11 do Capítulo 5, o nó 5938 (e seu simétrico 6235) apresenta tensão equivalente da ordem de 54,29 MPa.

Para os Anéis de Reforço, encontra-se, na Tabela 5.13, tensão equivalente máxima de 73,23 MPa, relativa ao nó 6558, localizado na Quina do Terceiro Anel de Reforço, na lateral direita do Equipamento, e ao seu simétrico 7007, na lateral esquerda respectiva.

Nas Selas, observa-se tensão equivalente de von Mises máxima de 59,08 MPa, conforme Tabela 5.13, relativa ao par de nós simétricos 7428 e 7378, localizados na junção da face lateral direita da Terceira Sela com sua face frontal, respectivamente do lado direito e esquerdo do Conjunto.

#### 6.3.1.4 Caso 4

A partir da Tabela 5.15, verifica-se que a máxima tensão equivalente de von Mises para o Casco surge transição entre o Terceiro Anel de Reforço e o Empalme respectivo, mais especificamente nos pontos relativos aos nós 5938 e seu simétrico 6235, com valor de 43,68 MPa, situados, respectivamente, nas laterais direita e esquerda do Equipamento.

Uma tensão equivalente de magnitude 65,49 MPa é observada na Tabela 5.17, como valor máximo, no Terceiro Anel de Reforço, na linha de dobra para formar seu perfil “U”, nas laterais direita e esquerda, respectivamente, do Equipamento, nos pontos correspondentes aos nós 6558 e seu simétrico 7007.

Na junção da superfície lateral direita da Terceira Sela com a sua face frontal, verifica-se, na Tabela 5.17, tensão máxima equivalente de magnitude 45,48 MPa,

relativa aos nós 7428 e seu simétrico 7378, localizado em posição equivalente, na lateral esquerda do citado detalhe construtivo.

### 6.3.1.5 Caso 5

Verifica-se, através da Tabela 5.19 que, na superfície do Casco, as tensões equivalentes mais elevadas são da ordem de 68,87 MPa, relativas ao nó 5754 e seu simétrico, nó 5850, localizados, respectivamente, nas laterais direita e esquerda do Equipamento, na transição do Segundo Anel de Reforço com o Empalme correspondente.

Novamente, dispõe-se da Malha Refinada para o Casco, uma vez que trata-se da região do Segundo Anel de Reforço, na qual tem-se para o Caso em curso, máxima tensão equivalente, pelo critério de von Mises, com magnitude de 72,86 MPa, relativa aos nós 43050 e seu simétrico 43704, como constata-se na Tabela 5.20.

Nos Anéis que reforçam a estrutura do Casco, como ilustra a Tabela 5.21, tem-se uma tensão equivalente de magnitude 93,97 MPa, correspondente ao nó 6474 e ao seu simétrico, nó 6926, também na dobra que forma o perfil "U" do Segundo Anel de Reforço, respectivamente na lateral direita e esquerda do Conjunto.

A máxima tensão equivalente nas Selas, ocorre na junção da face lateral com a respectiva face frontal da Segunda Sela sobre o Carro da Suspensão, para o par de nós correspondentes 7502, situado na lateral direita e 7452, localizado na lateral esquerda do Equipamento, apresentando valor da ordem de 73,62 MPa, como indica a Tabela 5.21.

### 6.3.1.6 Caso 6

Neste e nos Casos 7 e 9, posteriores, como as condições de contorno são assimétricas em relação ao plano de simetria longitudinal vertical do Conjunto, têm-se que as tensões surgidas na Estrutura não são simétricas em relação ao mesmo plano. Ou

seja, nós com coordenadas Z simétricas em relação ao plano mencionado não apresentam, necessariamente, tensões aproximadamente iguais. Os valores de tensão equivalente máxima constam da Tabela 5.23, para o Casco, e da Tabela 5.25, para Anel de Reforço e Sela, ambas apresentadas no Capítulo 5.

Assim, observa-se, na Tabela 5.23 que, para o Casco, neste Caso, o nº 5938, localizado na lateral direita do Conjunto, na região do Terceiro Anel de Reforço, apresenta tensão equivalente de 50,08 MPa.

Magnitude de tensão equivalente de 68,43 MPa é observada no Terceiro Anel de Reforço sobre o Carro da Suspensão, na lateral direita Equipamento, nº 6558, na dobra do perfil "U" de sua secção transversal, conforme Tabela 5.25.

Nas Selas, verifica-se que a tensão equivalente máxima ocorre na Terceira Sela sobre o Carro da Suspensão, nº 7428, na junção da sua face lateral esquerda com a respectiva face frontal, apresentando, conforme Tabela 5.25, valor de 52,38 MPa.

### 6.3.1.7 Caso 7

Nas Tabelas 5.27, 5.28 e 5.29, do Capítulo 5, podem-se verificar os seguintes nós que destacam-se em magnitude de tensões equivalentes para este Caso.

Na estrutura do Casco, como indica a Tabela 5.27, prevalece o nº 5754, cuja tensão equivalente é de 82,81 MPa, situando-se na lateral direita do Equipamento, na transição entre o Segundo Anel de Reforço e o Empalme respectivo, sobre o Carro da Suspensão.

Com a Malha Refinada, observa-se, para o Casco, tensão equivalente com magnitude de 84,97 MPa, relativa ao nº 43050, na região correspondente à mesma obtida como crítica utilizando-se a Malha Inicial, como verifica-se na Tabela 5.28.

Outra região de concentração de tensão equivalente verifica-se na Quina do Segundo Anel de Reforço sobre o Carro da Suspensão, na lateral direita do Equipamento, nº 6474, com magnitude de 101,87 MPa, como indicado na Tabela 5.29.

Uma tensão equivalente de magnitude 87,13 MPa, é observada na Quina da lateral direita da **Segunda Sela** com sua face frontal, nº 7502, mostrado na Tabela 5.29.

#### 6.3.1.8 Caso 8

O resultado de tensão equivalente, para o Caso 8, pode ser visto na Tabela 5.31 do Capítulo 5.

Para o **Casco**, com Malha Refinada, tem-se tensão equivalente máxima de 66,40 MPa, relativa aos nós 43050 e seu simétrico 43704, localizados na transição entre o **Segundo Anel de Reforço** e seu correspondente **Empalme**, sobre o **Carro da Suspensão**, respectivamente, nas laterais direita e esquerda do Conjunto. Consta-se, assim, que a máxima tensão equivalente obtida para o **Casco**, neste Caso 8, é de menor magnitude, quando comparada àquela observada no Caso 5, cujo valor é 72,86 MPa.

#### 6.3.1.9 Caso 9

A Tabela 5.33, do Capítulo precedente, traz o resultado de tensão equivalente para este Caso. Verifica-se que o **Casco** é submetido à tensão equivalente máxima, no **Segundo Anel de Reforço**, nº 43050, de magnitude 77,65 MPa, inferior, portanto ao valor obtido no Caso 7, para o qual, a magnitude máxima de tensão equivalente é de 84,97 MPa.



### 6.3.2 Cálculo dos Coeficientes de Segurança Quanto à Falha por

#### Escamento

Dos Casos verificados nos itens acima, observa-se que as tensões máximas surgidas na Estrutura são:

- a. para o **Casco**, conforme Figura 6.5, tensão equivalente de 84,97 MPa, nó 43050 da Malha Refinada, localizado na linha de transição entre o **Segundo Anel de Reforço** e o seu **Empalme**, abaixo da meia altura do **Costado**, na lateral direita do Conjunto, para o Caso 7, que simula a passagem do Equipamento por uma depressão da via, com formato em "L", e a consequente liberação dos Apoios III, IV, V e IVD, na direção vertical, conforme Figura 3.13 do Capítulo 3, o que induziria solicitação de torção na Estrutura;

- b. para os **Anéis de Reforço**, tensão equivalente de 101,87 MPa, nó 6474, localizado na dobra que forma o perfil "U" do **Segundo Anel de Reforço**, como mostra a Figura 6.6, também para o Caso 7, conforme descrito no item a;

- c. no tocante às **Selas**, a Figura 6.7 mostra tensão equivalente de 87,13 MPa, nó 7502, localizado na junção da face dianteira com a lateral direita da **Segunda Sela**, resultado da solicitação ocorrida na simulação representada pelo Caso 7.

Nos itens a, b e c acima, observa-se que as magnitudes críticas de tensões surgem, todas, no Caso 7, que simula condição de torção da Estrutura, destacadamente a mais crítica das situações analisadas. Na Figura 6.8 podem-se observar as deformações da Estrutura do **Semi-Reboque Tanque**, em escala ampliada, para a simulação do Caso 7.

Figura 6.5 - Distribuição de Tensões Equivalentes de von Mises no Casco

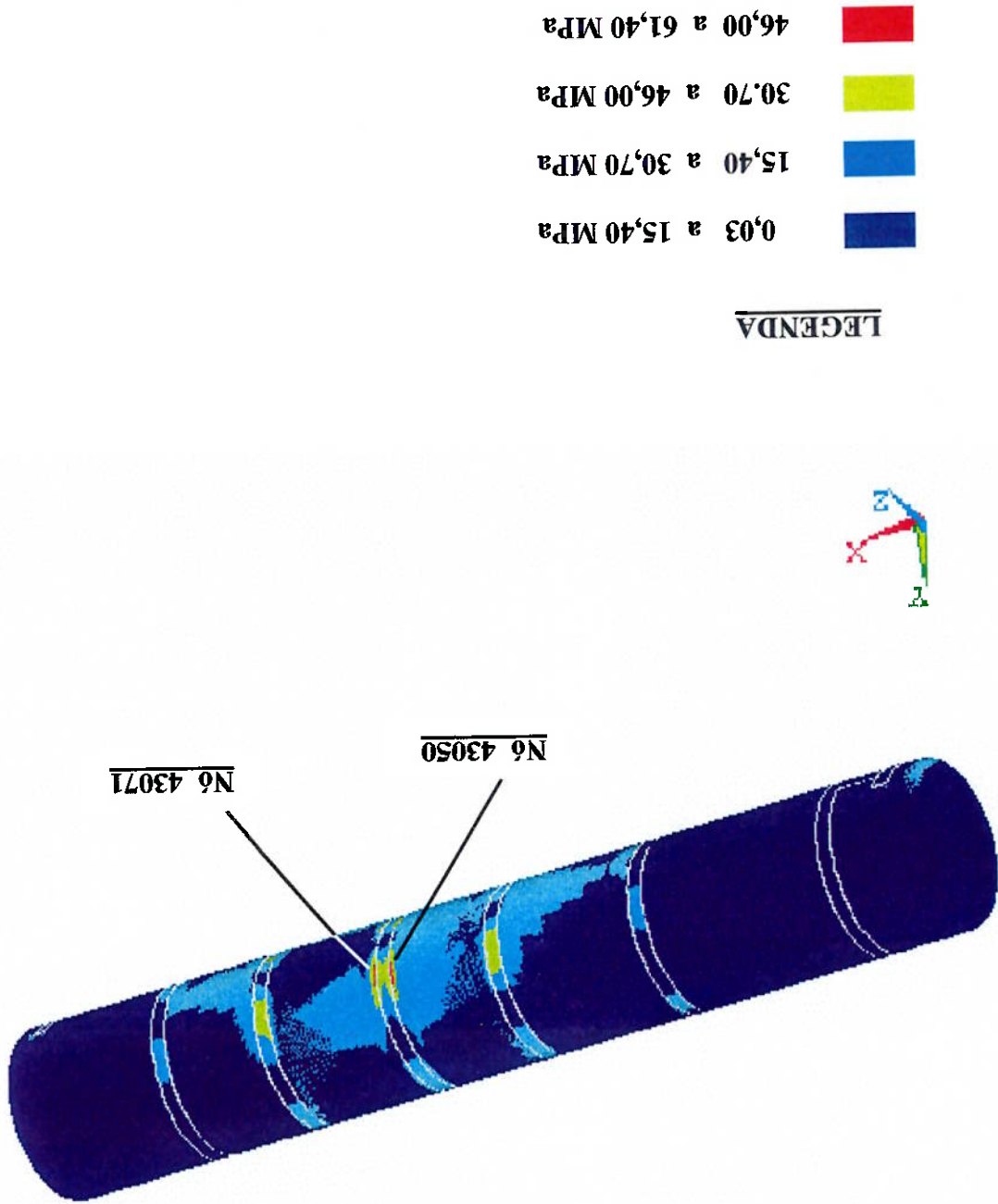


Figura 6.6 - Distribuição de Tensões Equivalentes de von Mises no

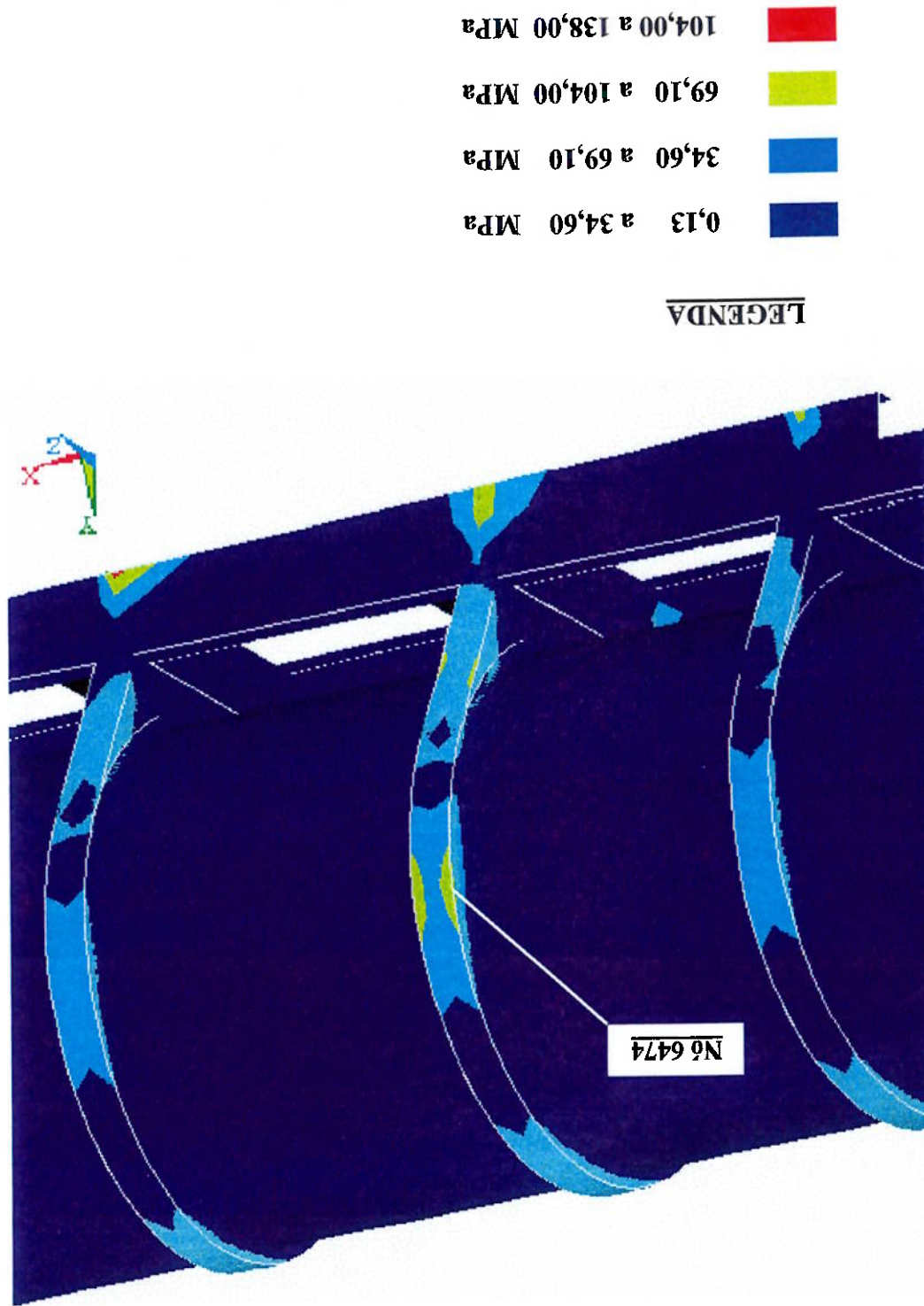
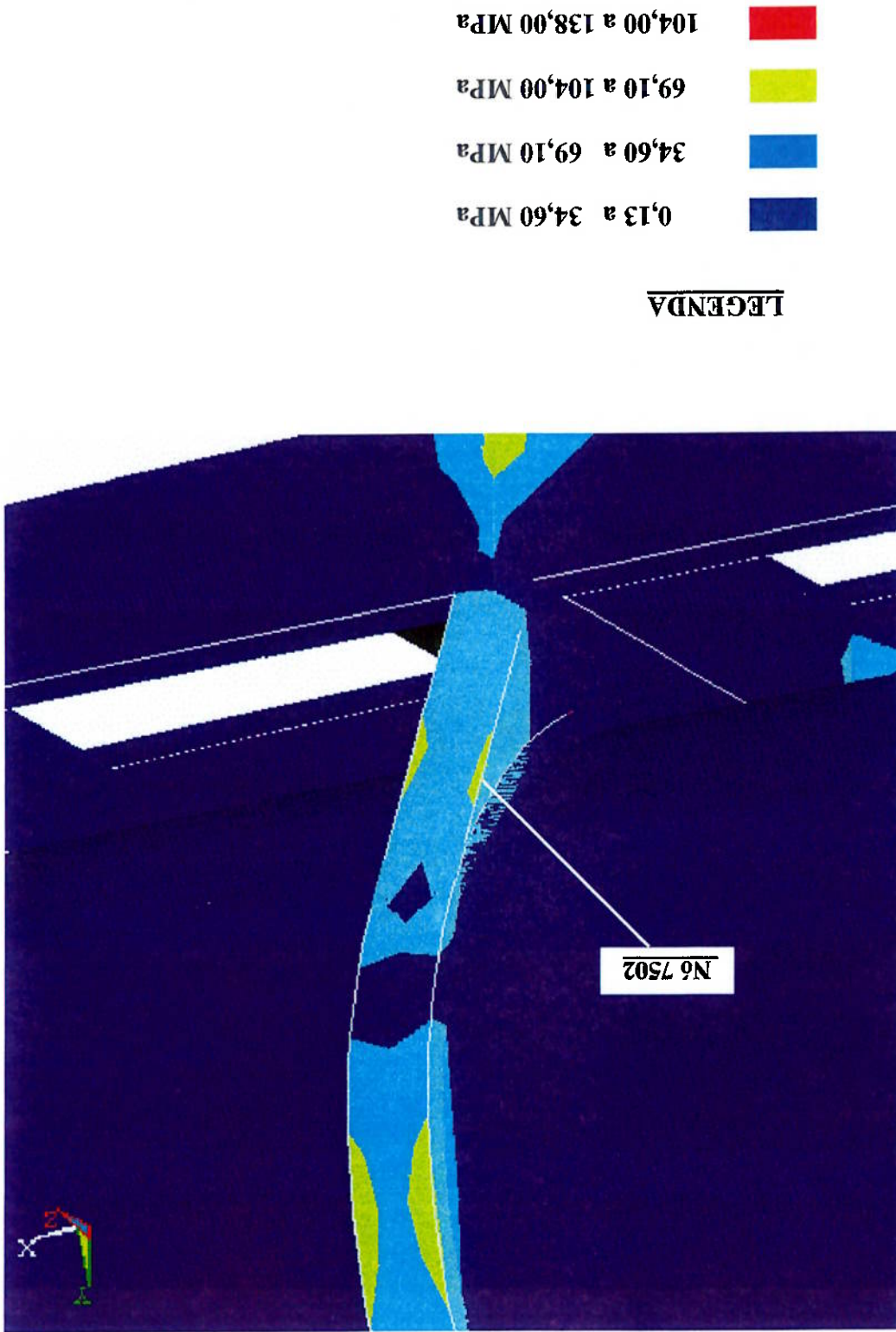
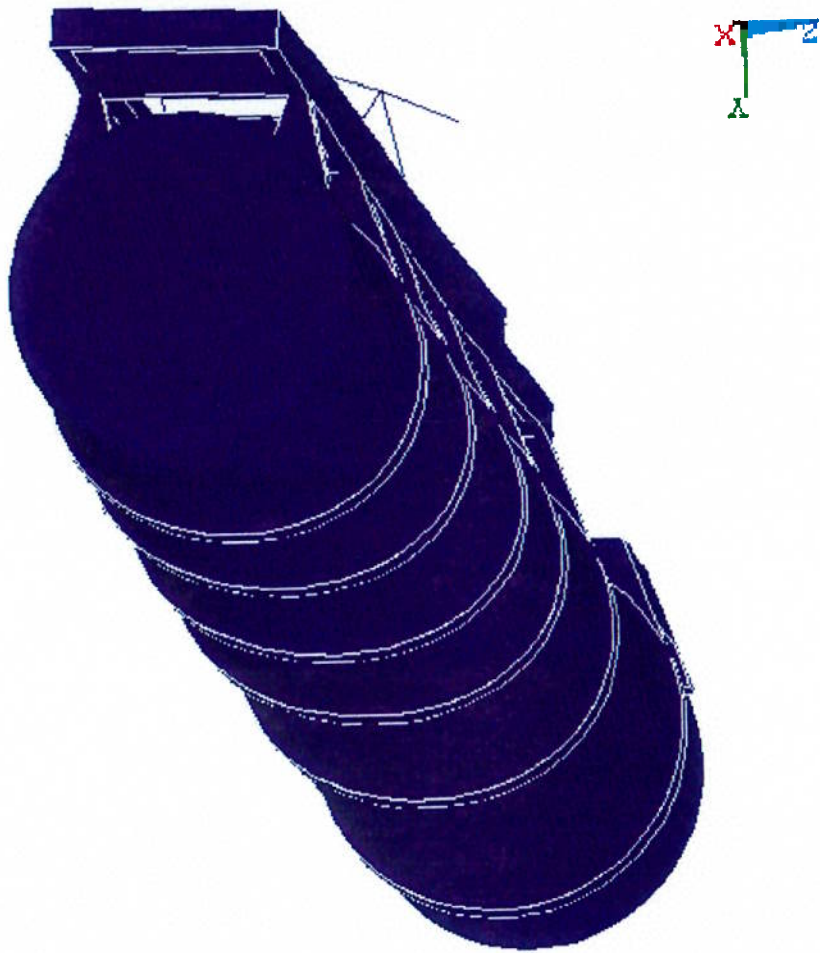


Figura 6.7 - Distribuição de Tensões Equivalentes de von Mises na Segunda Sela



**Figura 6.8 - Semi-Reboque Tanque - Vista Traseira -**  
**- Caso 7 - Deformações em Escala Ampliada -**



Para materiais dúcteis, segundo COLLINS [20], o melhor critério de resistência a ser aplicado é o da Teoria da Energia de Distorção (ou Teoria de Huber-von Mises-Hencky), que pode ser expressa como segue:

“Falha ocorre quando, em um estado de tensões multiaxial, a energia de distorção por unidade de volume torna-se igual ou excede a energia de distorção por unidade de volume no momento da falha, em um simples teste uniaxial de tensão, usando um corpo de prova do mesmo material”.

Em outras palavras e sem recorrer a deduções adicionais detalhadas, as quais podem ser verificadas na obra em referência, para o projeto de Engenharia, pode-se verificar o Equipamento, quanto à falha por escoamento, considerando-se a ação de carregamento estático, mediante a comparação da tensão equivalente de von Mises, obtida através da simulação utilizando o **Modelo** de Elementos Finitos, com o valor de tensão limite de escoamento do material, que pode ser obtido através de normas técnicas ou de informações fidedignas de seus fabricantes.

Para que não ocorra falha, deve-se ter:

$$\sigma_e \leq \sigma_{esc} \tag{6.1}$$

onde:

$\sigma_e$  : tensão equivalente calculada pelo Critério de von Mises;

$\sigma_{esc}$  : tensão limite de escoamento, característica do material de construção.

Conforme SHIGLEY [47], introduzindo-se um Coeficiente de Segurança (CS)

na condição acima, tem-se:

$$\sigma_e \leq \frac{\sigma_{esc}}{CS} \tag{6.2}$$

Tomando-se o caso do **Casco**, cujo material de construção é Aço Inoxidável, com tensão limite de resistência à tração de 485 MPa e tensão limite de escoamento de 170 MPa, pode-se verificar qual a ordem de grandeza do Coeficiente de Segurança para

o Equipamento estudado, ou seja, qual a segurança efetiva que se tem com a Estrutura real, carregada com as condições propostas para a simulação.

Assim, para o Caso mais crítico, dentre os verificados a partir das simulações

feitas, tem-se:

$$CS = \frac{\sigma}{\sigma_{esc}} \quad (6.3)$$

$$CS = \frac{170MPa}{84,97MPa} \quad (6.4)$$

$$CS = 2,0 \quad , \text{ aproximadamente.} \quad (6.5)$$

Para os Anéis de Reforço, construídos também em Aço Inoxidável, tem-se:

$$CS = \frac{170MPa}{101,87MPa} \quad (6.6)$$

$$CS = 1,7 \quad , \text{ aproximadamente} \quad (6.7)$$

Usando-se a mesma abordagem para as Selas, construídas em chapa de aço carbono SAE 1010, cuja tensão limite de resistência mecânica é de 324 MPa e tensão limite de escoamento de 179 MPa, verifica-se:

$$CS = \frac{179MPa}{87,13MPa} \quad (6.8)$$

$$CS = 2,1 \quad , \text{ aproximadamente.} \quad (6.9)$$

Sob o ponto de vista do carregamento estático, constata-se que os elementos estruturais Casco e Selas apresentam Coeficiente de Segurança da ordem de 2,0 em

relação à falha por escoamento, valor usualmente empregado no projeto de estruturas de aço.

No tocante ao **Anel de Reforço**, entretanto, verifica-se que o Coeficiente de

Segurança está abaixo deste valor usual.

Por outro lado, o Código ASME Seção VIII Divisão 1 [5], segundo TELLERS

[51], [52], recomenda um valor mínimo de 1,6 para o Coeficiente de Segurança em

relação a tensão limite de escoamento do material. Sob este critério, a parte crítica do

**Caso** analisado, está dentro do limite recomendado, mas o **Anel de Reforço** encontra-

se bem pouco acima daquele valor.

Especial atenção deve ser dada a estes dois itens constitutivos, sobretudo pelo

fato de que a estanqueidade do **Vaso** é de vital importância na operação do

Equipamento, garantindo que não haja possibilidade de poluição ambiental a partir de

vazamento do líquido transportado.

Sob o ponto de vista da segurança do Equipamento, é desejável que não haja

falha por escoamento, quer seja do **Casco** ou do **Anel de Reforço**; porém, em uma

situação crítica, atípica da operação no campo, em que pudesse ocorrer tal modo de

falha, admite-se que se dê, primeiramente, o escoamento do **Anel de Reforço**, o que

ainda garantiria a segurança do **Casco**. Sob esta ótica de análise, os Coeficientes de

Segurança obtidos neste Estudo, estão coerentes, admitindo-se que, primeiramente,

ocorra o escoamento do **Anel de Reforço**.

Salienta-se que as considerações acima são resultado da análise inicial dos

valores obtidos para o cálculo estático, não tendo sido feitas verificações que incluam

esforços dinâmicos e/ou localizados, nem averiguações de atendimento a normas, com

relação à máxima magnitude de tensão admissível, para os elementos de reforço

estrutural.

No tocante ao **Chassis**, como no **Modelo de Elementos Finitos** foram feitas

simplificações importantes, sobretudo no ponto articulado de junção das **Vigas Fictícias**

com a Estrutura principal, observa-se, nos resultados, uma concentração de tensão

bastante elevada nestas regiões, que não corresponde à realidade. Este fato é decorrente

da modelagem simplificada da mencionada junção, que a considera, diferentemente da

situação real, como sendo feita através de um ponto em cada extremo de cada **Viga**

**Fictícia**, representando um correspondente **Feixe de Molas**. O interesse principal de



No segundo tipo de origem da solicitação flutuante no tempo, tem-se a condição que, adicionalmente, introduz, na Estrutura, esforços de torção, simulada pela liberação dos Apoios das pontas dos Eixos, de maneira assimétrica em relação ao plano longitudinal vertical do Conjunto. Assim, liberando-se, no Caso 6, os apoios III, IIIE e IIII, localizados, respectivamente, nas pontas esquerda do Eixo Frontal, esquerda e direita do Eixo Intermediário, conforme Figura 3.13 e Tabela 3.4 do Capítulo 3, e, em sequência, os apoios IIIE, IVE e IVD, correspondentemente, das pontas esquerda do Eixo Intermediário, esquerda e direita do Eixo Traseiro, simula-se a passagem do

Rodas do Eixo Intermediário e, finalmente, de ambas as Rodas do Eixo Traseiro. duas Rodas do Eixo Frontal do Semi-Reboque Tanque, subseqüentemente, das duas deslocamento do Equipamento, onde teria-se, inicialmente, a liberação simultânea das depressão da pista, cuja dimensão predominante é perpendicular à direção de isto consegue-se simular, por exemplo, a condição em que a Estrutura ultrapassa uma relação ao plano vertical longitudinal que passa pela Linha de Centro do Conjunto. Com Estrutura é sustentada, porém de maneira que sempre há pontos de apoio simétricos em solicitações globais de flexão, obtida variando-se o número de Apoios sobre os quais a O primeiro leva em conta a flutuação de tensões, devida, fundamentalmente, à basicamente dois tipos de origem da solicitação flutuante ao longo do tempo.

Efetua-se a análise de fadiga, nesta Dissertação de Mestrado, considerando-se

#### 6.4 Análise de Fadiga

Como a mencionada concentração de tensão, próxima aos pontos de articulação dos Feixes, abrange área relativamente grande das Longarinas, se comparada às dimensões dos componentes do Chassis, opta-se por não fazer considerações sobre a análise de tensões desse componente, limitando-se, esta Pesquisa, a fornecer as reações de apoio nas pontas de Eixos e na Chapa do Pino Rei para cada Caso estudado.

estudo, por outro lado, concentra-se na região do Casco, compreendida pelos quatro Anéis de Reforço sobre o Carro da Suspensão, o que permite a introdução de simplificações, feitas em elementos distanciados dela.

Conjunto **Semi-Reboque Tanque** por uma depressão acentuada em forma de “L”, promovendo a torção da Estrutura, sob o aspecto global.

Embora tenham-se indicado tensões para o Caso 2, que considera o Equipamento vazio, como observado na Tabelas 5.8 e 5.9, esta situação não está incluída na análise da vida em fadiga. Sua inclusão conduziria a uma vida muito longa, expressa em termos de viagens realizadas, com ciclos envolvendo as situações do Equipamento vazio e carregado. Em outras palavras, para as condições de análise assim adotadas, as flutuações de menor amplitude, devidas, por exemplo, às imperfeições da via, estariam incluídas na amplitude total do envelope, cujos extremos seriam a tensão máxima de alguma solicitação específica, na fase transporte do ciclo e a tensão mínima, verificada com o Equipamento vazio.

Portanto, para que a análise concentre-se no dano causado à Estrutura, na fase de transporte propriamente dito, através das flutuações de tensão, cuja origem são as imperfeições da via, além da carga transportada e do peso próprio, obviamente, exclui-se o Caso 2 dos ciclos de carregamento.

Consideram-se, para estudo, dois ciclos de carregamento: um denominado ciclo de solicitações globais de flexão e outro, chamado de ciclo com solicitações globais de torção.

O ciclo de carregamento denominado ciclo de solicitações globais de flexão, inclui a condição de o Equipamento cheio e com todos os Apoios em contato com o solo e com a Quinta Roda, representada pelo Caso 1, e aquelas que consideram, sequencialmente, as liberações do **Eixo Frontal, Eixo Intermediário e Eixo Traseiro**, um a um, representadas pelos respectivos Casos 3, 4 e 5, como observa-se na Tabela 3.4 do Capítulo 3. Este ciclo simula a transposição de uma depressão da via cuja geometria é paralela aos Eixos do Equipamento.

Já o ciclo de carregamento denominado ciclo com solicitações globais de torção, prevê a condição de o Equipamento cheio, com todos os Apoios em contato com o solo e com a Quinta Roda, correspondente ao Caso 1 e os Casos 6 e 7, que referem-se à liberação assimétrica de Apoios, na situação da perda de aderência de duas rodas contíguas do lado esquerdo e uma roda do lado direito do Conjunto, como indica a Tabela 3.4 do Capítulo 3. O ciclo como um todo simula a transposição, pelo

Equipamento, de uma depressão da via, em forma de "L", cujo lado maior é paralelo aos Eixos da Suspensão.

Analisam-se os nós das regiões de instalação dos Anéis de Reforço, onde constatarem-se as trincas no campo, as quais coincidem com a área de maior concentração de tensões no Casco, indicada pelos resultados obtidos nos cálculos com o Modelo de Elementos Finitos.

Observam-se, também, concentrações de tensão em outras regiões, inclusive com magnitudes bastante superiores àquelas verificadas no Casco. Em regra, são regiões que, ou não apresentam descontinuidades ou não se tratam de áreas de junção de partes, como no caso da transição entre Anel de Reforço e Empalme respectivo, ou são regiões que fogem à área de interesse de estudo que é aquela situada sobre a Suspensão de Semi-Reboque Tanque, onde observa-se, na prática, o fenômeno de fadiga.

São exemplos de regiões de concentração de tensão com estas características, as dobras do perfil "U" que compõem os Anéis de Reforço tanto na parte superior como na região lateral do Equipamento e as junções das faces frontais ou traseiras com a laterais das Selas.

Portanto, a atenção da análise, a se desenvolver em seguida, volta-se para os nós localizados na região onde observam-se as trincas e que, confirmadamente pelo Modelo, são regiões de concentração de tensão.

#### 6.4.1 Análise das Tensões Críticas para Verificação de Ocorrência

##### de Falha por Fadiga

A verificação à fadiga que se segue, considera, primeiramente, a utilização da Malha Inicial do Modelo de Elementos Finitos para determinar os três nós de maior magnitude da tensão equivalente de von Mises para cada Anel de Reforço e para cada um dos Casos considerados para estudo.

Estes nós assim determinados, têm, então, sua amplitude de tensão equivalente calculada a partir da flutuação das respectivas tensões principais, com o emprego dos Métodos de Sines e ASME. São empregadas, para análise, as distribuições de tensão

associadas aos diversos Casos analisados, considerando-se que os mesmos ocorrem, de forma sequencial, ao longo da vida operacional do Equipamento. Mediante exame dos resultados assim obtidos, determina-se o nó denominado crítico, que é aquele que apresenta a maior amplitude de tensão equivalente, definida de acordo com os Métodos acima citados, selecionando-se, assim, a região crítica que será submetida ao refinamento localizado da Malha.

Utilizando-se a Malha Refinada, procede-se ao cálculo da vida em fadiga através do emprego dos Métodos ASME e de SINES e dos Casos associados a condições de carregamento e de contorno respectivas, definidos no Capítulo 3.

Para o ciclo de solicitações globais de flexão, as tensões necessárias para a determinação da máxima amplitude de tensão equivalente, de maneira a selecionar a região crítica, para posterior refinamento da Malha, estão indicadas nas Tabelas 5.4, 5.11, 5.15 e 5.19.

Com o mesmo objetivo, porém em relação ao ciclo com solicitações globais de torção, as tensões necessárias para o cálculo constam das Tabelas 5.4, 5.23 e 5.27. Na verificação da vida em fadiga, com Malha Refinada, as tensões pertinentes, considerando-se o ciclo de solicitações globais de flexão, estão indicadas nas Tabelas 5.5, 5.12, 5.16 e 5.20.

Da mesma forma, no tocante ao ciclo com solicitações globais de torção, as tensões para o cálculo da vida em fadiga encontram-se indicadas nas Tabelas 5.5, 5.24 e 5.28.

#### 6.4.2 Análise de Fadiga Multiaxial pelo Método de Sines

Para esta análise, segundo SURESH [50], consideram-se, como premissas, que o carregamento é de ciclo alternado (tensão média = 0) e que as cargas cíclicas estão em fase (0°).

A tensão equivalente, que caracteriza a deformação do material, é assumida como sendo aquela calculada pelo critério de von Mises, dada por:

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (6.10)$$

onde:

$\sigma_e$  : tensão equivalente de von Mises;

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  : tensões principais.

O ciclo de flutuação de tensões principais pode ser definido em termos de uma amplitude de tensão equivalente ( $\sigma_{ae}$ ) e de uma tensão média equivalente ( $\sigma_{me}$ ).

Assim, a equação (6.10), para o caso de tensões multiaxiais flutuantes, é escrita em termos das amplitudes das tensões principais ( $\sigma_{ia}$ ;  $i = 1, 2, 3$ ) para o ciclo

considerado, resultando na amplitude de tensão equivalente alternada ( $\sigma_{ae}$ ), dada por:

$$\sigma_{ae} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{1a} - \sigma_{2a})^2 + (\sigma_{2a} - \sigma_{3a})^2 + (\sigma_{3a} - \sigma_{1a})^2} \quad (6.11)$$

onde:

$$\sigma_{ia} = \frac{\sigma_{imax} - \sigma_{imin}}{2} \quad (6.12)$$

Da mesma forma, a equação (6.10) é escrita em termos das tensões principais médias ( $\sigma_{im}$ ;  $i = 1, 2, 3$ ), para o ciclo considerado, resultando na tensão média

equivalente ( $\sigma_{me}$ ), dada pela equação:

$$\sigma_{me} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{1m} - \sigma_{2m})^2 + (\sigma_{2m} - \sigma_{3m})^2 + (\sigma_{3m} - \sigma_{1m})^2} \quad (6.13)$$

Após a verificação das flutuações de tensão para uma série de pontos que apresentam tensões equivalentes de von Mises com magnitude significativa em algum dos Casos estudados, calculam-se as respectivas amplitudes de tensão equivalente corrigidas pelo critério de Goodman, também levando em conta o Fator de

- $\sigma_n$  : limite de resistência mecânica.
- $\sigma_{m,e}$  : tensão média equivalente;
- $\sigma_{a,e}$  : amplitude de tensão equivalente para  $\sigma_m \neq 0$ ;
- $\sigma_{a(\sigma_m=0)}$  : amplitude de tensão para  $\sigma_m = 0$ ;

onde:

$$\sigma_{a(\sigma_m=0)} = \sigma_{a,e} K_f \left[ 1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_{m,e} K_f} \right]^{-1} \quad (6.15)$$

pelo Método de Goodman:

presença de defeitos metalúrgicos no cordão de solda, deve-se fazer a correção seguinte, também que há que se considerar um Fator de Concentração de Tensão, devido à Para levar em conta que, no caso em estudo, a tensão média é diferente de zero e mais importante no caso em estudo é o da tensão média diferente de zero.

orientação de grãos, tratamento térmico e tipo de solda empregada. Entretanto, o efeito pela sua influência. Dentre eles, podem-se citar: composição do material, tamanho e fatores que influenciam a forma e posição da Curva S-N, podendo esta ser deslocada Também segundo autores como COLLINS [20] e SURESH [50], são vários os definida com base em uma tensão média igual a zero.

A amplitude de tensão alternada equivalente  $\sigma_{ae}$  dada pela equação (6.11) é

$$\sigma_{im} = \frac{\sigma_{imax} + \sigma_{imín}}{2} \quad (6.14)$$

onde:

Concentração de Tensões  $K_t$ , relativo à presença de defeitos no cordão de solda como acima descrito.

MITCHELL [34] considera que, para metais fundidos e, por extensão, para regiões de uniões soldadas, há ocorrência de defeitos metalúrgicos que geram concentrações de tensão. Esses defeitos, invariavelmente, estão presentes em cordões de solda, dentro dos limites de tolerância estabelecidos pelas normas de controle de qualidade da fabricação.

Isto é o que ocorre, por exemplo, no tocante ao Código ASME Seção VIII, Divisão 1 [5], que estabelece as seguintes exigências para a inspeção radiográfica de soldas: trincas ou zonas de fusão ou penetração incompletas devem ser descartadas; admitem-se ocorrências de formato alongado, cujo comprimento não exceda, para as condições do caso em análise, 6,4 mm; admitem-se também ocorrências de forma arredondada, cujo diâmetro não exceda 1,3 mm.

A partir dessas exigências e tomando-se como referência MITCHELL [34], calcula-se um Fator de Concentração de Tensão  $K_t$  como segue:

$$K_t = 1 + \sqrt{\frac{t}{a}} \quad (6.16)$$

onde:

$K_t$  : Fator de Concentração de Tensão;

$t$  : diâmetro da ocorrência na radiografia;

$a$  : constante do material base, dada pela relação empírica:

$$a = \left( \frac{300}{\sigma^n (ksi)} \right)^{1.8} \times 10^{-3} (in) \quad (6.17)$$

Assim, para o caso estudado, tem-se:

$$a = \left( \frac{70}{300} \right)^{1.8} \times 10^{-3} \quad (6.18)$$

### 6.4.3 Análise de Fadiga Multiaxial pelo Método ASME

O critério ASME de verificação a fadiga consta da Secção VIII, Divisão 2 [6]

daquele Código e baseia-se Critério de Tresca ou da máxima tensão de cisalhamento.

Considera-se, na abordagem que se desenvolve, que as variações das direções

das tensões principais para um mesmo ponto, respectivamente para cada Caso estudado,

é muito pequena e pode ser desprezada. Assim sendo, utiliza-se o procedimento de

cálculo indicado para a situação em que as citadas direções não variam.

O procedimento indicado no Apêndice 5 do Código ASME Secção VIII,

Divisão 2 [6], consta da determinação das tensões principais -  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  - para cada

nó de interesse, em cada instante do ciclo de solicitação considerado, o que corresponde,

neste Estudo, a cada um dos Casos analisados e suas respectivas condições de

carregamento e contorno estabelecidas.

Em seguida, calculam-se as diferenças  $\sigma_{ij}$  entre as tensões principais, também

para cada uma das condições de carregamento e contorno, para cada ponto considerado,

como segue:

$$\sigma_{31} = \sigma_3 - \sigma_1$$

$$\sigma_{23} = \sigma_2 - \sigma_3$$

$$\sigma_{12} = \sigma_1 - \sigma_2$$

(6.24)

(6.23)

(6.22)



Em um terceiro passo, determinam-se, também para cada  $n$ , os extremos da faixa através da qual cada diferença de tensão  $\sigma_j$ , calculada anteriormente, flutua e encontra-se a magnitude desta faixa, em valor absoluto, para cada  $\sigma_j$ .

A partir disso, determina-se então, o máximo valor absoluto destas magnitudes, o qual é denominado  $\Delta_{ry\ max\ abs.}$ .

A máxima amplitude de tensão equivalente, denominada pelo Código ASME como intensidade de tensão alternada  $\sigma^{all}$ , é a metade do valor obtido  $\Delta_{ry\ max\ abs.}$ .

Após multiplicar  $\sigma^{all}$  pela razão entre os módulos de elasticidade da curva e do caso específico analisado, ou seja, respectivamente,  $E=28,3 \times 10^6$  psi e  $E=27,992 \times 10^6$  psi é possível entrar na Curva da Figura 6.1 para verificação da vida em fadiga. Esta correção leva em conta a característica do material do caso estudado em relação ao material para o qual a Curva é traçada. Adicionalmente, neste trabalho faz-se uma correção de  $\sigma^{all}$  levando-se em conta o Fator de Concentração de Tensão  $K_f$ , considerando-se, como no critério anterior, os valores  $K_f=2,93$   $K_f=4,0$  e  $K_f=5,0$  para realizar uma análise de sensibilidade.

#### 6.4.4 Determinação da Região Crítica Quanto à Amplitude de Tensão Equivalente Utilizando-se Malha Inicial

##### 6.4.4.1 Ciclo de Solicitações Globais de Flexão - Método ASME - Malha Inicial

Neste cálculo consideram-se as Tabelas A2.1 a A2.7, mostradas no Anexo A2.

Observando-se o valor de  $\Delta_{r31\ max\ abs.}$ , na Tabela A.2.7, verifica-se que magnitude da máxima amplitude de tensão equivalente, denominada, pelo Código ASME, intensidade de tensão alternada  $\sigma^{all}$ , calculada a partir da flutuação das tensões

principais, atinge 98,30 MPa (14,26 ksi), utilizando-se  $K_f=5,0$ , correspondendo ao nº 5759 (Malha Inicial) situado no Segundo Anel de Reforço.

#### 6.4.4.2 Ciclo de Solicitações Globais de Flexão Método de Sines - Malha Inicial

As Tabelas A1.1 a A1.6 do Anexo A1, indicam, detalhadamente, o cálculo para

este item.

Na Tabela A1.6, observa-se, como nº de maior amplitude de tensão equivalente,

o de número 5759 (Malha Inicial), localizado no Segundo Anel de Reforço com magnitude de 123,70 MPa (17,94 ksi), considerando-se a utilização de  $K_f=5,0$ .

#### 6.4.4.3 Ciclo com Solicitações Globais de Torção Método ASME - Malha Inicial

Para verificação do cálculo detalhado, deste item, devem ser consultadas as

Tabelas A6.1 a A6.6, do Anexo A6.

Conclui-se aqui, através da Tabela A6.6, que o nº 5759 (Malha Inicial) situado

no Segundo Anel de Reforço apresenta a maior amplitude de tensão equivalente, para este item, com valor de 115,45 MPa (16,74 ksi), para um Fator de Concentração de

Tensão à fadiga de 5,0.

#### 6.4.4.4 Ciclo com Solicitações Globais de Torção Método de Sines - Malha Inicial

As Tabelas A5.1 a A5.6 do Anexo A5, trazem os cálculos para esta condição.

Utilizando-se o Método de Sines para o ciclo com solicitações globais de torção, com a Malha Inicial, obtém-se o nó 5754, pertencente ao Segundo Anel de Reforço, como o de maior magnitude de tensão equivalente, considerando-se o procedimento de cálculo mencionado, cujo valor é de 175,16 MPa (25,40 ksi), fazendo-se uso do Fator de Concentração de Tensão à fadiga  $K_f=5,0$ , como observa-se na Tabela A5.6.

#### 6.4.4.5 Conclusão Sobre a Seleção da Região Crítica para

##### Refinamento da Malha

Através dos cálculos realizados com a Malha Inicial, utilizando-se os dois Métodos adotados, conclui-se que, para ambos, a região do Casco relativa ao Segundo Anel de Reforço é a crítica, quanto à amplitude de tensão equivalente, obtida através da flutuação das tensões principais.

#### 6.4.5 Determinação da Vida em Fadiga Utilizando-se Malha Refinada na

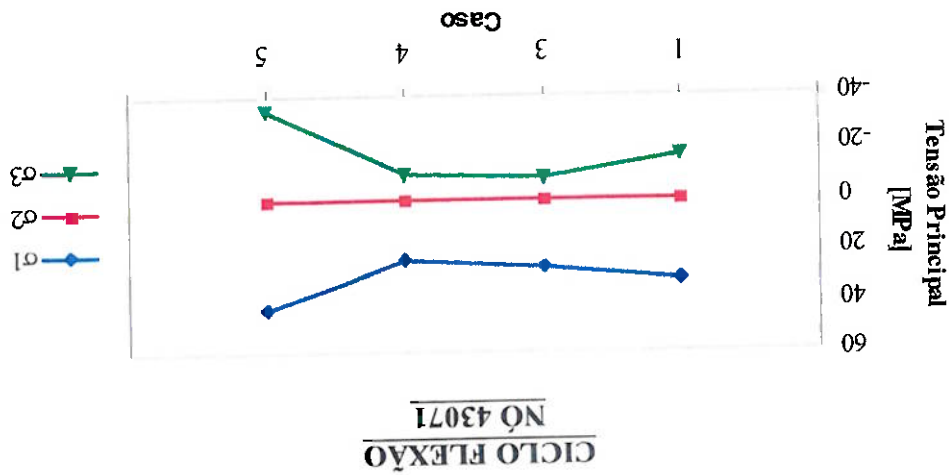
##### Região Crítica, Relativa ao Segundo Anel de Reforço

Com o emprego da Malha Refinada, que apresenta um reticulado mais denso de elementos finitos, na região do Casco correspondente ao Segundo Anel de Reforço, procede-se ao cálculo definitivo de verificação da vida em fadiga utilizando-se os Métodos de Sines e ASME. Os resultados, passo a passo, para cada um destes Métodos e para cada nó estudado, estão indicados nas Tabelas dos Anexos respectivos.

**6.4.5.1 Ciclo de Solicitações Globais de Flexão**  
**Método ASME - Malha Refinada**

Os resultados para este ciclo constam das Tabelas A4.1 a A4.7 do Anexo A4. Consultando-se a Tabela A4.7, verifica-se que o nó crítico, com a maior amplitude de tensão equivalente alternada, denominada pelo Código ASME, intensidade de tensão alternada  $\sigma_{all}$ , é o de número 43071 atingindo magnitude de 110,48 MPa (16,02 ksi) com  $K_f=5,0$ .

A Figura 6.9 indica a flutuação das tensões principais para o nó 43071, para o Ciclo de Solicitações Globais de Flexão..

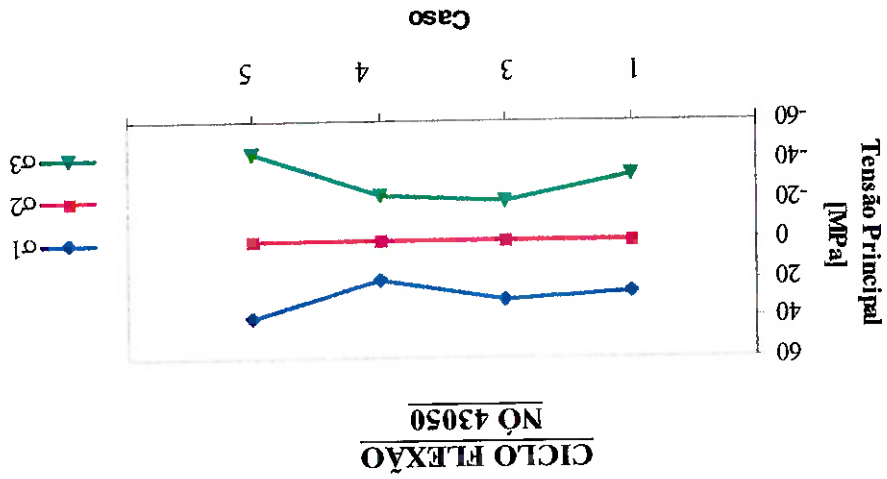


**Figura 6.9 - Flutuação de Tensões Principais para Ciclo de Flexão - Nó 43071**

**6.4.5.2 Ciclo de Solicitações Globais de Flexão - Método de Sines - Malha Refinada**

Com a observação das Tabelas A3.1 a A3.6 do Anexo A3, constata-se que o nó 43050 apresenta a maior amplitude de tensão equivalente alternada, segundo o Método de Sines, com valor de 126,13 MPa (18,29 ksi) ao se considerar um Fator de Concentração de Tensão à fadiga  $K_f=5,0$ .

A Figura 6.10, abaixo, indica a flutuação de tensões principais para o nó 43050, submetido ao Ciclo de Solicitações Globais de Flexão.



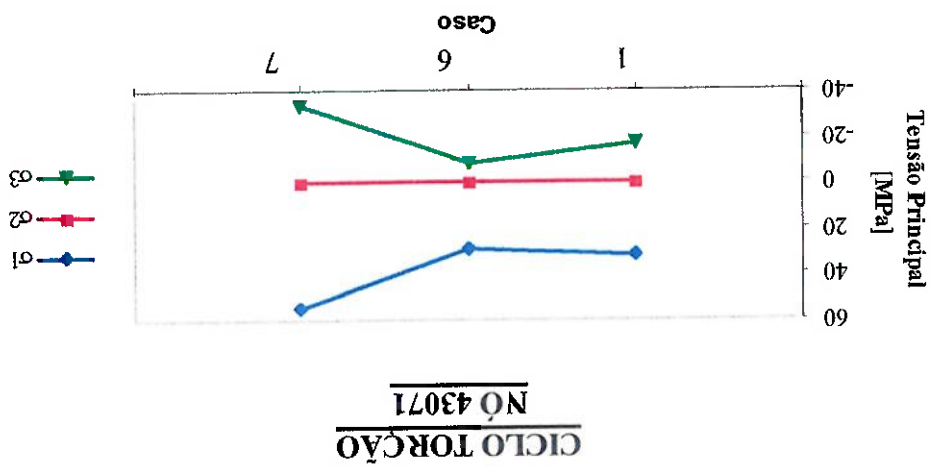
**Figura 6.10 - Flutuação de Tensões Principais para Ciclo de Flexão - Nó 43050**

**6.4.5.3 Ciclo com Solicitações Globais de Torção**  
**Método ASME - Malha Refinada**

As Tabelas A8.1 a A8.6, do Anexo A8, trazem os cálculos relativos ao item em curso.

Na Tabela 8.6, observa-se o nó 43071 como o de maior amplitude de tensão equivalente alternada, denominada, pelo critério ASME, intensidade de tensão alternada  $\sigma^{alt}$ , apresentando valor de 126,18 MPa (18,30 ksi) para  $K_t=5,0$ .

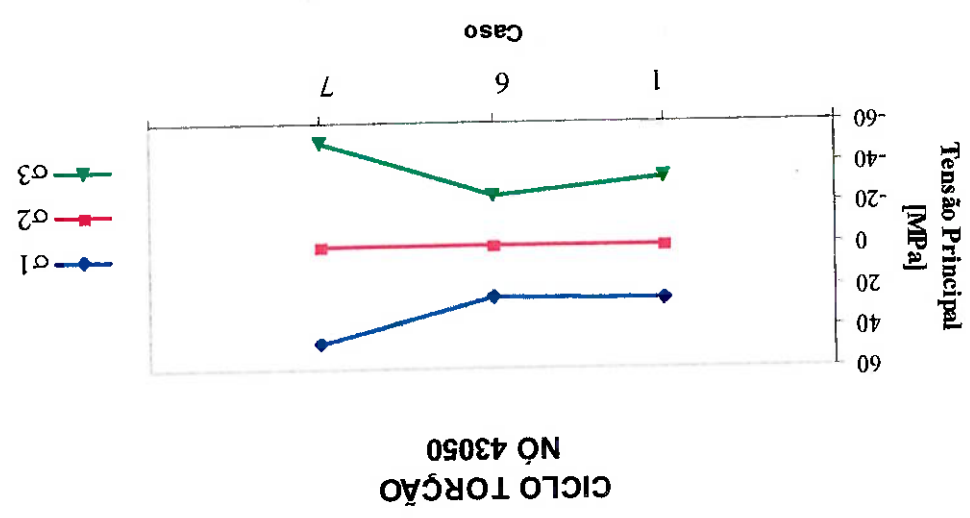
A Figura 6.11 indica a flutuação das tensões principais para o nó 43071, para o Ciclo com Solicitações Globais de Torção.



**Figura 6.11 - Flutuação de Tensões Principais para Ciclo de Torção - 43071**

**6.4.5.4 Ciclo com Solicitações Globais de Torção**  
**Método de Sines - Malha Refinada**

Os cálculos para esta condição estão indicados nas Tabelas A7.1 a A7.6, que constam do Anexo A7. Observa-se, como crítico, quanto a amplitude de tensão equivalente alternada, o nó 43050, com magnitude de 179,92 MPa (26,10 ksi) com a utilização de um Fator de Concentração de Tensão  $K_t = 5,0$ . A Figura 6.12 indica a flutuação das tensões principais para o nó 43050, para o Ciclo com Solicitações Globais de Torção.



**Figura 6.12 - Flutuação de Tensões Principais para Ciclo de Torção - Nó 43050**

#### 6.4.5.5 Verificação da Vida em Fadiga Através da Curva S-N

Das duas solicitações analisadas, verifica-se que a mais crítica é a torção, onde destaca-se o nº 43050, pelo Método de Sines e o nº 43071, pelo Método ASME.

Considerando-se o Coeficiente de Concentração de Tensão à Fadiga  $K_f=5,0$  obtém-se, respectivamente, para os citados nos amplitudes de tensão equivalente  $\sigma_a = 179,92 \text{ MPa}$  (26,10 ksi) e  $\sigma_a = 126,18 \text{ MPa}$  (18,30 ksi). Isto significa que tais nós trabalharão em condições mais severas sob o ponto de vista da fadiga

Uma vez que a Curva S-N, disponível na Figura 6.1, é traçada em unidades inglesas, utiliza-se o fator de conversão do Sistema Internacional (SI) para o Sistema Inglês que é  $1 \text{ Pa} = 1,450370 \times 10^{-4} \text{ psi}$

Fazendo-se, adicionalmente, a correção para compatibilizar o módulos de elasticidade do material motivo de estudo com o da Curva S-N utilizada, tem-se, para o nº 43050, que é a condição de solicitação crítica:

$$\sigma_{a,corr} = 26,10 \text{ ksi} \times \frac{27,99 \times 10^6}{28,30 \times 10^6} \quad (6.25)$$

sendo:

$\sigma_{a,corr}$ : amplitude de tensão equivalente alternada corrigida

$$\sigma_{a,corr} = 26,39 \text{ ksi} \quad (6.26)$$

Entrando-se com esse valor na Curva S-N da Figura 6.1 verifica-se que a vida do Equipamento limitar-se-ia a, aproximadamente,  $1,2 \times 10^6$  ciclos com solicitações globais de torção, ou seja, 1200000 transposições de depressões em "L" da via, como previsto nos Casos 6 e 7..



## 6.4.6 Análise dos Resultados

Os resultados obtidos, através dos dois Métodos de análise do fenómeno de fadiga empregados neste estudo, levam à conclusão que o Equipamento teria vida finita. Porém, os valores da amplitude de tensão equivalente alternada, obtidos em cada um dos Métodos utilizados e as vidas correspondentes, obtidas com o emprego da Curva S-N, em número de ciclos, têm magnitudes bastante diferentes entre si. Este fato relaciona-se com a própria natureza da metodologia de cálculo.

No caso do emprego do Método de Sines, calculam-se as tensões equivalentes média e alternada a partir da combinação, fazendo uso do critério de von Mises, das parcelas flutuante e média de cada uma das tensões principais atuante no elemento em estudo e ao longo de um ciclo de carregamento. Segundo SHIGLEY e MITCHELL [46], este método é recomendado para situações onde ocorre variação da direção das tensões principais durante o carregamento cíclico, sendo bastante empregado no projeto de componentes mecânicos submetidos à ação de carregamento variável no domínio do tempo. Sua característica principal é definir tensões equivalentes médias e alternadas a partir da análise da variação temporal da magnitude das tensões principais, definindo um par de valores que pode ser empregado no tradicional método de análise de fadiga, baseado na utilização da Curva S-N.

No tocante à metodologia empregada pelo Código ASME, baseada no Método de Langer, conforme afirmam FUCHS e STEPHENS [27], esta fundamenta-se na análise da variação temporal da máxima tensão equivalente determinada pelo critério de Tresca ou da máxima tensão de cisalhamento. Nesta metodologia não é feita qualquer consideração sobre o efeito da tensão média no processo de fadiga do componente estrutural.

A análise apresentada neste Estudo indica que ainda há necessidade de execução de pesquisas mais aprofundadas sobre o processo de fadiga de detalhes estruturais submetidos a carregamento com complexa variação temporal, tendo em vista a diferença dos resultados de amplitudes de tensões equivalentes obtida com a aplicação das metodologias citadas.

choques quando o Equipamento transpõe obstáculos da via tráfegável. Através de teste Estudo. Esta solicitação deve-se, ao que tudo indica, à aceleração vertical imposta por associados à movimentação do líquido no interior do Vaso é maior que o adotado neste

a. O carregamento atuante na Estrutura, devido à ação de efeitos dinâmicos mais dos seguintes fatores:  
tensão de magnitude superior à definida neste Estudo, podendo ter como causa um ou O surgimento de trincas na Estrutura esta vinculado à ocorrência de flutuação de constata-se neste Trabalho.

introdução, nas áreas de sua instalação, de regiões de concentração de tensão, como exigidos nos Regulamentos Técnicos constantes das referências [30] e [31], ocorre a Cabe salientar que, no tocante à utilização de qualquer um dos tipos de reforço projetistas e usuários dão preferência à utilização de anéis de reforço externos.

sobretudo à manutenção, entre viagens, da limpeza interna do vaso de pressão, cheios da carga líquida a transportar, aliado ao fato de que, por questões ligadas, Como, frequentemente, equipamentos semelhantes operam completamente ondas, anteparos ou qualquer combinação desses elementos.

permitted que o reforço da Estrutura seja feito por meio de anéis de reforço, quebra-região do Equipamento seja inferior a 9,5 mm (3/8"). Os Regulamentos mencionados transversal do **Costado**, para os casos em que a espessura da chapa utilizada nessa os quais indicam a necessidade da introdução de reforços circunferenciais da secção Equipamento são exigência dos Regulamentos Técnicos RTQ-07 [30] e RTQ-034 [31],

Especificamente para o caso em análise, os **Anéis de Reforço** utilizados no pressão, também podem introduzir zonas de concentração de tensão. secção transversal do equipamento em pontos específicos, no que se refere à ação da reforços circunferenciais, usualmente soldados, que visam ao aumento da resistência da frequente, sobretudo em regiões do casco que contêm aberturas e apoiamentos. Esses

A utilização de reforços em áreas específicas de vasos de pressão é bastante região em que as trincas apresentaram-se na situação real.

apresentam flutuação de tensão de maior magnitude, localizados, no **Modelo**, na mesma Estrutura tem sua vida limitada pela falha por fadiga nos pontos cujos resultados obtidos Pode-se verificar que os Métodos de análise empregados indicam que a

utilizando-se desaceleração sobre a Estrutura e sobre o líquido transportado, constata-se que não há agravamento das tensões na região crítica devida a este tipo de solicitação.

b. Em função da velocidade de deslocamento do Conjunto veículo de tração mais **Semi-Reboque Tanque**, o contato do Pneu com irregularidades da via tráfegável pode gerar uma solicitação dinâmica de magnitude superior à considerada neste Estudo;

c. Imperfeições geométricas, introduzidas pelo processo de fabricação de detalhes constitutivos de geometria relativamente intrínseca podem, causar amplificação das tensões calculadas nesta Pesquisa, onde considera-se a Estrutura, construída com aquela geometria idealmente prevista no projeto. Salienta-se que o Código ASME [5],[6], utilizado como referência na fabricação do **Vaso**, impõe limites para as imperfeições de forma, desvios da geometria ideal prevista introduzidos na Estrutura, havendo substancial preocupação com o controle de possíveis ovalizações;

d. O processo de soldagem dos elementos estruturais pode estar introduzindo defeitos com dimensões tais que acarretam concentrações de tensão bastante superiores às consideradas neste Estudo.

Concluindo, pode-se ressaltar que esta Pesquisa esclarece muitos aspectos relativos ao comportamento estrutural do **Semi-Reboque Tanque**, sobretudo quanto ao **Vaso de Pressão** funcionando como elemento autoportante, e indica possibilidades reais para ações de melhoria de projeto e fabricação, cujos resultados positivos abrangem, sobretudo, aspectos de aumento da segurança operacional e de redução de custos de fabricação e operação.

O processamento do Modelo de Elementos Finitos desenvolvido neste Estudo, permite a avaliação da distribuição de tensões no Vaso de Pressão, em função da variação das condições de carregamento da Estrutura, as quais estão relacionadas com a ação do peso do líquido transportado, do peso do próprio Equipamento e com o carregamento advindo do contato Pneu-via trafegável. Para simular este último carregamento, que tem natureza dinâmica, consideram-se alguns instantes específicos de sua ação, caracterizados por situações pré-definidas da condição de contato Pneu-via trafegável, introduzidas na simulação estática desse comportamento dinâmico do Equipamento, através de respectivas condições de contorno, que consideram a liberação de Apoios específicos, sequencialmente, de maneira a representar a situação real de operação.

que também teria, como benefícios, a diminuição de riscos ao ambiente e a redução de custos de fabricação, dentre outras.

O Trabalho mostra que o Equipamento, tão frequentemente utilizado, ainda apresenta boas possibilidades para inovações e melhorias que poderiam beneficiar usuários e fabricantes, sobretudo em aspectos relativos ao aumento da segurança da pessoa e do patrimônio, na medida em que pode-se proceder a uma otimização do projeto estrutural, visando à minimização da possibilidade de ocorrência de falhas, o que também teria, como benefícios, a diminuição de riscos ao ambiente e a redução de custos de fabricação, dentre outras.

A presente Dissertação de Mestrado, enfocando a análise de fadiga de uma Estrutura Autoportante do tipo casca, com larga utilização no transporte de produtos perigosos a granel, mostra muitas evidências das quais podem-se obter conclusões importantes tanto com relação à possibilidade de introdução de melhorias no projeto e nos processos de fabricação do Equipamento como também no tocante a fornecer algum subsídio e indicar caminhos para pesquisas futuras na área de análise de sua integridade estrutural.

## **Conclusões e Recomendações**

### **Capítulo 7**

Através do cálculo utilizando o **Modelo** desenvolvido, podem-se definir os detalhes estruturais do **Vaso de Pressão** submetidos a tensões de maior magnitude, ou seja, regiões onde ocorre a denominada concentração de tensão. O detalhe estrutural mais solicitado, segundo análise numérica realizada, localiza-se na união do Segundo **Anel de Reforço** com o **Empalme** respectivo, coincidindo, portanto, com a área onde, usualmente, são detectadas trincas no Equipamento.

Considerando-se a análise da possibilidade de ocorrência de falha estrutural, conforme os mecanismos de escoamento e de fadiga, conclui-se, quanto ao primeiro deles, que o Equipamento é dimensionado com Coeficientes de Segurança superiores aos usualmente recomendados para vasos de pressão. Entretanto, com relação à análise da possibilidade de ocorrência de falha por fadiga, o Estudo indica que o Equipamento teria vida finita. Este último resultado, entretanto, pode ser considerado como uma estimativa preliminar, uma vez que foi observada, ao longo do desenvolvimento desta Pesquisa, uma série de aspectos, tanto relacionados à natureza do carregamento como aos processos de fabricação do Equipamento, que podem influenciar o mecanismo de falha por fadiga e que não foram levados em conta no Trabalho. Assim sendo, seus resultados representam um esforço inicial na tarefa de examinar os fatores que influenciam o mecanismo de fadiga da Estrutura do **Vaso de Pressão**, avaliando as possíveis metodologias de análise deste mecanismo de falha, apresentando o **Modelo** de Elementos Finitos que pode ser utilizado na verificação estrutural do Equipamento e indicando a necessidade de serem executados outros estudos sobre o processo de fadiga deste tipo de Estrutura. Um aprofundamento desta Pesquisa deve incluir verificações relacionadas a fatores tais como: a influência da presença dos cordões de solda na distribuição de tensões atuantes no **Vaso de Pressão**, o comportamento da Estrutura quando submetida a carregamento de impacto, a caracterização probabilística da distribuição dos defeitos nos cordões de solda, entre outros.

Além das observações gerais contidas nos parágrafos anteriores, a execução desta Pesquisa permite a obtenção das seguintes conclusões:

1. Confirma-se, mediante o emprego de **Modelo** de Elementos Finitos, ora desenvolvido, a existência de uma região de concentração de tensões, coincidente com aquela na qual foram observadas trincas em um caso real, conforme pode ser visto nas

Figuras 1.3, 1.4 e 1.5 do Capítulo 1. No Modelo, verifica-se a citada região, localizada pouco abaixo da meia altura do Casco sobre o Carro da Suspensão, entre o Segundo Anel de Reforço e Empalme respectivo, mais precisamente na linha que une estes dois componentes;

2. A Suspensão empregada no Semi-Reboque Tanque tem grande influência na transmissão, para a Estrutura, dos esforços gerados pelo contato Pneu-via tráfegável. As características da Suspensão, que exercem maior influência na transmissibilidade das solicitações, são a rigidez dos Feixes de Molas e sua forma da vinculação com o Chassis. No Trabalho, adota-se uma modelagem simplificada desta Suspensão sendo, Feixes de Molas, representados pelas denominadas Vigas Fictícias, fixadas ao Chassis, porém apresentando, nesses pontos de junção, a possibilidade de giro livre, simulando o comportamento dos Balancins;

3. Considerando o comportamento da Estrutura quando solicitada pela variação do carregamento relacionado ao contato Pneu-via tráfegável, simulado através das condições de contorno, com a liberação de Apoios específicos sucessivamente, tem-se que o Vaso de Pressão é submetido à tensões de maior magnitude, na situação quando libera-se, simultaneamente, do contato com o solo, as Rodas das pontas esquerda do Eixo Intermediário, esquerda e direita do Eixo Traseiro. A liberação desses Apoios equivale à transposição, pelo Equipamento, de uma depressão da via em forma de “L”, sendo que estas tensões de maior magnitude, são observadas no Caso 7, tanto no Casco como nas demais partes analisadas da Estrutura, tais como Anel de Reforço e Sela;

4. A simulação da condição de frenagem, com o Equipamento totalmente carregado, induz a uma variação da distribuição de tensões em relação àquela observada na simulação com as mesmas condições de carga, porém, com o Conjunto em repouso. A ação de frear causa uma alteração na distribuição da pressão atuante no Casco, gerada pela presença do fluido em seu interior. Nesta situação, ocorre um aumento da magnitude das tensões atuantes na parte frontal do Vaso, em comparação com os valores observados com o Equipamento em repouso. Entretanto, na região de ligação do Casco com o Segundo Anel de Reforço, justamente o detalhe estrutural onde verifica-

se a ocorrência de trincas, há uma redução de cerca de 8,8 % na magnitude das tensões em relação àquelas obtidas com o Equipamento em repouso. Ressalta-se, também, que a diferença entre a magnitude das tensões atuantes no detalhe estrutural supracitado, nas condições de frenagem e em repouso, não gera flutuação de tensão que possa induzir a falha por fadiga;

5. Considerando-se a avaliação da possibilidade de ocorrência de falha por escoamento, constata-se que **Casco e Selas** apresentam valores de Coeficiente de Segurança da ordem de 2,0, ao passo que, **Anel de Reforço** apresenta Coeficiente de Segurança da ordem de 1,7. Estes valores estão em torno de 2,0, que é normalmente utilizado para estruturas em geral e pouco acima de 1,6, que é valor indicado pelo Código ASME, conforme TABLES [51], [52]. Como equipamentos que operam sob pressão são periodicamente submetidos a teste hidrostático e como os Regulamentos Técnicos [30], [31] não explicitam o valor da pressão de teste, para o caso estudado, além de que a verificação do nível de tensões advindas deste tipo de pressurização não foi objeto deste Trabalho, recomenda-se verificação futura da integridade estrutural do **Vaso**, quando submetido ao carregamento gerado nessa condição de teste;

6. No tocante ao processo de falha por fadiga, considerando os Casos de carregamento e de contorno empregados nesta Pesquisa, estima-se que é necessária a ocorrência de  $1,2 \times 10^6$  ciclos de carregamento para haver nucleação de uma trinca, na região de transição entre o **Casco** e o **Segundo Anel de Reforço**, que é considerado o detalhe estrutural crítico do **Vaso**. A simples nucleação da trinca já indica comprometimento da integridade estrutural do **Vaso**, pois o crescimento da mesma, na direção da espessura do **Casco** pode causar vazamento de um produto perigoso;

7. A transformação da vida de  $1,2 \times 10^6$  ciclos de carregamento em termos de unidade temporal que indique o número de viagens ou horas de operação do Equipamento, depende da qualidade da superfície da via tratável, ou seja, quanto maior o número de vezes que a sequência de defeitos superficiais analisados neste Estudo ocorrer, ao longo de um quilômetro de via, mais rapidamente será atingido o número de ciclos de carregamento necessário para causar nucleação de uma trinca;

8. A vida de  $1,2 \times 10^6$  ciclos de carregamento é obtida considerando-se a majoração da magnitude das tensões, obtidas a partir do processamento do Modelo de Elementos Finitos, com o emprego de um fator de concentração de tensão que representa a presença de um defeito circular no interior de um cordão de solda, sobre o campo de tensões atuante no detalhe estrutural. A variação na geometria deste defeito, como por exemplo, a presença de defeitos elípticos, pode aumentar ainda mais a concentração de tensão na região de sua ocorrência, reduzindo o número de ciclos de carregamento necessário para a nucleação de uma trinca;

9. A possibilidade de ocorrência de uma micro trinca com dimensões acima dos valores permitidos pelo Código ASME [5], como abordado no Capítulo 6 e que não seja captada nas inspeções radiográficas realizadas durante a fabricação, segundo ROLFE e BARSOM [42], é uma realidade para cordões de solda de geometria mais complexa como é o caso da junção do Anel de Reforço com seu respectivo Empalme. Isto pode levar a uma situação onde a concentração de tensão é muito superior àquela considerada neste Trabalho, o que aumentaria muito a probabilidade de redução da vida útil do Equipamento. Recomenda-se, portanto, que sejam feitos esforços para manter rigoroso controle do processo de soldagem, incluindo a qualificação de soldadores e do próprio processo e, adicionalmente, inspeção por ultrassom e outras medidas para que seja reduzida a possibilidade da existência de trincas nos cordões de solda, já no início da vida operacional do Equipamento;

10. Os Métodos ASME e de SINES, utilizados na verificação da vida em fadiga, resultam em valores diferentes da amplitude de tensão equivalente considerada na análise deste mecanismo de falha, cujo efeito é a variação de localização dos detalhes estruturais críticos, ainda que situados muito proximamente e em posições geometricamente correspondentes, na mesma região da Estrutura. Este fato está associado à diferença existente entre os fundamentos teóricos utilizados pelos métodos em referência, para definição da flutuação de tensão equivalente, empregada no cálculo da vida em fadiga.



Além das conclusões acima relacionadas, ao longo do desenvolvimento desta Pesquisa, foram observados tópicos que podem ser objeto de trabalhos futuros, dentre os quais podem-se citar:

1. Desenvolvimento de um estudo com base na elaboração de **Modelo** de Elementos Finitos mais refinado do detalhe estrutural considerado crítico sob o aspecto de apresentar maior possibilidade de falha por fadiga. Deste **Modelo** fariam parte, também, os cordões de solda e a estrutura localizada do **Casco, Empalme e Anel de Reforço**, possivelmente utilizando elementos sólidos, de maneira que tenha-se uma malha substancialmente mais refinada permitindo obter a concentração de tensões no detalhe estrutural de forma mais precisa que a obtida neste Trabalho;

2. Elaboração de análise do comportamento dinâmico da **Suspensão** do **Equipamento**, visando à avaliação da deflexão dos **Feixes de Molas**, quando atuam conjuntamente, em função da presença dos **Balancins** e dos **Eixos do Semi-Reboque Tanque**;

3. Execução de análise estrutural dinâmica do Equipamento, com o auxílio do Método dos Elementos Finitos, considerando-o carregado, porém, submetendo as pontas dos seus **Eixos** a carregamentos de impacto, que simulariam os choques das respectivas Rodas com depressões ou lombadas existentes em vias tratáveis. Com esta análise poder-se-á definir a possível ocorrência de amplificação dinâmica das tensões atuantes no detalhe estrutural crítico, definido neste Estudo, o que poderia reduzir o período de nucleação da trinca e acelerar seu processo de propagação;

4. Desenvolvimento de análise estrutural dinâmica do Equipamento, empregando-se o Método dos Elementos Finitos, no qual consideram-se as pontas dos **Eixos do Semi-Reboque Tanque** submetidas à ação de forças cuja magnitude é variável no domínio do tempo. As características dessa solicitação dinâmica devem ser obtidas com a execução de uma análise experimental, na qual, um equipamento similar ao considerado neste Trabalho, juntamente com o cavalo mecânico que o traciona, deve deslocar-se em vias com condições superficiais previamente definidas, sendo

registados os históricos de forças vertical e horizontal, atuantes nos Eixos da Suspensão do Semi-Reboque Tanque. Os resultados desta análise dinâmica poderiam ser empregados na avaliação do processo de fadiga do Vaso de Pressão;

5. Desenvolvimento de pesquisa que inclua a elaboração de programa de computador que, a partir das componentes de tensões principais, obtidas por um programa de cálculo através do Método dos Elementos Finitos, automatize o processo de verificação à fadiga pelos Métodos de Sines, do Código ASME e outros, de maneira que se obtenha diretamente os resultados no a no para toda a Estrutura;

6. Estudo para elaboração de Modelo de elementos finitos parametrizado para o Vaso de Pressão Autoportante - Semi Reboque Tanque, de maneira a automatizar seu projeto a partir de dados de entrada como densidade do fluido ou solução fluida a transportar, dimensões de diâmetro e comprimento do Costado, material a ser utilizado na construção, dentre outros. Um programa deste tipo seria de grande valia tanto para setores de projetos como para departamentos comerciais e de órgãos de empresas fabricantes deste tipo de Equipamento;

7. Análise da influência da variação da quantidade e posicionamento dos Eixos do Semi-Reboque Tanque sobre o comportamento da distribuição de tensões atuantes na Estrutura do Vaso de Pressão. Esta análise deve considerar as limitações impostas pela Lei de Balança para a magnitude das forças verticais estáticas exercidas em cada Eixo do Equipamento;

8. Execução de estudo que avalie a influência das características da Suspensão do Equipamento - rigidez, localização dos pontos de fixação ao Chassis, presença de Balancins e outras - sobre a distribuição de tensões atuantes no Vaso de Pressão, em função dos efeitos dos esforços gerados pelo contato Pneu-via trafegável.

- [1] ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 7501 Transporte de Produtos Perigosos - Terminologia (TB-188);
- [2] ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 11453 Pesquisa de Transporte Rodoviário de Carga - Terminologia (TB-352);
- [3] ASM INTERNATIONAL Metals Handbook. Volume 1, 10<sup>th</sup> ed., USA, 1990;
- [4] ASM INTERNATIONAL Stainless Steels ASM Specialty Handbook. 1<sup>st</sup> ed., USA, 1994;
- [5] ASME AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS Pressure Vessel Code Section VIII, Division 1. 1991;
- [6] ASME AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS Pressure Vessel Code Section VIII, Division 2. 1992;
- [7] ASME AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS Boiler and Pressure Vessel Code - Section II - Material Specifications - Part A - Ferrous Materials. 1983;
- [8] ASME AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS Boiler and Pressure Vessel Code - Section V - Nondestructive Examination. 1983;

## Referências Bibliográficas

### Capítulo 8

- [9] ASME AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS Boiler and Pressure Vessel Code – Section IX - Welding and Brazing Qualifications, 1983;
- [10] ASSOCIAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE CARGA A Lei de Balança no Brasil e no mundo, Transporte Moderno 378, Suplemento;
- [11] ASTM AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIAL ASTM A 240 Standard Specification for Heat-Resisting Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet and Strip for Pressure Vessels, 1997;
- [12] ASTM AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIAL ASTM B209 Specification for Aluminum and Aluminum Alloy Sheet and Plate, 1997;
- [13] ASTM AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIAL ASTM A656 Specification for Hot-Rolled Structural Steel, High Strength Low Alloy Plate With Improved Formability, 1997;
- [14] ASTM AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIAL ASTM A715 Specification for Steel Sheet and Strip, High Strength High Rolled and Steel Sheet, Cold Rolled, High Strength, Low Alloy, With Improved Formability, 1997;
- [15] AWS AMERICAN WELDING SOCIETY Welding Handbook, 3<sup>rd</sup> edition Miami, USA, 1991;
- [16] BATHE, KLAUSS-JÜRGEN Finite Element Procedures, Prentice Hall, Inc., 1996;
- [17] BEDNAR, HENRY H. ed. Pressure Vessel Design Handbook, 2<sup>nd</sup> ed. N.Y., Van Nostrand Reinhold, 1986;

- [18] CHUSE, ROBERT; CARSON, BRYCE E. Pressure Vessels. 7<sup>th</sup> ed. USA, McGraw Hill, Inc., 1993;
- [19] CIRIA CONSTRUCTION INDUSTRY RESEARCH AND INFORMATION ASSOCIATION Design of Tubular Joints for Offshore Structures. London, 1985;
- [20] COLLINS, JACK A. Failure of Materials in Mechanical Design - Analysis, Prediction, Prevention. 2<sup>nd</sup> edition, N. Y., John Wiley & Sons, Inc., 1993;
- [21] CONTRAN CONSELHO NACIONAL DE TRÁNSITO Resolução 692/88. Brasil;
- [22] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG DIN EN 10025 Hot Rolled unalloyed structural steel products. March 1994;
- [23] DOT DEPARTMENT OF TRANSPORTATION 49 178.345 General Design and Construction Requirements Applicable to Specification MC 406. USA;
- [24] DOT DEPARTMENT OF TRANSPORTATION 49 178.346 MC 406 Caminhão Tanque. USA;
- [25] DOT DEPARTMENT OF TRANSPORTATION 49 178.347 MC 407 Caminhão Tanque. USA;
- [26] DOT DEPARTMENT OF TRANSPORTATION 49 178.348 MC412 Caminhão Tanque. USA;
- [27] FUCHS, H.O and R.I. STEPHENS Metal Fatigue in Engineering. USA, John Wiley & Sons, Inc., 1980;
- [28] GILLESPIE, THOMAS D.. Fundamentals of Vehicle Dynamics. 4<sup>th</sup> ed. USA, Society of Automotive Engineers, Inc., 1992;

- [29] HARVEY, JOHN F., P.E., Theory and Design of Pressure Vessel. NY, USA, Van Nonstrand Reinhold Company, 1985;
- [30] INMETRO INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA E QUALIDADE INDUSTRIAL RTQ-07 Equipamento para o Transporte Rodoviário de Produtos Perigosos à Granel. Brasil;
- [31] INMETRO INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA E QUALIDADE INDUSTRIAL RTQ-034 Equipamento para o Transporte Rodoviário de Produtos Perigosos à Granel – Geral – Construção. Brasil;
- [32] INMETRO INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA E QUALIDADE INDUSTRIAL RTQ-032 Veículo Rodoviário Destinado ao Transporte de Produtos Perigosos – Construção, Instalação e Inspeção do Para-Choque Traseiro. Brasil;
- [33] INMETRO INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA E QUALIDADE INDUSTRIAL RTQ-036 Revestimento Interno de Tanque Rodoviário de Produtos Perigosos com Resina Ester Vinílica Reforçada com Fibra de Vidro – Aplicação e Inspeção. Brasil;
- [34] MITCHELL, M.R. Fundamentals of Modern Fatigue Analysis for Design. USA, Rockwell Science Center;
- [35] MOSS, DENNIS R. Pressure Vessel Design Manual. Houston, USA, Gulf Publishing Company, 1987;
- [36] NIEMANN, GUSTAV Elementos de Máquinas. Volume I. São Paulo, Brasil, Editora Edgard Blücher Ltda., 1976;
- [37] O ESTADO DE SÃO PAULO Estudo Defende Melhora de Ferrovia entre SP e Rio. Matéria publicada em 16 de setembro de 2000;

- [38] O ESTADO DE SÃO PAULO Vazamento de Ácido Atinge Mata da Serra do Mar. Matéria publicada em 19 de setembro de 2000;
- [39] OSGOOD, CARL C. *Fatigue Design*. 2<sup>nd</sup> edition, Great Britain, Pergamon Press, 1982;
- [40] RANGANATHAN, R. and YANG, Y. S. Impact of Liquid Load on the Braking Characteristics of Partially Filled Tank Vehicles. Vehicle System Dynamics 26, pp. 223-240, 1996;
- [41] ROARK, J. RAYMOND and YOUNG, WARREN C. *Formulas for Stress and Strain*. 5<sup>a</sup> ed., USA, MacGraw Hill Book Company, 1982;
- [42] ROLFE, STANLEY T. and BARSOM, JOHN M. *Fracture and Fatigue Control in Structures*. USA, Prentice Hall, 1977;
- [43] SAE SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS SAE J 403 *Chemical Compositions of SAE Carbon Steels*. in SAE Handbook Materials, USA, 1992;
- [44] SAE SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS SAE J 404 *Chemical Compositions of SAE Alloy Steels*. in SAE Handbook Materials, USA, 1992;
- [45] SAE SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS SAE J 1099 *Technical Report on Fatigue Properties*. in SAE Handbook Materials, USA, 1992;
- [46] SHIGLEY, JOSEPH EDWARD and MITCHELL, LARRY D. *Mechanical Engineering Design*. X ed. Tokyo, McGraw-Hill, 1983;
- [47] SHIGLEY, JOSEPH EDWARD *Mechanical Engineering Design*. 3<sup>rd</sup> ed. Tokyo, McGraw Hill Book Company, 1981;

- [48] SPYRAKOS, CONSTANTINE C. *Finite Element Modeling in Engineering Practice*. Pittsburgh, Algor Inc. Publishing Division, 1996;
- [49] SUH, NAM P.; TURNER, ARTHUR P. L. *Elements of The Mechanical Behavior of Solids*. Washington, D.C., Scripta Book Company, McGraw Hill Book Company;
- [50] SURESH, SUBRA *Fatigue of Materials*. 2<sup>nd</sup> edition United Kingdom, Cambridge University Press, 1998;
- [51] TELLES, PEDRO CARLOS DA SILVA *Vasos de Pressão*. 2<sup>a</sup> edição Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1996;
- [52] TELLES, PEDRO CARLOS DA SILVA *Materiais para Equipamentos de Processo*. 1<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro, Livraria Interciência Ltda., 1976;
- [53] TIMOSHENKO, STEPHEN P. and WOINOWSKI-KRIEGER, S. *Theory of Plates and Shells*. 2<sup>nd</sup> ed. Singapore, McGraw-Hill, 1985.



**ANEXOS**

**ANEXO A1****TABELAS DE CÁLCULO PARA O CICLO DE SOLICITAÇÕES GLOBAIS DE FLEXÃO**  
**MÉTODO DE SINES - MALHA INICIAL**

Tabela A1.1 - Cálculo de  $\sigma_{1a}$  e  $\sigma_{1m}$ 

N <sup>o</sup>	$\sigma_1$ CASO1	$\sigma_1$ CASO3	$\sigma_1$ CASO4	$\sigma_1$ CASO5	$\sigma_1$ MAX	$\sigma_1$ MIN	$\sigma_{1a}$	$\sigma_{1m}$
5562	22,94	16,68	19,11	34,22	34,22	16,68	8,77	25,45
5563	7,58	6,04	8,18	9,42	9,42	6,04	1,69	7,73
5565	22,84	15,70	18,69	35,59	35,59	15,70	9,95	25,64
5567	13,90	10,84	14,95	17,46	17,46	10,84	3,31	14,15
5596	11,40	10,90	9,67	13,26	13,26	9,67	1,79	11,46
5597	11,42	10,98	9,66	9,10	11,42	9,10	1,16	10,26
5612	9,82	9,63	8,72	10,82	10,82	8,72	1,05	9,77
5700	30,05	26,59	25,26	38,16	38,16	25,26	6,45	31,71
5750	11,07	8,44	9,40	15,93	15,93	8,44	3,75	12,19
5752	28,78	26,29	23,07	36,10	32,18	23,07	6,52	29,58
5753	25,89	24,09	20,26	32,18	32,18	20,26	5,96	26,22
5754	19,98	15,41	16,71	28,54	28,54	15,41	6,57	21,98
5759	27,42	25,22	22,65	33,68	33,68	22,65	5,52	28,16
5928	11,62	13,39	11,96	9,13	13,39	9,13	2,13	11,26
5931	19,25	17,17	13,33	26,15	26,15	13,33	6,41	19,74
5932	23,17	26,44	23,36	18,61	26,44	18,61	3,91	22,53
5934	13,85	13,12	11,19	8,51	13,85	8,51	2,67	11,18
5938	24,49	23,63	19,96	28,74	28,74	19,96	4,39	24,35
6044	5,97	7,18	7,62	3,43	7,62	3,43	2,09	5,52
6048	12,78	15,39	15,71	7,36	15,71	7,36	4,17	11,53
6053	18,91	20,08	18,29	17,75	20,08	17,75	1,17	18,92
6129	12,79	15,39	15,70	7,37	15,70	7,37	4,17	11,54
6158	7,82	8,44	5,89	8,27	8,44	5,89	1,28	7,16
6159	5,39	6,51	4,77	8,43	8,43	4,77	1,83	6,60
6173	6,35	7,28	5,28	6,20	7,28	5,28	1,00	6,28
6235	24,48	23,62	19,96	28,73	28,73	19,96	4,39	24,34



Tabela A1.3 - Cálculo de  $\sigma_{3a}$  e  $\sigma_{3m}$ 

Nº	$\sigma_3$ CASO 1	$\sigma_3$ CASO 3	$\sigma_3$ CASO 4	$\sigma_3$ CASO 5	$\sigma_3$ MÁX	$\sigma_3$ MÍN	$\sigma_{3a}$	$\sigma_{3m}$
5562	-3,07	0,00	-10,66	-3,59	0,00	-10,66	5,33	-5,33
5563	-26,66	-15,52	-22,36	-45,01	-15,52	-45,01	14,74	-30,27
5565	-10,55	-6,03	-10,53	-16,91	-6,03	-16,91	5,44	-11,47
5567	-26,19	-14,75	-21,87	-44,91	-14,75	-44,91	15,08	-29,83
5596	-28,07	-22,52	-16,20	-43,71	-16,20	-43,71	13,75	-29,95
5597	-25,37	-20,19	-14,41	-42,81	-14,41	-42,81	14,20	-28,61
5612	-25,35	-20,13	-14,48	-39,87	-14,48	-39,87	12,70	-27,18
5700	-15,08	-12,02	-10,78	-22,31	-10,78	-22,31	5,77	-16,55
5750	-37,05	-33,01	-25,82	-50,28	-25,82	-50,28	12,23	-38,05
5752	-16,84	-13,35	-11,62	-25,21	-11,62	-25,21	6,79	-18,41
5753	-19,65	-15,57	-13,54	-29,41	-13,54	-29,41	7,94	-21,47
5754	-36,86	-32,97	-25,38	-50,01	-25,38	-50,01	12,32	-37,69
5759	-18,10	-7,53	-9,90	-38,19	-7,53	-38,19	15,33	-22,86
5928	-33,05	-32,74	-23,05	-40,36	-23,05	-40,36	8,66	-31,71
5931	-21,75	-24,25	-18,45	-20,56	-18,45	-24,25	2,90	-21,35
5932	-31,04	-30,32	-20,63	-39,12	-20,63	-39,12	9,24	-29,87
5934	-29,59	-39,13	-30,80	-24,82	-24,82	-39,13	7,15	-31,98
5938	-28,42	-38,47	-30,14	-13,42	-13,42	-38,47	12,53	-25,94
6044	-24,19	-25,52	-25,80	-21,54	-21,54	-25,80	2,13	-23,67
6048	-22,73	-23,82	-24,39	-20,24	-20,24	-24,39	2,08	-22,31
6053	-6,96	-12,21	-18,33	0,00	0,00	-18,33	9,17	-9,17
6129	-22,74	-23,84	-24,40	-20,25	-20,25	-24,40	2,07	-22,33
6158	-26,28	-21,48	-14,93	-40,54	-14,93	-40,54	12,80	-27,73
6159	-25,74	-21,07	-14,63	-37,16	-14,63	-37,16	11,27	-25,89
6173	-25,13	-20,43	-14,14	-36,95	-14,14	-36,95	11,40	-25,55
6235	-28,43	-38,47	-30,14	-13,42	-13,42	-38,47	12,52	-25,95

Tabela A1.4 - Cálculo de  $\sigma_{g.c}$ 

N <sup>o</sup>	$\sigma_{1a}$	$\sigma_{2a}$	$\sigma_{3a}$	$\sigma_{g.c}$
5562	8,77	0,47	5,33	7,22
5563	1,69	0,00	14,74	13,97
5565	9,95	0,00	5,44	8,63
5567	3,31	0,00	15,08	13,73
5596	1,79	0,00	13,75	12,95
5597	1,16	0,00	14,20	13,66
5612	1,05	0,00	12,70	12,21
5700	6,45	0,00	5,77	6,14
5750	3,75	0,00	12,23	10,86
5752	6,52	0,00	6,79	6,66
5753	5,96	0,00	7,94	7,16
5754	6,57	0,00	12,32	10,68
5759	5,52	0,00	15,33	13,45
5928	2,13	0,00	8,66	7,81
5931	6,41	0,00	2,90	5,56
5932	3,91	0,00	9,24	8,04
5934	2,67	0,00	7,15	6,26
5938	4,39	0,00	12,53	11,01
6044	2,09	0,00	2,13	2,11
6048	4,17	0,00	2,08	3,61
6053	1,17	3,95	9,17	7,03
6129	4,17	0,00	2,07	3,61
6158	1,28	0,00	12,80	12,21
6159	1,83	0,00	11,27	10,47
6173	1,00	0,00	11,40	10,94
6235	4,39	0,00	12,52	11,01

Tabela A1.5 - Cálculo de  $\sigma_{me}$ 

N <sup>o</sup>	$\sigma_{1m}$	$\sigma_{2m}$	$\sigma_{3m}$	$\sigma_{me}$
5562	25,45	0,47	-5,33	28,33
5563	7,73	0,00	-30,27	34,78
5565	25,64	0,00	-11,47	32,91
5567	14,15	0,00	-29,83	38,89
5596	11,46	0,00	-29,95	37,04
5597	10,26	0,00	-28,61	34,89
5612	9,77	0,00	-27,18	33,16
5700	31,71	0,00	-16,55	42,47
5750	12,19	0,00	-38,05	45,39
5752	29,58	0,00	-18,41	41,94
5753	26,22	0,00	-21,47	41,37
5754	21,98	0,00	-37,69	52,27
5759	28,16	0,00	-22,86	44,27
5928	11,26	0,00	-31,71	38,59
5931	19,74	0,00	-21,35	35,59
5932	22,53	0,00	-29,87	45,53
5934	11,18	0,00	-31,98	38,79
5938	24,35	0,00	-25,94	43,56
6044	5,52	0,00	-23,67	26,86
6048	11,53	0,00	-22,31	29,80
6053	18,92	3,95	-9,17	24,34
6129	11,54	0,00	-22,33	29,82
6158	7,16	0,00	-27,73	31,92
6159	6,60	0,00	-25,89	29,74
6173	6,28	0,00	-25,55	29,20
6235	24,34	0,00	-25,95	43,56

Tabela A1.6 - Cálculo de Sensibilidade para  $\sigma_a$ 

N <sup>o</sup>	$\sigma_{a,e}$	$\sigma_{m,e}$	$\sigma_a$ (p/K=2,93)	$\sigma_a$ (p/K=4,0)	$\sigma_a$ (p/K=5,0)
5562	7,22	28,33	25,52	37,68	50,99
5563	13,97	34,78	51,83	78,37	108,92
5565	8,63	32,91	31,55	47,36	65,28
5567	13,73	38,89	52,56	80,82	114,55
5596	12,95	37,04	48,88	74,58	104,74
5597	13,66	34,89	50,70	76,69	106,64
5612	12,21	33,16	44,73	67,21	92,74
5700	6,14	42,47	24,18	37,78	54,58
5750	10,86	45,39	43,82	69,40	102,02
5752	6,66	41,94	26,13	40,72	58,65
5753	7,16	41,37	27,96	43,45	62,39
5754	10,68	52,27	45,71	75,06	115,75
5759	13,45	44,27	53,79	84,73	123,70
5928	7,81	38,59	29,85	45,84	64,87
5931	5,56	35,59	20,75	31,48	43,91
5932	8,04	45,53	32,48	51,47	75,72
5934	6,26	38,79	23,96	36,83	52,17
5938	11,01	43,56	43,78	68,73	99,91
6044	2,11	26,86	7,39	10,85	14,60
6048	3,61	29,80	12,91	19,16	26,08
6053	7,03	24,34	24,16	35,20	46,95
6129	3,61	29,82	12,89	19,14	26,04
6158	12,21	31,92	44,34	66,32	91,03
6159	10,47	29,74	37,41	55,51	75,52
6173	10,94	29,20	38,91	57,63	78,24
6235	11,01	43,56	43,76	68,71	99,89



**ANEXO A2**

**TABELAS DE CÁLCULO PARA O CICLO DE SOLICITAÇÕES GLOBAIS DE FLEXÃO**  
**MÉTODO ASME - MALHA INICIAL**

Tabela A2.1 - Cálculo de ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ), ( $\sigma_2 - \sigma_3$ ) e ( $\sigma_3 - \sigma_1$ ) - CASO I - Tensões em MPa

N <sup>o</sup>	$\sigma_1$ CASO I	$\sigma_2$ CASO I	$\sigma_3$ CASO I	$\sigma_1 - \sigma_2$	$\sigma_2 - \sigma_3$	$\sigma_3 - \sigma_1$
5562	22,94	0,00	-3,07	22,94	3,07	-26,02
5563	7,58	0,00	-26,66	7,58	26,66	-34,24
5565	22,84	0,00	-10,55	22,84	10,55	-33,38
5567	13,90	0,00	-26,19	13,90	26,19	-40,09
5596	11,40	0,00	-28,07	11,40	28,07	-39,47
5597	11,42	0,00	-25,37	11,42	25,37	-36,79
5612	9,82	0,00	-25,35	9,82	25,35	-35,17
5700	30,05	0,00	-15,08	30,05	15,08	-45,14
5750	11,07	0,00	-37,05	11,07	37,05	-48,11
5752	28,78	0,00	-16,84	28,78	16,84	-45,63
5753	25,89	0,00	-19,65	25,89	19,65	-45,53
5754	19,98	0,00	-36,86	19,98	36,86	-56,85
5759	27,42	0,00	-18,10	27,42	18,10	-45,52
5928	11,62	0,00	-33,05	11,62	33,05	-44,67
5931	19,25	0,00	-21,75	19,25	21,75	-40,99
5932	23,17	0,00	-31,04	23,17	31,04	-54,22
5934	13,85	0,00	-29,59	13,85	29,59	-43,44
5938	24,49	0,00	-28,42	24,49	28,42	-52,92
6044	5,97	0,00	-24,19	5,97	24,19	-30,16
6048	12,78	0,00	-22,73	12,78	22,73	-35,51
6053	18,91	0,00	-6,96	18,91	6,96	-25,86
6129	12,79	0,00	-22,74	12,79	22,74	-35,53
6158	7,82	0,00	-26,28	7,82	26,28	-34,10
6159	5,39	0,00	-25,74	5,39	25,74	-31,12
6173	6,35	0,00	-25,13	6,35	25,13	-31,48
6235	24,48	0,00	-28,43	24,48	28,43	-52,91

Tabela A2.2 - Cálculo de  $(\sigma_1 - \sigma_2)$ ,  $(\sigma_2 - \sigma_3)$  e  $(\sigma_3 - \sigma_1)$  - CASO 3 - Tensões em MPa

N <sup>o</sup>	$\sigma_1$ CASO 3	$\sigma_2$ CASO 3	$\sigma_3$ CASO 3	$\sigma_1 - \sigma_2$	$\sigma_2 - \sigma_3$	$\sigma_3 - \sigma_1$
5562	16,68	0,95	0,00	15,73	0,95	-16,68
5563	6,04	0,00	-15,52	6,04	15,52	-21,56
5565	15,70	0,00	-6,03	15,70	6,03	-21,73
5567	10,84	0,00	-14,75	10,84	14,75	-25,59
5596	10,90	0,00	-22,52	10,90	22,52	-33,42
5597	10,98	0,00	-20,19	10,98	20,19	-31,16
5612	9,63	0,00	-20,13	9,63	20,13	-29,76
5700	26,59	0,00	-12,02	26,59	12,02	-38,60
5750	8,44	0,00	-33,01	8,44	33,01	-41,45
5752	26,29	0,00	-13,35	26,29	13,35	-39,65
5753	24,09	0,00	-15,57	24,09	15,57	-39,66
5754	15,41	0,00	-32,97	15,41	32,97	-48,38
5759	25,22	0,00	-7,53	25,22	7,53	-32,75
5928	13,39	0,00	-32,74	13,39	32,74	-46,13
5931	17,17	0,00	-24,25	17,17	24,25	-41,42
5932	26,44	0,00	-30,32	26,44	30,32	-56,76
5934	13,12	0,00	-39,13	13,12	39,13	-52,25
5938	23,63	0,00	-38,47	23,63	38,47	-62,10
6044	7,18	0,00	-25,52	7,18	25,52	-32,70
6048	15,39	0,00	-23,82	15,39	23,82	-39,21
6053	20,08	0,00	-12,21	20,08	12,21	-32,30
6129	15,39	0,00	-23,84	15,39	23,84	-39,22
6158	8,44	0,00	-21,48	8,44	21,48	-29,92
6159	6,51	0,00	-21,07	6,51	21,07	-27,58
6173	7,28	0,00	-20,43	7,28	20,43	-27,71
6235	23,62	0,00	-38,47	23,62	38,47	-62,09

Tabela A2.3 – Cálculo de  $(\sigma_1 - \sigma_2)$ ,  $(\sigma_2 - \sigma_3)$  e  $(\sigma_3 - \sigma_1)$  – CASO 4 - Tensões em MPa

Nº	$\sigma_1$ CASO 4	$\sigma_2$ CASO 4	$\sigma_3$ CASO 4	$\sigma_1 - \sigma_2$	$\sigma_2 - \sigma_3$	$\sigma_3 - \sigma_1$
5562	19,11	0,00	-10,66	19,11	10,66	-29,77
5563	8,18	0,00	-22,36	8,18	22,36	-30,54
5565	18,69	0,00	-10,53	18,69	10,53	-29,22
5567	14,95	0,00	-21,87	14,95	21,87	-36,82
5596	9,67	0,00	-16,20	9,67	16,20	-25,87
5597	9,66	0,00	-14,41	9,66	14,41	-24,06
5612	8,72	0,00	-14,48	8,72	14,48	-23,20
5700	25,26	0,00	-10,78	25,26	10,78	-36,04
5750	9,40	0,00	-25,82	9,40	25,82	-35,21
5752	23,07	0,00	-11,62	23,07	11,62	-34,69
5753	20,26	0,00	-13,54	20,26	13,54	-33,79
5754	16,71	0,00	-25,38	16,71	25,38	-42,08
5759	22,65	0,00	-9,90	22,65	9,90	-32,55
5928	11,96	0,00	-23,05	11,96	23,05	-35,01
5931	13,33	0,00	-18,45	13,33	18,45	-31,78
5932	23,36	0,00	-20,63	23,36	20,63	-43,98
5934	11,19	0,00	-30,80	11,19	30,80	-41,98
5938	19,96	0,00	-30,14	19,96	30,14	-50,10
6044	7,62	0,00	-25,80	7,62	25,80	-33,41
6048	15,71	0,00	-24,39	15,71	24,39	-40,10
6053	18,29	0,00	-18,33	18,29	18,33	-36,63
6129	15,70	0,00	-24,40	15,70	24,40	-40,10
6158	5,89	0,00	-14,93	5,89	14,93	-20,82
6159	4,77	0,00	-14,63	4,77	14,63	-19,40
6173	5,28	0,00	-14,14	5,28	14,14	-19,42
6235	19,96	0,00	-30,14	19,96	30,14	-50,09

Tabela A2.4 - Cálculo de  $(\sigma_1 - \sigma_2)$ ,  $(\sigma_2 - \sigma_3)$  e  $(\sigma_3 - \sigma_1)$  - CASO 5 - Tensões em MPa

Nº	$\sigma_1$ CASO 5	$\sigma_2$ CASO 5	$\sigma_3$ CASO 5	$\sigma_1 - \sigma_2$	$\sigma_2 - \sigma_3$	$\sigma_3 - \sigma_1$
5562	34,22	0,00	-3,59	34,22	3,59	-37,81
5563	9,42	0,00	-45,01	9,42	45,01	-54,43
5565	35,59	0,00	-16,91	35,59	16,91	-52,50
5567	17,46	0,00	-44,91	17,46	44,91	-62,37
5596	13,26	0,00	-43,71	13,26	43,71	-56,96
5597	9,10	0,00	-42,81	9,10	42,81	-51,91
5612	10,82	0,00	-39,87	10,82	39,87	-50,70
5700	38,16	0,00	-22,31	38,16	22,31	-60,47
5750	15,93	0,00	-50,28	15,93	50,28	-66,22
5752	36,10	0,00	-25,21	36,10	25,21	-61,31
5753	32,18	0,00	-29,41	32,18	29,41	-61,59
5754	28,54	0,00	-50,01	28,54	50,01	-78,55
5759	33,68	0,00	-38,19	33,68	38,19	-71,87
5928	9,13	0,00	-40,36	9,13	40,36	-49,49
5931	26,15	0,00	-20,56	26,15	20,56	-46,71
5932	18,61	0,00	-39,12	18,61	39,12	-57,73
5934	8,51	0,00	-24,82	8,51	24,82	-33,34
5938	28,74	0,00	-13,42	28,74	13,42	-42,16
6044	3,43	0,00	-21,54	3,43	21,54	-24,97
6048	7,36	0,00	-20,24	7,36	20,24	-27,60
6053	17,75	7,89	0,00	9,86	7,89	-17,75
6129	7,37	0,00	-20,25	7,37	20,25	-27,62
6158	8,27	0,00	-40,54	8,27	40,54	-48,80
6159	8,43	0,00	-37,16	8,43	37,16	-45,58
6173	6,20	0,00	-36,95	6,20	36,95	-43,15
6235	28,73	0,00	-13,42	28,73	13,42	-42,15

Tabela A2.5 – Cálculo da Diferença em Valor Absoluto entre  $(\sigma_1 - \sigma_2)_{M\acute{A}X}$  e  $(\sigma_1 - \sigma_2)_{M\acute{I}N}$  – Tensões em MPa

N <sup>o</sup>	$\sigma_1 - \sigma_2$ , CASO1	$\sigma_1 - \sigma_2$ , CASO3	$\sigma_1 - \sigma_2$ , CASO4	$\sigma_1 - \sigma_2$ , CASO5	$\sigma_1 - \sigma_2$ , M <sup>Á</sup> X	$\sigma_1 - \sigma_2$ , M <sup>Í</sup> N	$\Delta$ ABS
5562	22,94	15,73	19,11	34,22	34,22	15,73	18,49
5563	7,58	6,04	8,18	9,42	9,42	6,04	3,38
5565	22,84	15,70	18,69	35,59	35,59	15,70	19,89
5567	13,90	10,84	14,95	17,46	17,46	10,84	6,62
5596	11,40	10,90	9,67	13,26	13,26	9,67	3,59
5597	11,42	10,98	9,66	9,10	11,42	9,10	2,32
5612	9,82	9,63	8,72	10,82	10,82	8,72	2,10
5700	30,05	26,59	25,26	38,16	38,16	25,26	12,90
5750	11,07	8,44	9,40	15,93	15,93	8,44	7,50
5752	28,78	26,29	23,07	36,10	36,10	23,07	13,03
5753	25,89	24,09	20,26	32,18	32,18	20,26	11,92
5754	19,98	15,41	16,71	28,54	28,54	15,41	13,13
5759	27,42	25,22	22,65	33,68	33,68	22,65	11,03
5928	11,62	13,39	11,96	9,13	13,39	9,13	4,26
5931	19,25	17,17	13,33	26,15	26,15	13,33	12,82
5932	23,17	26,44	23,36	18,61	26,44	18,61	7,83
5934	13,85	13,12	11,19	8,51	13,85	8,51	5,34
5938	24,49	23,63	19,96	28,74	28,74	19,96	8,78
6044	5,97	7,18	7,62	3,43	7,62	3,43	4,19
6048	12,78	15,39	15,71	7,36	15,71	7,36	8,34
6053	18,91	20,08	18,29	9,86	20,08	9,86	10,23
6129	12,79	15,39	15,70	7,37	15,70	7,37	8,33
6158	7,82	8,44	5,89	8,27	8,44	5,89	2,55
6159	5,39	6,51	4,77	8,43	8,43	4,77	3,66
6173	6,35	7,28	5,28	6,20	7,28	5,28	2,00
6235	24,48	23,62	19,96	28,73	28,73	19,96	8,78

Tabela A2.6 - Cálculo da Diferença em Valor Absoluto entre ( $\sigma_2 - \sigma_3$ ) MÁX e ( $\sigma_2 - \sigma_3$ ) MÍN - Tensões em MPa

N <sup>o</sup>	$\sigma_2 - \sigma_3$ CASO1	$\sigma_2 - \sigma_3$ CASO3	$\sigma_2 - \sigma_3$ CASO4	$\sigma_2 - \sigma_3$ CASO5	$\sigma_2 - \sigma_3$ MÁX	$\sigma_2 - \sigma_3$ MÍN	$\Delta$ ABS
5562	3,07	0,95	10,66	3,59	10,66	0,95	9,71
5563	26,66	15,52	22,36	45,01	45,01	15,52	29,48
5565	10,55	6,03	10,53	16,91	16,91	6,03	10,89
5567	26,19	14,75	21,87	44,91	44,91	14,75	30,15
5596	28,07	22,52	16,20	43,71	43,71	16,20	27,50
5597	25,37	20,19	14,41	42,81	42,81	14,41	28,40
5612	25,35	20,13	14,48	39,87	39,87	14,48	25,40
5700	15,08	12,02	10,78	22,31	22,31	10,78	11,53
5750	37,05	33,01	25,82	50,28	50,28	25,82	24,47
5752	16,84	13,35	11,62	25,21	25,21	11,62	13,58
5753	19,65	15,57	13,54	29,41	29,41	13,54	15,87
5754	36,86	32,97	25,38	50,01	50,01	25,38	24,64
5759	18,10	7,53	9,90	38,19	38,19	7,53	30,66
5928	33,05	32,74	23,05	40,36	40,36	23,05	17,31
5931	21,75	24,25	18,45	20,56	24,25	18,45	5,80
5932	31,04	30,32	20,63	39,12	39,12	20,63	18,49
5934	29,59	39,13	30,80	24,82	39,13	24,82	14,31
5938	28,42	38,47	30,14	13,42	38,47	13,42	25,05
6044	24,19	25,52	25,80	21,54	25,80	21,54	4,26
6048	22,73	23,82	24,39	20,24	24,39	20,24	4,15
6053	6,96	12,21	18,33	7,89	18,33	6,96	11,38
6129	22,74	23,84	24,40	20,25	24,40	20,25	4,15
6158	26,28	21,48	14,93	40,54	40,54	14,93	25,60
6159	25,74	21,07	14,63	37,16	37,16	14,63	22,53
6173	25,13	20,43	14,14	36,95	36,95	14,14	22,81
6235	28,43	38,47	30,14	13,42	38,47	13,42	25,05

Tabela A2.7 - Cálculo da Diferença em Valor Absoluto entre  $(\sigma_3 - \sigma_1)_{M\acute{A}X}$  e  $(\sigma_3 - \sigma_1)_{M\acute{I}N}$  - Tensões em MPA

N <sup>o</sup>	$\sigma_3 - \sigma_1$ CASO1	$\sigma_3 - \sigma_1$ CASO3	$\sigma_3 - \sigma_1$ CASO4	$\sigma_3 - \sigma_1$ CASO5	$\sigma_3 - \sigma_1$ M <sup>Á</sup> X	$\sigma_3 - \sigma_1$ M <sup>Í</sup> N	Δ ABS
5562	-26,02	-16,68	-29,77	-37,81	-16,68	-37,81	21,13
5563	-34,24	-21,56	-30,54	-54,43	-21,56	-54,43	32,87
5565	-33,38	-21,73	-29,22	-52,50	-21,73	-52,50	30,78
5567	-40,09	-25,59	-36,82	-62,37	-25,59	-62,37	36,77
5596	-39,47	-33,42	-25,87	-56,96	-25,87	-56,96	31,09
5597	-36,79	-31,16	-24,06	-51,91	-24,06	-51,91	27,84
5612	-35,17	-29,76	-23,20	-50,70	-23,20	-50,70	27,50
5700	-45,14	-38,60	-36,04	-60,47	-36,04	-60,47	24,43
5750	-48,11	-41,45	-35,21	-66,22	-35,21	-66,22	31,01
5752	-45,63	-39,65	-34,69	-61,31	-34,69	-61,31	26,62
5753	-45,53	-39,66	-33,79	-61,59	-33,79	-61,59	27,80
5754	-56,85	-48,38	-42,08	-78,55	-42,08	-78,55	36,47
5759	-45,52	-32,75	-32,55	-71,87	-32,55	-71,87	39,32
5928	-44,67	-46,13	-35,01	-49,49	-35,01	-49,49	14,48
5931	-40,99	-41,42	-31,78	-46,71	-31,78	-46,71	14,93
5932	-54,22	-56,76	-43,98	-57,73	-43,98	-57,73	13,74
5934	-43,44	-52,25	-41,98	-33,34	-33,34	-52,25	18,91
5938	-52,92	-62,10	-50,10	-42,16	-42,16	-62,10	19,94
6044	-30,16	-32,70	-33,41	-24,97	-24,97	-33,41	8,45
6048	-35,51	-39,21	-40,10	-27,60	-27,60	-40,10	12,50
6053	-25,86	-32,30	-36,63	-17,75	-17,75	-36,63	18,88
6129	-35,53	-39,22	-40,10	-27,62	-27,62	-40,10	12,48
6158	-34,10	-29,92	-20,82	-48,80	-20,82	-48,80	27,98
6159	-31,12	-27,58	-19,40	-45,58	-19,40	-45,58	26,19
6173	-31,48	-27,71	-19,42	-43,15	-19,42	-43,15	23,73
6235	-52,91	-62,09	-50,09	-42,15	-42,15	-62,09	19,93



**ANEXO A3**

**TABELAS DE CÁLCULO PARA O CICLO DE SOLICITAÇÕES GLOBAIS DE FLEXÃO**  
**MÉTODO DE SINES – MALHA REFINADA**

Tabela A3.1 - Cálculo de  $\sigma_{1a}$  e  $\sigma_{1m}$ 

N <sup>o</sup>	$\sigma_1$ CASO1	$\sigma_1$ CASO3	$\sigma_1$ CASO4	$\sigma_1$ CASO5	$\sigma_1$ MAX	$\sigma_1$ MIN	$\sigma_{1a}$	$\sigma_{1m}$
43048	19,29	14,19	15,09	24,12	24,12	14,19	4,97	19,16
43049	23,12	17,53	17,72	34,73	34,73	17,53	8,60	26,13
43050	26,19	30,07	19,97	39,03	39,03	19,97	9,53	29,50
43071	31,53	27,19	23,87	42,76	42,76	23,87	9,44	33,31
43703	23,12	17,53	17,72	34,73	34,73	17,53	8,60	26,13
43704	26,19	30,06	19,97	39,03	39,03	19,97	9,53	29,50

Tabela A3.2 - Cálculo de  $\sigma_{2a}$  e  $\sigma_{2m}$ 

N <sup>o</sup>	$\sigma_2$ CASO1	$\sigma_2$ CASO3	$\sigma_2$ CASO4	$\sigma_2$ CASO5	$\sigma_2$ MAX	$\sigma_2$ MIN	$\sigma_{2a}$	$\sigma_{2m}$
43048	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
43049	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
43050	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
43071	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
43703	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
43704	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela A3.3 - Cálculo de  $\sigma_{3a}$  e  $\sigma_{3m}$ 

N <sup>o</sup>	$\sigma_3$ CASO1	$\sigma_3$ CASO3	$\sigma_3$ CASO4	$\sigma_3$ CASO5	$\sigma_3$ MAX	$\sigma_3$ MIN	$\sigma_{3a}$	$\sigma_{3m}$
43048	-32,54	-30,15	-23,27	-46,78	-23,27	-46,78	11,76	-35,03
43049	-33,67	-30,62	-23,94	-44,68	-23,94	-44,68	10,37	-34,31
43050	-33,47	-20,31	-23,30	-45,04	-20,31	-45,04	12,36	-32,68
43071	-16,76	-7,44	-9,38	-34,69	-7,44	-34,69	13,63	-21,06
43703	-33,67	-30,61	-23,94	-44,68	-23,94	-44,68	10,37	-34,31
43704	-33,47	-20,32	-23,30	-45,04	-20,32	-45,04	12,36	-32,68

Tabela A3.4 - Cálculo de  $\sigma_{ac}$ 

N <sup>o</sup>	$\sigma_{1a}$	$\sigma_{2a}$	$\sigma_{3a}$	$\sigma_{ac}$
43048	4,97	0,00	11,76	10,22
43049	8,60	0,00	10,37	9,61
43050	9,53	0,00	12,36	11,22
43071	9,44	0,00	13,63	12,09
43703	8,60	0,00	10,37	9,61
43704	9,53	0,00	12,36	11,21

Tabela A3.5 - Cálculo de  $\sigma_{m,e}$ 

N <sup>o</sup>	$\sigma_{1m}$	$\sigma_{2m}$	$\sigma_{3m}$	$\sigma_{m,e}$
43048	19,16	0,00	-35,03	47,59
43049	26,13	0,00	-34,31	52,50
43050	29,50	0,00	-32,68	53,87
43071	33,31	0,00	-21,06	47,49
43703	26,13	0,00	-34,31	52,50
43704	29,50	0,00	-32,68	53,87

Tabela A3.6 - Cálculo de Sensibilidade para  $\sigma_a$ 

N <sup>o</sup>	$\sigma_{a,e}$	$\sigma_{m,e}$	$\sigma_a$ (p/ K <sub>f</sub> =2,93)	$\sigma_a$ (p/ K <sub>f</sub> =4,0)	$\sigma_a$ (p/ K <sub>f</sub> =5,0)
43048	10,22	47,59	42,04	67,30	100,33
43049	9,61	52,50	41,23	67,78	104,72
43050	11,22	53,87	48,72	80,74	126,13
43071	12,09	47,49	49,67	79,49	118,42
43703	9,61	52,50	41,22	67,77	104,70
43704	11,21	53,87	48,71	80,72	126,10

**ANEXO A4**

**TABELAS DE CÁLCULO PARA O CICLO DE SOLICITAÇÕES GLOBAIS DE FLEXÃO**  
**MÉTODO ASME – MALHA REFINADA**

Tabela A4.1 - Cálculo de  $(\sigma_1 - \sigma_2)$ ,  $(\sigma_2 - \sigma_3)$  e  $(\sigma_3 - \sigma_1)$  - CASO1 - Tensões em MPa

N6	$\sigma_1$ CASO 1	$\sigma_2$ CASO 1	$\sigma_3$ CASO 1	$\sigma_1 - \sigma_2$	$\sigma_2 - \sigma_3$	$\sigma_3 - \sigma_1$
43048	19,29	0,00	-32,54	19,29	32,54	-51,84
43049	23,12	0,00	-33,67	23,12	33,67	-56,79
43050	26,19	0,00	-33,47	26,19	33,47	-59,66
43071	31,53	0,00	-16,76	31,53	16,76	-48,29
43703	23,12	0,00	-33,67	23,12	33,67	-56,79
43704	26,19	0,00	-33,47	26,19	33,47	-59,65

Tabela A4.2 - Cálculo de  $(\sigma_1 - \sigma_2)$ ,  $(\sigma_2 - \sigma_3)$  e  $(\sigma_3 - \sigma_1)$  - CASO3 - Tensões em MPa

N6	$\sigma_1$ CASO 3	$\sigma_2$ CASO 3	$\sigma_3$ CASO 3	$\sigma_1 - \sigma_2$	$\sigma_2 - \sigma_3$	$\sigma_3 - \sigma_1$
43048	14,19	0,00	-30,15	14,19	30,15	-44,34
43049	17,53	0,00	-30,62	17,53	30,62	-48,14
43050	30,07	0,00	-20,31	30,07	20,31	-50,38
43071	27,19	0,00	-7,44	27,19	7,44	-34,62
43703	17,53	0,00	-30,61	17,53	30,61	-48,14
43704	30,06	0,00	-20,32	30,06	20,32	-50,38

Tabela A4.3 - Cálculo de  $(\sigma_1 - \sigma_2)$ ,  $(\sigma_2 - \sigma_3)$  e  $(\sigma_3 - \sigma_1)$  - CASO 4 - Tensões em MPa

N <sup>o</sup>	$\sigma_1$ CASO 4	$\sigma_2$ CASO 4	$\sigma_3$ CASO 4	$\sigma_1 - \sigma_2$	$\sigma_2 - \sigma_3$	$\sigma_3 - \sigma_1$
43048	15,09	0,00	-23,27	15,09	23,27	-38,36
43049	17,72	0,00	-23,94	17,72	23,94	-41,66
43050	19,97	0,00	-23,30	19,97	23,30	-43,27
43071	23,87	0,00	-9,38	23,87	9,38	-33,26
43703	17,72	0,00	-23,94	17,72	23,94	-41,66
43704	19,97	0,00	-23,30	19,97	23,30	-43,27

Tabela A4.4 - Cálculo de  $(\sigma_1 - \sigma_2)$ ,  $(\sigma_2 - \sigma_3)$  e  $(\sigma_3 - \sigma_1)$  - CASO 5 - Tensões em MPa

N <sup>o</sup>	$\sigma_1$ CASO 5	$\sigma_2$ CASO 5	$\sigma_3$ CASO 5	$\sigma_1 - \sigma_2$	$\sigma_2 - \sigma_3$	$\sigma_3 - \sigma_1$
43048	24,12	0,00	-46,78	24,12	46,78	-70,91
43049	34,73	0,00	-44,68	34,73	44,68	-79,41
43050	39,03	0,00	-45,04	39,03	45,04	-84,06
43071	42,76	0,00	-34,69	42,76	34,69	-77,44
43703	34,73	0,00	-44,68	34,73	44,68	-79,40
43704	39,03	0,00	-45,04	39,03	45,04	-84,06

Tabela A4.5 – Cálculo da Diferença em Valor Absoluto entre ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ) MÁX e ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ) MÍN – Tensões em MPa

N <sup>o</sup>	$\sigma_1 - \sigma_2$ CASO 1	$\sigma_1 - \sigma_2$ CASO3	$\sigma_1 - \sigma_2$ CASO4	$\sigma_1 - \sigma_2$ CASO5	$\sigma_1 - \sigma_2$ MÁX	$\sigma_1 - \sigma_2$ MÍN	$\Delta$ ABS
43048	19,29	14,19	15,09	24,12	24,12	14,19	9,94
43049	23,12	17,53	17,72	34,73	34,73	17,53	17,20
43050	26,19	30,07	19,97	39,03	39,03	19,97	19,06
43071	31,53	27,19	23,87	42,76	42,76	23,87	18,88
43703	23,12	17,53	17,72	34,73	34,73	17,53	17,19
43704	26,19	30,06	19,97	39,03	39,03	19,97	19,05

Tabela A4.6 – Cálculo da Diferença em Valor Absoluto entre ( $\sigma_2 - \sigma_3$ ) MÁX e ( $\sigma_2 - \sigma_3$ ) MÍN – Tensões em MPa

N <sup>o</sup>	$\sigma_2 - \sigma_3$ CASO1	$\sigma_2 - \sigma_3$ CASO3	$\sigma_2 - \sigma_3$ CASO4	$\sigma_2 - \sigma_3$ CASO5	$\sigma_2 - \sigma_3$ MÁX	$\sigma_2 - \sigma_3$ MÍN	$\Delta$ ABS
43048	32,54	30,15	23,27	46,78	46,78	23,27	23,51
43049	33,67	30,62	23,94	44,68	44,68	23,94	20,74
43050	33,47	20,31	23,30	45,04	45,04	20,31	24,72
43071	16,76	7,44	9,38	34,69	34,69	7,44	27,25
43703	33,67	30,61	23,94	44,68	44,68	23,94	20,74
43704	33,47	20,32	23,30	45,04	45,04	20,32	24,72

Tabela A4.7 – Cálculo da Diferença em Valor Absoluto entre ( $\sigma_3 - \sigma_1$ ) MÁX e ( $\sigma_3 - \sigma_1$ ) MÍN – Tensões em MPa

N <sup>o</sup>	$\sigma_3 - \sigma_1$ CASO1	$\sigma_3 - \sigma_1$ CASO3	$\sigma_3 - \sigma_1$ CASO4	$\sigma_3 - \sigma_1$ CASO5	$\sigma_3 - \sigma_1$ MÁX	$\sigma_3 - \sigma_1$ MÍN	$\Delta$ ABS
43048	-51,84	-44,34	-38,36	-70,91	-38,36	-70,91	32,54
43049	-56,79	-48,14	-41,66	-79,41	-41,66	-79,41	37,75
43050	-59,66	-50,38	-43,27	-84,06	-43,27	-84,06	40,79
43071	-48,29	-34,62	-33,26	-77,44	-33,26	-77,44	44,19
43703	-56,79	-48,14	-41,66	-79,40	-41,66	-79,40	37,74
43704	-59,65	-50,38	-43,27	-84,06	-43,27	-84,06	40,79

**ANEXO A5**

**TABELAS DE CÁLCULO PARA O CICLO COM SOLICITAÇÕES GLOBAIS DE TORÇÃO**  
**MÉTODO DE SINES – MALHA INICIAL**



Tabela A5.1 – Cálculo de  $\sigma_{1a}$  e  $\sigma_{1m}$

N <sup>o</sup>	$\sigma_1$ CASO1	$\sigma_1$ CASO6	$\sigma_1$ CASO7	$\sigma_1$ MAX	$\sigma_1$ MIN	$\sigma_{1a}$	$\sigma_{1m}$
5562	22,94	26,80	46,21	46,21	22,94	11,63	34,58
5563	7,58	9,23	10,17	10,17	7,58	1,29	8,88
5565	22,84	19,48	40,25	40,25	19,48	10,39	29,86
5567	13,90	20,25	22,36	22,36	13,90	4,23	18,13
5596	11,40	8,89	12,43	12,43	8,89	1,77	10,66
5597	11,42	8,65	9,82	11,42	8,65	1,39	10,03
5612	9,82	8,96	9,90	9,90	8,96	0,47	9,43
5700	30,05	26,41	42,14	42,14	26,41	7,86	34,28
5750	11,07	11,53	18,95	18,95	11,07	3,94	15,01
5752	28,78	23,95	40,14	40,14	23,95	8,09	32,04
5753	25,89	7,61	35,78	35,78	7,61	14,08	21,70
5754	19,98	24,81	40,94	40,94	19,98	10,48	30,46
5759	27,42	31,49	50,39	50,39	27,42	11,48	38,90
5928	11,62	13,29	12,92	13,29	11,62	0,83	12,46
5931	19,25	10,24	9,61	19,25	9,61	4,82	14,43
5932	23,17	29,92	33,56	33,56	23,17	5,20	28,37
5934	13,85	13,55	44,52	44,52	13,55	15,49	29,04
5938	24,49	28,24	46,26	46,26	24,49	10,89	35,38
6044	5,97	8,02	5,00	8,02	5,00	1,51	6,51
6048	12,78	18,98	15,68	18,98	12,78	3,10	15,88
6053	18,91	24,24	33,06	33,06	18,91	7,08	25,98
6129	12,79	14,04	14,59	14,59	12,79	0,90	13,69
6158	7,82	5,77	7,15	7,82	5,77	1,03	6,79
6159	5,39	5,28	5,15	5,39	5,15	0,12	5,27
6173	6,35	5,27	4,35	6,35	4,35	1,00	5,35
6235	24,48	10,97	14,87	24,48	10,97	6,76	17,73



Tabela A5.3 – Cálculo de  $\sigma_{3a}$  e  $\sigma_{3m}$ 

N <sup>o</sup>	$\sigma_3$ CASO1	$\sigma_3$ CASO6	$\sigma_3$ CASO7	$\sigma_3$ MAX	$\sigma_3$ MIN	$\sigma_{3a}$	$\sigma_{3m}$
5562	-3,07	-6,83	0,00	0,00	-6,83	3,41	-3,41
5563	-26,66	-24,28	-52,40	-24,28	-52,40	14,06	-38,34
5565	-10,55	-11,21	-18,54	-10,55	-18,54	4,00	-14,54
5567	-26,19	-21,87	-50,61	-21,87	-50,61	14,37	-36,24
5596	-28,07	-14,62	-44,09	-14,62	-44,09	14,73	-29,35
5597	-25,37	-14,58	-43,79	-14,58	-43,79	14,60	-29,18
5612	-25,35	-11,78	-40,91	-11,78	-40,91	14,57	-26,35
5700	-15,08	-11,56	-24,44	-11,56	-24,44	6,44	-18,00
5750	-37,05	-28,34	-58,32	-28,34	-58,32	14,99	-43,33
5752	-16,84	-13,31	-28,81	-13,31	-28,81	7,75	-21,06
5753	-19,65	-27,73	-33,82	-19,65	-33,82	7,09	-26,73
5754	-36,86	-25,33	-54,36	-25,33	-54,36	14,51	-39,85
5759	-18,10	-7,36	-34,64	-7,36	-34,64	13,64	-21,00
5928	-33,05	-25,88	-47,49	-25,88	-47,49	10,80	-36,68
5931	-21,75	-24,11	-41,16	-21,75	-41,16	9,71	-31,45
5932	-31,04	-21,10	-41,12	-21,10	-41,12	10,01	-31,11
5934	-29,59	-32,71	0,00	0,00	-32,71	16,36	-16,36
5938	-28,42	-29,58	-12,00	-12,00	-29,58	8,79	-20,79
6044	-24,19	-28,11	-29,24	-24,19	-29,24	2,52	-26,71
6048	-22,73	-25,32	-24,24	-22,73	-25,32	1,29	-24,02
6053	-6,96	-16,27	0,00	0,00	-16,27	8,13	-8,13
6129	-22,74	-24,18	-4,92	-4,92	-24,18	9,63	-14,55
6158	-26,28	-13,44	-40,85	-13,44	-40,85	13,70	-27,14
6159	-25,74	-13,46	-40,65	-13,46	-40,65	13,59	-27,05
6173	-25,13	-12,19	-37,91	-12,19	-37,91	12,86	-25,05
6235	-28,43	-36,25	-10,18	-10,18	-36,25	13,03	-23,22

Tabela A5.4 - Cálculo de  $\sigma_{grc}$ 

N <sup>o</sup>	$\sigma_{1a}$	$\sigma_{2a}$	$\sigma_{3a}$	$\sigma_{grc}$
5562	11,63	1,62	3,41	9,25
5563	1,29	0,00	14,06	13,46
5565	10,39	0,00	4,00	9,07
5567	4,23	0,00	14,37	12,79
5596	1,77	0,00	14,73	13,93
5597	1,39	0,00	14,60	13,96
5612	0,47	0,00	14,57	14,34
5700	7,86	0,00	6,44	7,26
5750	3,94	0,00	14,99	13,46
5752	8,09	0,00	7,75	7,93
5753	14,08	0,00	7,09	12,20
5754	10,48	0,00	14,51	12,98
5759	11,48	0,00	13,64	12,70
5928	0,83	0,00	10,80	10,41
5931	4,82	0,00	9,71	8,41
5932	5,20	0,00	10,01	8,67
5934	15,49	4,18	16,36	11,77
5938	10,89	0,00	8,79	10,01
6044	1,51	0,00	2,52	2,20
6048	3,10	0,00	1,29	2,69
6053	7,08	7,37	8,13	0,94
6129	0,90	0,00	9,63	9,21
6158	1,03	0,00	13,70	13,22
6159	0,12	0,00	13,59	13,53
6173	1,00	0,00	12,86	12,39
6235	6,76	0,00	13,03	11,29

Tabela A5.5 - Cálculo de  $\sigma_{m,e}$ 

N <sup>o</sup>	$\sigma_{1m}$	$\sigma_{2m}$	$\sigma_{3m}$	$\sigma_{m,e}$
5562	34,58	1,62	-3,41	35,74
5563	8,88	0,00	-38,34	43,47
5565	29,86	0,00	-14,54	39,21
5567	18,13	0,00	-36,24	47,95
5596	10,66	0,00	-29,35	35,89
5597	10,03	0,00	-29,18	35,29
5612	9,43	0,00	-26,35	32,12
5700	34,28	0,00	-18,00	46,00
5750	15,01	0,00	-43,33	52,47
5752	32,04	0,00	-21,06	46,32
5753	21,70	0,00	-26,73	42,02
5754	30,46	0,00	-39,85	61,07
5759	38,90	0,00	-21,00	52,65
5928	12,46	0,00	-36,68	44,25
5931	14,43	0,00	-31,45	40,64
5932	28,37	0,00	-31,11	51,53
5934	29,04	4,18	-16,36	39,37
5938	35,38	0,00	-20,79	49,19
6044	6,51	0,00	-26,71	30,49
6048	15,88	0,00	-24,02	34,80
6053	25,98	7,37	-8,13	29,59
6129	13,69	0,00	-14,55	24,46
6158	6,79	0,00	-27,14	31,10
6159	5,27	0,00	-27,05	30,03
6173	5,35	0,00	-25,05	28,11
6235	17,73	0,00	-23,22	35,56

Tabela A5.6 – Cálculo de Sensibilidade para  $\sigma_a$ 

N <sup>o</sup>	$\sigma_{a_e}$	$\sigma_{m_e}$	$\sigma_a$ (p/K <sub>f</sub> =2,93)	$\sigma_a$ (p/K <sub>f</sub> =4,0)	$\sigma_a$ (p/K <sub>f</sub> =5,0)
5562	9,25	35,74	34,56	52,45	73,22
5563	13,46	43,47	53,48	83,93	121,95
5565	9,07	39,21	34,84	53,64	76,16
5567	12,79	47,95	52,77	84,64	126,48
5596	13,93	35,89	52,12	79,16	110,58
5597	13,96	35,29	52,00	78,78	109,73
5612	14,34	32,12	52,13	78,02	107,18
5700	7,26	46,00	29,45	46,78	69,02
5750	13,46	52,47	57,74	94,91	146,59
5752	7,93	46,32	32,24	51,30	75,84
5753	12,20	42,02	47,90	74,66	107,59
5754	12,98	61,07	60,25	104,58	175,16
5759	12,70	52,65	54,56	89,78	138,86
5928	10,41	44,25	41,64	65,58	95,73
5931	8,41	40,64	32,65	50,58	72,34
5932	8,67	51,53	36,89	60,31	92,48
5934	11,77	39,37	45,24	69,71	99,04
5938	10,01	49,19	41,71	67,34	101,49
6044	2,20	30,49	7,89	11,74	16,02
6048	2,69	34,80	9,99	15,10	20,99
6053	0,94	29,59	3,37	5,00	6,80
6129	9,21	24,46	31,68	46,17	61,60
6158	13,22	31,10	47,70	71,12	97,30
6159	13,53	30,03	48,44	71,96	98,01
6173	12,39	28,11	43,73	64,52	87,23
6235	11,29	35,56	42,13	63,90	89,12

**ANEXO A6**

**TABELAS DE CÁLCULO PARA O CICLO COM SOLICITAÇÕES GLOBAIS DE TORÇÃO**  
**MÉTODO ASME - MALHA INICIAL**

Tabela A6.1 – Cálculo de  $(\sigma_1 - \sigma_2)$ ,  $(\sigma_2 - \sigma_3)$  e  $(\sigma_3 - \sigma_1)$  - CASO 1 - Tensões em MPa

N <sup>o</sup>	$\sigma_1$ CASO1	$\sigma_2$ CASO1	$\sigma_3$ CASO1	$\sigma_1 - \sigma_2$	$\sigma_2 - \sigma_3$	$\sigma_3 - \sigma_1$
5562	22,94	0,00	-3,07	22,94	3,07	-26,02
5563	7,58	0,00	-26,66	7,58	26,66	-34,24
5565	22,84	0,00	-10,55	22,84	10,55	-33,38
5567	13,90	0,00	-26,19	13,90	26,19	-40,09
5596	11,40	0,00	-28,07	11,40	28,07	-39,47
5597	11,42	0,00	-25,37	11,42	25,37	-36,79
5612	9,82	0,00	-25,35	9,82	25,35	-35,17
5700	30,05	0,00	-15,08	30,05	15,08	-45,14
5750	11,07	0,00	-37,05	11,07	37,05	-48,11
5752	28,78	0,00	-16,84	28,78	16,84	-45,63
5753	25,89	0,00	-19,65	25,89	19,65	-45,53
5754	19,98	0,00	-36,86	19,98	36,86	-56,85
5759	27,42	0,00	-18,10	27,42	18,10	-45,52
5928	11,62	0,00	-33,05	11,62	33,05	-44,67
5931	19,25	0,00	-21,75	19,25	21,75	-40,99
5932	23,17	0,00	-31,04	23,17	31,04	-54,22
5934	13,85	0,00	-29,59	13,85	29,59	-43,44
5938	24,49	0,00	-28,42	24,49	28,42	-52,92
6044	5,97	0,00	-24,19	5,97	24,19	-30,16
6048	12,78	0,00	-22,73	12,78	22,73	-35,51
6053	18,91	0,00	-6,96	18,91	6,96	-25,86
6129	12,79	0,00	-22,74	12,79	22,74	-35,53
6158	7,82	0,00	-26,28	7,82	26,28	-34,10
6159	5,39	0,00	-25,74	5,39	25,74	-31,12
6173	6,35	0,00	-25,13	6,35	25,13	-31,48
6235	24,48	0,00	-28,43	24,48	28,43	-52,91



Tabela A6.2 – Cálculo de  $(\sigma_1 - \sigma_2)$ ,  $(\sigma_2 - \sigma_3)$  e  $(\sigma_3 - \sigma_1)$  - CASO 6 - Tensões em MPa

N <sup>o</sup>	$\sigma_1$ CASO6	$\sigma_2$ CASO6	$\sigma_3$ CASO6	$\sigma_1 - \sigma_2$	$\sigma_2 - \sigma_3$	$\sigma_3 - \sigma_1$
5562	26,80	0,00	-6,83	26,80	6,83	-33,63
5563	9,23	0,00	-24,28	9,23	24,28	-33,51
5565	19,48	0,00	-11,21	19,48	11,21	-30,68
5567	20,25	0,00	-21,87	20,25	21,87	-42,12
5596	8,89	0,00	-14,62	8,89	14,62	-23,52
5597	8,65	0,00	-14,58	8,65	14,58	-23,23
5612	8,96	0,00	-11,78	8,96	11,78	-20,74
5700	26,41	0,00	-11,56	26,41	11,56	-37,97
5750	11,53	0,00	-28,34	11,53	28,34	-39,87
5752	23,95	0,00	-13,31	23,95	13,31	-37,27
5753	7,61	0,00	-27,73	7,61	27,73	-35,34
5754	24,81	0,00	-25,33	24,81	25,33	-50,15
5759	31,49	0,00	-7,36	31,49	7,36	-38,85
5928	13,29	0,00	-25,88	13,29	25,88	-39,17
5931	10,24	0,00	-24,11	10,24	24,11	-34,35
5932	29,92	0,00	-21,10	29,92	21,10	-51,03
5934	13,55	0,00	-32,71	13,55	32,71	-46,26
5938	28,24	0,00	-29,58	28,24	29,58	-57,82
6044	8,02	0,00	-28,11	8,02	28,11	-36,12
6048	18,98	0,00	-25,32	18,98	25,32	-44,29
6053	24,24	0,00	-16,27	24,24	16,27	-40,51
6129	14,04	0,00	-24,18	14,04	24,18	-38,22
6158	5,77	0,00	-13,44	5,77	13,44	-19,21
6159	5,28	0,00	-13,46	5,28	13,46	-18,74
6173	5,27	0,00	-12,19	5,27	12,19	-17,46
6235	10,97	0,00	-36,25	10,97	36,25	-47,22

Tabela A6.3 – Cálculo de  $(\sigma_1 - \sigma_2)$ ,  $(\sigma_2 - \sigma_3)$  e  $(\sigma_3 - \sigma_1)$  - CASO 7 - Tensões em MPa

N <sup>o</sup>	$\sigma_1$ CASO 7	$\sigma_2$ CASO 7	$\sigma_3$ CASO 7	$\sigma_1 - \sigma_2$	$\sigma_2 - \sigma_3$	$\sigma_3 - \sigma_1$
5562	46,21	3,24	0,00	42,97	3,24	-46,21
5563	10,17	0,00	-52,40	10,17	52,40	-62,58
5565	40,25	0,00	-18,54	40,25	18,54	-58,79
5567	22,36	0,00	-50,61	22,36	50,61	-72,97
5596	12,43	0,00	-44,09	12,43	44,09	-56,51
5597	9,82	0,00	-43,79	9,82	43,79	-53,61
5612	9,90	0,00	-40,91	9,90	40,91	-50,81
5700	42,14	0,00	-24,44	42,14	24,44	-66,58
5750	18,95	0,00	-58,32	18,95	58,32	-77,27
5752	40,14	0,00	-28,81	40,14	28,81	-68,95
5753	35,78	0,00	-33,82	35,78	33,82	-69,60
5754	40,94	0,00	-54,36	40,94	54,36	-95,30
5759	50,39	0,00	-34,64	50,39	34,64	-85,03
5928	12,92	0,00	-47,49	12,92	47,49	-60,41
5931	9,61	0,00	-41,16	9,61	41,16	-50,77
5932	33,56	0,00	-41,12	33,56	41,12	-74,68
5934	44,52	8,36	0,00	36,17	8,36	-44,52
5938	46,26	0,00	-12,00	46,26	12,00	-58,26
6044	5,00	0,00	-29,24	5,00	29,24	-34,24
6048	15,68	0,00	-24,24	15,68	24,24	-39,91
6053	33,06	14,74	0,00	18,32	14,74	-33,06
6129	14,59	0,00	-4,92	14,59	4,92	-19,51
6158	7,15	0,00	-40,85	7,15	40,85	-48,00
6159	5,15	0,00	-40,65	5,15	40,65	-45,79
6173	4,35	0,00	-37,91	4,35	37,91	-42,26
6235	14,87	0,00	-10,18	14,87	10,18	-25,06

Tabela A6.4 – Cálculo da Diferença em Valor Absoluto entre ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ) MÁX e ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ) MÍN – Tensões em MPa

N <sup>o</sup>	$\sigma_1 - \sigma_2$ CASO1	$\sigma_1 - \sigma_2$ CASO6	$\sigma_1 - \sigma_2$ CASO7	$\sigma_1 - \sigma_2$ MÁX	$\sigma_1 - \sigma_2$ MÍN	$\Delta$ ABS
5562	22,94	26,80	42,97	42,97	22,94	20,03
5563	7,58	9,23	10,17	10,17	7,58	2,59
5565	22,84	19,48	40,25	40,25	19,48	20,77
5567	13,90	20,25	22,36	22,36	13,90	8,46
5596	11,40	8,89	12,43	12,43	8,89	3,53
5597	11,42	8,65	9,82	11,42	8,65	2,77
5612	9,82	8,96	9,90	9,90	8,96	0,94
5700	30,05	26,41	42,14	42,14	26,41	15,73
5750	11,07	11,53	18,95	18,95	11,07	7,88
5752	28,78	23,95	40,14	40,14	23,95	16,18
5753	25,89	7,61	35,78	35,78	7,61	28,17
5754	19,98	24,81	40,94	40,94	19,98	20,96
5759	27,42	31,49	50,39	50,39	27,42	22,97
5928	11,62	13,29	12,92	13,29	11,62	1,67
5931	19,25	10,24	9,61	19,25	9,61	9,63
5932	23,17	29,92	33,56	33,56	23,17	10,39
5934	13,85	13,55	36,17	36,17	13,55	22,62
5938	24,49	28,24	46,26	46,26	24,49	21,77
6044	5,97	8,02	5,00	8,02	5,00	3,02
6048	12,78	18,98	15,68	18,98	12,78	6,19
6053	18,91	24,24	18,32	24,24	18,32	5,92
6129	12,79	14,04	14,59	14,59	12,79	1,80
6158	7,82	5,77	7,15	7,82	5,77	2,05
6159	5,39	5,28	5,15	5,39	5,15	0,24
6173	6,35	5,27	4,35	6,35	4,35	1,99
6235	24,48	10,97	14,87	24,48	10,97	13,51

Tabela A6.5 – Cálculo da Diferença em Valor Absoluto entre ( $\sigma_2 - \sigma_1$ ) MAX e ( $\sigma_2 - \sigma_1$ ) MIN – Tensões em MPa

N <sup>o</sup>	$\sigma_2 - \sigma_3$ CASO1	$\sigma_2 - \sigma_3$ CASO6	$\sigma_2 - \sigma_3$ CASO7	$\sigma_2 - \sigma_3$ MAX	$\sigma_2 - \sigma_3$ MIN	$\Delta$ ABS
5562	3,07	6,83	3,24	6,83	3,07	3,75
5563	26,66	24,28	52,40	52,40	24,28	28,12
5565	10,55	11,21	18,54	18,54	10,55	7,99
5567	26,19	21,87	50,61	50,61	21,87	28,74
5596	28,07	14,62	44,09	44,09	14,62	29,46
5597	25,37	14,58	43,79	43,79	14,58	29,21
5612	25,35	11,78	40,91	40,91	11,78	29,14
5700	15,08	11,56	24,44	24,44	11,56	12,88
5750	37,05	28,34	58,32	58,32	28,34	29,98
5752	16,84	13,31	28,81	28,81	13,31	15,50
5753	19,65	27,73	33,82	33,82	19,65	14,17
5754	36,86	25,33	54,36	54,36	25,33	29,03
5759	18,10	7,36	34,64	34,64	7,36	27,28
5928	33,05	25,88	47,49	47,49	25,88	21,61
5931	21,75	24,11	41,16	41,16	21,75	19,41
5932	31,04	21,10	41,12	41,12	21,10	20,02
5934	29,59	32,71	8,36	32,71	8,36	24,36
5938	28,42	29,58	12,00	29,58	12,00	17,58
6044	24,19	28,11	29,24	29,24	24,19	5,04
6048	22,73	25,32	24,24	25,32	22,73	2,59
6053	6,96	16,27	14,74	16,27	6,96	9,31
6129	22,74	24,18	4,92	24,18	4,92	19,26
6158	26,28	13,44	40,85	40,85	13,44	27,41
6159	25,74	13,46	40,65	40,65	13,46	27,19
6173	25,13	12,19	37,91	37,91	12,19	25,72
6235	28,43	36,25	10,18	36,25	10,18	26,07

Tabela A6.6 – Cálculo da Diferença em Valor Absoluto entre ( $\sigma_3 - \sigma_1$ ) MÁX e ( $\sigma_3 - \sigma_1$ ) MÍN – Tensões em MPa

Nº	$\sigma_3 - \sigma_1$ CASO1	$\sigma_3 - \sigma_1$ CASO6	$\sigma_3 - \sigma_1$ CASO7	$\sigma_3 - \sigma_1$ MÁX	$\sigma_3 - \sigma_1$ MÍN	Δ ABS
5562	-26,02	-33,63	-46,21	-26,02	-46,21	20,19
5563	-34,24	-33,51	-62,58	-33,51	-62,58	29,06
5565	-33,38	-30,68	-58,79	-30,68	-58,79	28,11
5567	-40,09	-42,12	-72,97	-40,09	-72,97	32,88
5596	-39,47	-23,52	-56,51	-23,52	-56,51	33,00
5597	-36,79	-23,23	-53,61	-23,23	-53,61	30,38
5612	-35,17	-20,74	-50,81	-20,74	-50,81	30,08
5700	-45,14	-37,97	-66,58	-37,97	-66,58	28,61
5750	-48,11	-39,87	-77,27	-39,87	-77,27	37,40
5752	-45,63	-37,27	-68,95	-37,27	-68,95	31,68
5753	-45,53	-35,34	-69,60	-35,34	-69,60	34,26
5754	-56,85	-50,15	-95,30	-50,15	-95,30	45,16
5759	-45,52	-38,85	-85,03	-38,85	-85,03	46,18
5928	-44,67	-39,17	-60,41	-39,17	-60,41	21,23
5931	-40,99	-34,35	-50,77	-34,35	-50,77	16,42
5932	-54,22	-51,03	-74,68	-51,03	-74,68	23,66
5934	-43,44	-46,26	-44,52	-43,44	-46,26	2,82
5938	-52,92	-57,82	-58,26	-52,92	-58,26	5,35
6044	-30,16	-36,12	-34,24	-30,16	-36,12	5,96
6048	-35,51	-44,29	-39,91	-35,51	-44,29	8,78
6053	-25,86	-40,51	-33,06	-25,86	-40,51	14,64
6129	-35,53	-38,22	-19,51	-19,51	-38,22	18,71
6158	-34,10	-19,21	-48,00	-19,21	-48,00	28,79
6159	-31,12	-18,74	-45,79	-18,74	-45,79	27,05
6173	-31,48	-17,46	-42,26	-17,46	-42,26	24,80
6235	-52,91	-47,22	-25,06	-25,06	-52,91	27,85

ANEXO A7

TABELA DE CÁLCULO PARA O CICLO COM SOLICITAÇÕES GLOBAIS DE TORÇÃO  
MÉTODO DE SINES - MALHA REFINADA

Tabela A7.1 – Cálculo de  $\sigma_{1a}$  e  $\sigma_{1m}$

N6	$\sigma_1$ CASO 1	$\sigma_1$ CASO 6	$\sigma_1$ CASO 7	$\sigma_1$ MÁX	$\sigma_1$ MÍN	$\sigma_{1a}$	$\sigma_{1m}$
43048	19,29	21,65	39,19	39,19	19,29	9,95	29,24
43049	23,12	22,90	43,05	43,05	22,90	10,08	32,98
43050	26,19	24,89	47,20	47,20	24,89	11,15	36,04
43071	31,53	29,08	54,31	54,31	29,08	12,62	41,69
43703	23,12	16,50	27,59	27,59	16,50	5,55	22,05
43704	26,19	19,04	32,16	32,16	19,04	6,56	25,60

Tabela A7.2 – Cálculo de  $\sigma_{2a}$  e  $\sigma_{2m}$

N6	$\sigma_2$ CASO 1	$\sigma_2$ CASO 6	$\sigma_2$ CASO 7	$\sigma_2$ MÁX	$\sigma_2$ MÍN	$\sigma_{2a}$	$\sigma_{2m}$
43048	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
43049	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
43050	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
43071	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
43703	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
43704	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela A7.3 – Cálculo de  $\sigma_{3a}$  e  $\sigma_{3m}$

N6	$\sigma_3$ CASO 1	$\sigma_3$ CASO 6	$\sigma_3$ CASO 7	$\sigma_3$ MÁX	$\sigma_3$ MÍN	$\sigma_{3a}$	$\sigma_{3m}$
43048	-32,54	-22,70	-45,47	-22,70	-45,47	11,38	-34,08
43049	-33,67	-25,11	-50,41	-25,11	-50,41	12,65	-37,76
43050	-33,47	-24,57	-50,89	-24,57	-50,89	13,16	-37,73
43071	-16,76	-8,33	-33,56	-8,33	-33,56	12,62	-20,94
43703	-33,67	-14,48	-38,68	-14,48	-38,68	12,10	-26,58
43704	-33,47	-13,62	-38,98	-13,62	-38,98	12,68	-26,30

Tabela A7.4 - Cálculo de  $\sigma_{ae}$

Nó	$\sigma_{1a}$	$\sigma_{2a}$	$\sigma_{3a}$	$\sigma_{ae}$
43048	9,95	0,00	11,38	10,74
43049	10,08	0,00	12,65	11,58
43050	11,15	0,00	13,16	12,28
43071	12,62	0,00	12,62	12,62
43703	5,55	0,00	12,10	10,49
43704	6,56	0,00	12,68	10,98

Tabela A7.5 - Cálculo de  $\sigma_{me}$

Nó	$\sigma_{1m}$	$\sigma_{2m}$	$\sigma_{3m}$	$\sigma_{me}$
43048	29,24	0,00	-34,08	54,89
43049	32,98	0,00	-37,76	61,31
43050	36,04	0,00	-37,73	63,90
43071	41,69	0,00	-20,94	55,23
43703	22,05	0,00	-26,58	42,17
43704	25,60	0,00	-26,30	44,95

Tabela A7.6 - Cálculo de Sensibilidade para  $\sigma_a$

Nó	$\sigma_{ae}$	$\sigma_{me}$	$\sigma_a$ (p/ K $\gamma$ =2,93)	$\sigma_a$ (p/ K $\gamma$ =4,0)	$\sigma_a$ (p/ K $\gamma$ =5,0)
43048	10,74	54,89	47,073	78,485	123,688
43049	11,58	61,31	53,902	93,717	157,385
43050	12,28	63,90	58,604	103,848	179,923
43071	12,62	55,23	55,475	92,680	146,484
43703	10,49	42,17	41,252	64,352	92,816
43704	10,98	44,95	44,180	69,818	102,346



**ANEXO A8**

**TABELAS DE CÁLCULO PARA O CICLO COM SOLICITAÇÕES GLOBAIS DE TORÇÃO**  
**MÉTODO ASME - MALHA REFINADA**

Tabela A8.1 – Cálculo de  $(\sigma_1 - \sigma_2)$ ,  $(\sigma_2 - \sigma_3)$  e  $(\sigma_3 - \sigma_1)$  - CASO 1 - Tensões em MPa

N <sup>o</sup>	$\sigma_1$ CASO1	$\sigma_2$ CASO1	$\sigma_3$ CASO1	$\sigma_1 - \sigma_2$	$\sigma_2 - \sigma_3$	$\sigma_3 - \sigma_1$
43048	19,29	0,00	-32,54	19,29	32,54	-51,84
43049	23,12	0,00	-33,67	23,12	33,67	-56,79
43050	26,19	0,00	-33,47	26,19	33,47	-59,66
43071	31,53	0,00	-16,76	31,53	16,76	-48,29
43703	23,12	0,00	-33,67	23,12	33,67	-56,79
43704	26,19	0,00	-33,47	26,19	33,47	-59,65

Tabela A8.2 – Cálculo de  $(\sigma_1 - \sigma_2)$ ,  $(\sigma_2 - \sigma_3)$  e  $(\sigma_3 - \sigma_1)$  - CASO 6 - Tensões em MPa

N <sup>o</sup>	$\sigma_1$ CASO6	$\sigma_2$ CASO6	$\sigma_3$ CASO6	$\sigma_1 - \sigma_2$	$\sigma_2 - \sigma_3$	$\sigma_3 - \sigma_1$
43048	21,65	0,00	-22,70	21,65	22,70	-44,35
43049	22,90	0,00	-25,11	22,90	25,11	-48,00
43050	24,89	0,00	-24,57	24,89	24,57	-49,46
43071	29,08	0,00	-8,33	29,08	8,33	-37,40
43703	16,50	0,00	-14,48	16,50	14,48	-30,98
43704	19,04	0,00	-13,62	19,04	13,62	-32,66

Tabela A8.3 – Cálculo de  $(\sigma_1 - \sigma_2)$ ,  $(\sigma_2 - \sigma_3)$  e  $(\sigma_3 - \sigma_1)$  - CASO 7 - Tensões em MPa

N <sup>o</sup>	$\sigma_1$ CASO7	$\sigma_2$ CASO7	$\sigma_3$ CASO7	$\sigma_1 - \sigma_2$	$\sigma_2 - \sigma_3$	$\sigma_3 - \sigma_1$
43048	39,19	0,00	-45,47	39,19	45,47	-84,66
43049	43,05	0,00	-50,41	43,05	50,41	-93,47
43050	47,20	0,00	-50,89	47,20	50,89	-98,09
43071	54,31	0,00	-33,56	54,31	33,56	-87,87
43703	27,59	0,00	-38,68	27,59	38,68	-66,28
43704	32,16	0,00	-38,98	32,16	38,98	-71,14

Tabela A8.4 – Cálculo da Diferença em Valor Absoluto entre ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ) MÁX e ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ) MÍN – Tensões em MPA

N <sup>o</sup>	$\sigma_1 - \sigma_2$ CASO1	$\sigma_1 - \sigma_2$ CASO6	$\sigma_1 - \sigma_2$ CASO7	$\sigma_1 - \sigma_2$ MÁX	$\sigma_1 - \sigma_2$ MÍN	$\Delta$ ABS
43048	19,29	21,65	39,19	39,19	19,29	19,90
43049	23,12	22,90	43,05	43,05	22,90	20,16
43050	26,19	24,89	47,20	47,20	24,89	22,31
43071	31,53	29,08	54,31	54,31	29,08	25,23
43703	23,12	16,50	27,59	27,59	16,50	11,09
43704	26,19	19,04	32,16	32,16	19,04	13,11

Tabela A8.5 – Cálculo da Diferença em Valor Absoluto entre ( $\sigma_2 - \sigma_3$ ) MÁX e ( $\sigma_2 - \sigma_3$ ) MÍN – Tensões em MPA

N <sup>o</sup>	$\sigma_2 - \sigma_3$ CASO1	$\sigma_2 - \sigma_3$ CASO6	$\sigma_2 - \sigma_3$ CASO7	$\sigma_2 - \sigma_3$ MÁX	$\sigma_2 - \sigma_3$ MÍN	$\Delta$ ABS
43048	32,54	22,70	45,47	45,47	22,70	22,77
43049	33,67	25,11	50,41	50,41	25,11	25,31
43050	33,47	24,57	50,89	50,89	24,57	26,32
43071	16,76	8,33	33,56	33,56	8,33	25,23
43703	33,67	14,48	38,68	38,68	14,48	24,20
43704	33,47	13,62	38,98	38,98	13,62	25,36

Tabela A8.6 – Cálculo da Diferença em Valor Absoluto entre ( $\sigma_3 - \sigma_1$ ) MÁX e ( $\sigma_3 - \sigma_1$ ) MÍN – Tensões em MPA

N <sup>o</sup>	$\sigma_3 - \sigma_1$ CASO1	$\sigma_3 - \sigma_1$ CASO6	$\sigma_3 - \sigma_1$ CASO7	$\sigma_3 - \sigma_1$ MÁX	$\sigma_3 - \sigma_1$ MÍN	$\Delta$ ABS
43048	-51,84	-44,35	-84,66	-44,35	-84,66	40,31
43049	-56,79	-48,00	-93,47	-48,00	-93,47	45,46
43050	-59,66	-49,46	-98,09	-49,46	-98,09	48,63
43071	-48,29	-37,40	-87,87	-37,40	-87,87	50,47
43703	-56,79	-30,98	-66,28	-30,98	-66,28	35,30
43704	-59,65	-32,66	-71,14	-32,66	-71,14	38,48