

unesp  **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

DANIEL HIDALGO LINZMEYER DE MIRANDA

**ANÁLISE ESTRUTURAL DO SUPORTE DE PASTILHA DE GRAFITE PARA
LUBRIFICAÇÃO DE RODA FERROVIÁRIA**

Guaratinguetá
2014

DANIEL HIDALGO LINZMEYER DE MIRANDA

ANÁLISE ESTRUTURAL DO SUPORTE DE PASTILHA DE GRAFITE PARA
LUBRIFICAÇÃO DE RODA FERROVIÁRIA

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. José Elias Tomazini
Co-orientador: Prof. Dr. José Geraldo Trani Brandão

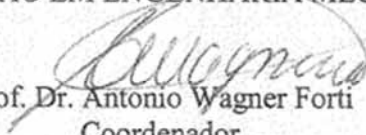
Guaratinguetá
2014

M672a	<p>Miranda, Daniel Hidalgo Linzmeyer de Análise estrutural do suporte de pastilha de grafite para lubrificação de roda ferroviária / Daniel Hidalgo Linzmeyer de Miranda – Guaratinguetá, 2014. 89 f : il. Bibliografia: f. 82</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2014. Orientador: Prof. Dr. José Elias Tomazini Coorientador: Prof. Dr. José Geraldo Trani Brandão</p> <p>1. Vibração aleatória 2. Método dos elementos finitos 3. Rodas de vagões I. Título</p> <p style="text-align: right;">CDU 534.1</p>
-------	---


DANIEL HIDALGO LINZMEYER DE MIRANDA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE DO
REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE "GRADUADO EM
ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA


Prof. Dr. Antonio Wagner Forti
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JOSÉ ELIAS TOMAZINI
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. JOSÉ GERALDO TRANI BRANDÃO
UNESP/FEG


Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
UNESP/FEG

Setembro de 2014

DADOS CURRICULARES

DANIEL HIDALGO LINZMEYER DE MIRANDA

NASCIMENTO 27.08.1988 – SÃO JOSÉ DOS CAMPOS / SP

FILIAÇÃO Adail Hidalgo de Miranda
Maria Aparecida Linzmeyer de Miranda

2009/2014 Curso de Graduação
Engenharia Mecânica - UNESP

AGRADECIMENTOS

A todas as pessoas que contribuíram de forma significativa para a elaboração deste trabalho de graduação.

A esta universidade, seu corpo docente, direção e administração que proporcionaram o meu crescimento profissional ao longo destes anos de faculdade.

Aos meus familiares pelo apoio neste período da minha vida.

E a todos aqueles que fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

MIRANDA, D. H. L. **Análise estrutural do suporte de pastilha para lubrificação de roda ferroviária**. 2014. 89 f. Trabalho de graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

RESUMO

Este trabalho visa avaliar estruturalmente um suporte de pastilha para a lubrificação de rodas ferroviárias. A lubrificação adequada dos frisos das rodas ferroviárias aumenta a vida útil deste componente, sendo assim é de fundamental importância que ocorra esta lubrificação para a redução dos custos envolvidos na manutenção ferroviária. Para a elaboração desta avaliação será utilizado à norma ferroviária europeia (IEC 61373) que estabelece quais os carregamentos que deve ser aplicado a este componente. Os carregamentos aplicados sobre o suporte, de acordo com a norma IEC, são acelerações randômicas e acelerações devido a choques, simulando assim as condições que existe ao longo do percurso do trem. As análises estruturais são realizadas através do método dos elementos finitos, com o auxílio do software Cosmos. Desta forma, é possível a determinação das tensões atuantes no suporte, e assim comparar com as tensões admissíveis propostas pela norma AISC. As tensões obtidas nas análises estruturais foram inferiores aos admissíveis considerados, portanto, para a configuração apresentada, não são esperados problemas estruturais.

PALAVRAS-CHAVE: Suporte de pastilha. norma IEC 61373. vibrações aleatórias. elementos finitos.

MIRANDA, D. H. L. **Structural Analysis of support of graphite pastille for the lubrication of railway wheels.** 2014. 89 f. Graduate work (Graduate of Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

ABSTRACT

This study aims to structurally evaluate a support of graphite pastille for the lubrication of railway wheels. The proper lubrication of wheel flanges of the railway extends the life of this component, so it is very important that this occurs lubrication to reduce the costs involved in railway maintenance. To prepare the evaluation structural will be used to International Electrotechnical Commission standard (IEC 61373) establishing which load cases should be applied to this component. The applied loads on the support (accordance with IEC) are random accelerations and accelerations due to shocks, thus simulating the conditions that exist along the route of the train. The structural analyzes are performed by the finite element method, with the aid of the Cosmos software. Thus, it is possible to determine the stresses acting on the support, and so the allowable stresses compared with the standard proposed by the AISC. The stress in the structural analyzes are lower than allowable therefore considered for the configuration presented, unexpected structural problems.

KEYWORDS: Support of graphite pastille, IEC 61373 Standard. random vibrations. finite element

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Seção transversal de uma roda – Apresentação da região a ser lubrificada.....	17
Figura 2 – Suporte de pastilha instalado no trem	18
Figura 3 – Bastão de grafite em contato com a roda do trem.....	19
Figura 4 – Fluxograma para resolução do trabalho	21
Figura 5 – Vista isométrica e pontos de fixação do corpo primário.....	23
Figura 6 – Vista isométrica do corpo secundário	24
Figura 7 – Suporte de gaveta	25
Figura 8 – Mola fita.....	26
Figura 9 – Bastão de grafite.....	26
Figura 10 – Esquema simplificado ilustrando a atuação da mola fita.....	27
Figura 11 – Seção transversal do suporte de pastilha.....	27
Figura 12 – Espectro discreto de frequências de uma função periódica	30
Figura 13 – Curva de densidade espectral contínua	30
Figura 14 – Sinal de uma vibração aleatória e curva gaussiana	32
Figura 15 – Curva ASD para categoria de equipamentos fixados acima do truque.....	34
Figura 16 – Curva de choque para equipamentos fixados acima do truque	35
Figura 17 – Ilustração de uma malha com seus nós e elementos	37
Figura 18 – Interface do programa Cosmos	38
Figura 19 – Modelo de elementos finitos – Detalhe da malha em casca.....	41
Figura 20 – Detalhe dos elementos de viga que ligam o corpo primário ao secundário.....	41
Figura 21 – Detalhe dos elementos de viga que travam a tampa do suporte.....	42
Figura 22 – Identificação dos CPDOF's utilizados no suporte de gaveta.....	42
Figura 23 – Indicação dos componentes em contato.....	43
Figura 24 – Vista superior da região onde ocorre o contato.....	43
Figura 25 – Comparativo entre a configuração não deformada (esquerda) e deformada (direita) – Região de contato entre o corpo primário e o secundário.....	44
Figura 26 – CPDOF's considerados nas análises: (A) Choque nas direções +X e -Z; (B) Choque nas direções -X e +Z; (C) Choque na direção +Y; (D) Choque na direção -Y.....	44
Figura 27 – Condições de contorno	45
Figura 28 – Curva ASD para equipamentos fixados acima do truque	47
Figura 29 – Valores da curva ASD para equipamentos fixados acima do truque.....	47
Figura 30 – Curva ASD para a direção vertical (Y).....	49
Figura 31 – Curva de choque para componentes fixados acima do truque	51

Figura 32 – Curva de choque utilizada na análise estrutural.....	52
Figura 33 – Nós de resposta da análise de choque	53
Figura 34 – Nós de resposta da análise de choque	53
Figura 35 – Curva de resposta randômica – Teste de vida útil (direção Y) – Nó 2909 (engastado).....	55
Figura 36 – Curva de resposta randômica (dilog) – Teste de vida útil (direção Y) – Nó 2909 (engastado).....	55
Figura 37 – Curva de resposta da análise de choque.....	56
Figura 38 – Deslocamento do nó 705 ao longo da análise de choque.....	57
Figura 39 – Tensões (von Mises) [Pa] – Peso próprio da estrutura - Detalhe.....	59
Figura 40 – Deslocamento resultante [m] – Peso próprio da estrutura	59
Figura 41 – Tensões (von Mises) [Pa] – Choque na direção vertical positiva (+Y)	61
Figura 42 – Tensões (von Mises) [Pa] – Choque na direção vertical positiva (+Y) – Detalhe da máxima tensão	61
Figura 43 – Deslocamento resultante [mm] – Longitudinal positivo (+X).....	62
Figura 44 – Deslocamento resultante [mm] – Longitudinal positivo (+X) – Detalhe do máximo deslocamento	63
Figura 45 – Deslocamento na direção X [m] – Choque longitudinal positivo (+X).....	63
Figura 46 – Tensões (von Mises) [Pa] – Teste aleatório funcional – Direção longitudinal (X)	65
Figura 47 – Tensões (von Mises) [Pa] – Teste aleatório funcional – Direção longitudinal (X) – Detalhe da tensão máxima encontrada.....	65
Figura 48 – Tensões (von Mises) [Pa] – Teste de vida útil – Direção longitudinal (X).....	66
Figura 49 – Tensões (von Mises) [Pa] – Teste de vida útil – Direção longitudinal (X) – Detalhe da tensão máxima encontrada	66
Figura 50 – Deslocamento resultante [mm] para ambos os testes randômicos.....	68
Figura 51 – Numeração dos parafusos verificados.....	72
Figura 52 – Ilustração dos olhais analisados	75
Figura 53 – Indicação das soldas verificadas	79
Figura 54 – Modo de vibração 64,2 Hz (Direção X) – Configuração deformada.....	88
Figura 55 – Modo de vibração 73,7 Hz (Direção Z) – Configuração deformada	88
Figura 56 – Modo de vibração 154,2 Hz (Direção Z) – Configuração deformada	89
Figura 57 – Modo de vibração 451,3 Hz (Direção Y) – Configuração deformada.....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Pares ordenados da curva ASD	48
Tabela 2 - Dados da curva ASD para direção vertical	49
Tabela 3 - Curva ASD para o teste funcional.....	50
Tabela 4 - Curva ASD para o teste de vida útil.....	50
Tabela 5 - Resultados obtidos na análise estática.....	58
Tabela 6 - Tensões (von Mises) [MPa] máximas encontradas nas análises de choque.....	60
Tabela 7 - Deslocamentos resultantes máximos [mm].....	62
Tabela 8 - Tensões (von Mises) [MPa] máximas encontradas nas análises randômicas (teste aleatório funcional)	64
Tabela 9 - Tensões (von Mises) [MPa] máximas encontradas nas análises randômicas (teste de vida útil)	64
Tabela 10 - Deslocamento resultante [mm] – Teste aleatório funcional.....	67
Tabela 11 - Deslocamento resultante [mm] – Teste de vida útil.....	67
Tabela 12 - Esforços nos parafusos para o teste aleatório.....	72
Tabela 13 - Esforços nos parafusos para o teste de choque e de útil.....	73
Tabela 14 - Resultados da verificação dos olhais – Teste aleatório funcional	75
Tabela 15 - Resultados da verificação dos olhais – Teste de choque e vida útil.....	76
Tabela 16 - Resultados da verificação das soldas – Teste aleatório funcional.....	80
Tabela 17 - Resultados da verificação das soldas – Teste de vida útil.....	80
Tabela 18 - Resultados da verificação das soldas – Teste de choque.....	80
Tabela 19 - Resultados da análise modal.....	83

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Propriedades mecânicas consideradas no corpo primário.....	23
Quadro 2 - Propriedades mecânicas consideradas no corpo secundário.	24
Quadro 3 - Propriedades mecânicas consideradas no suporte de gaveta.....	25

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
IEC	International Electrotechnical Commission
NBR	Norma Brasileira
SRAC	Structural Reserch and Analysis Corporation
ASD	Aceleration Spectral Density
RMS	Root mean square

LISTA DE SÍMBOLOS

u_n	energia de deformação para uma direção n
σ_n	tensão principal para uma direção n
ε_n	deformação específica para uma direção n
E	módulo de elasticidade longitudinal
μ	coeficiente de Poisson
$\sigma_{méd}$	tensão média
u_d	energia de distorção
u	energia total de deformação
u_v	energia devido à variação de volume
S_e	tensão de escoamento
σ_v	tensão de von Mises
D	duração nominal
A	aceleração da curva de choque
ASD_h	maior valor de ASD na curva randômica
ASD_l	menor valor de ASD na curva randômica
f_h	valor de frequência no ponto de maior nível ASD
f_l	valor de frequência no ponto de menor nível ASD
m	medida de dB/oitava relativa ao trecho da curva randômica
t	instante de tempo utilizado na descrição da curva de choque
T	período total do choque
<i>M. S.</i>	margem de segurança
σ_{adm}	tensão admissível
$\sigma_{máx}$	tensão máxima obtida na análise estrutural
d_b	diâmetro externo da rosca do parafuso
A_b	área bruta do parafuso
A_{be}	área resistente ou área efetiva do parafuso
f_{ub}	resistência à ruptura do parafuso
γ_{a2}	coeficiente de ponderação da resistência à ruptura
γ_g	coeficiente de ponderação das ações

R	condição de esforço limite
$F_{v,Rd}$	força de cisalhamento resistente
$F_{v,Sd}$	força de cisalhamento atuante
$F_{t,Rd}$	força de tração resistente
$F_{t,Sd}$	força de tração atuante
$F_{c,Rd}$	força resistente da parede dos furos
l_f	distância, na direção da força, entre a borda do furo e a borda do furo adjacente ou a borda livre
t	espessura da parte ligada na verificação das soldas
f_u	resistência à ruptura do aço da parede do furo submetido a compressão
l	altura nominal do cordão de solda
L	comprimento da solda
h	altura mínima do cordão de solda
f_w	resistência mínima a tração da solda
γ_{w2}	coeficiente de ponderação da resistência do material
$F_{w,Rd}$	força resistente da solda
σ_R	tensão resistente da solda

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	17
1.2	JUSTIFICATIVA	20
1.3	OBJETIVO	20
1.4	SISTEMÁTICA PARA RESOLUÇÃO DO PROBLEMA	21
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	22
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1	DISPOSITIVO	23
2.2.1	Funcionamento	27
2.2	TEORIA DA MÁXIMA ENERGIA DE DISTORÇÃO (CRITÉRIO DE VON MISES)	28
2.3	VIBRAÇÕES ALEATÓRIAS.....	29
2.3.1	Densidade espectral	30
2.4	APRESENTAÇÃO DAS NORMAS	31
2.4.1	Norma IEC 61373	31
2.4.1.1	Classificação por categorias.....	31
2.4.1.2	Teste aleatório funcional e teste de vida útil (vibrações aleatórias)	32
2.4.1.3	Teste de choque (<i>Shock testing</i>).....	35
2.4.2	Norma AISC	36
2.5	ELEMENTOS FINITOS	36
2.6	COSMOS	38
3	MATERIAL E MÉTODO	39
3.1	MATERIAL	39
3.2	MÉTODO	39
3.2.1	Modelo de elementos finitos	40
3.2.2	Análise randômica	45
3.2.2.1	Definição das curvas ASD	46
3.2.2.2	Cálculo de ADS1 e ASD2.....	48
3.2.3	Análise de choque	50
3.3	FORMA DA ANÁLISE DO RESULTADO	54
3.3.1	Análise estática	54
3.3.2	Análise randômica	54
3.3.3	Análise de choque	56

3.3.4	Análise das tensões obtidas	57
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
4.1	ANÁLISE ESTÁTICA	58
4.2	ANÁLISE DE CHOQUE	60
4.3	ANÁLISES RANDÔMICAS	64
4.4	VERIFICAÇÃO DOS PARAFUSOS	68
4.4.1	Cálculo da área resistente.....	69
4.4.2	Força de tração resistente.....	69
4.4.3	Força de cisalhamento resistente	70
4.4.4	Coefficiente de ponderação das ações (γ_g).....	70
4.4.5	Tração e cisalhamento combinados (R)	70
4.4.6	Cálculo da margem de segurança (M.S.)	71
4.4.7	Resultados obtidos	71
4.4.8	Pressão de contato nos furos	74
4.5	VERIFICAÇÃO DAS SOLDAS	77
4.5.1	Força resistente de cálculo de solda	77
5	CONCLUSÃO	81
	REFERÊNCIAS	82
	APÊNDICE A – Resultados obtidos na análise modal	83

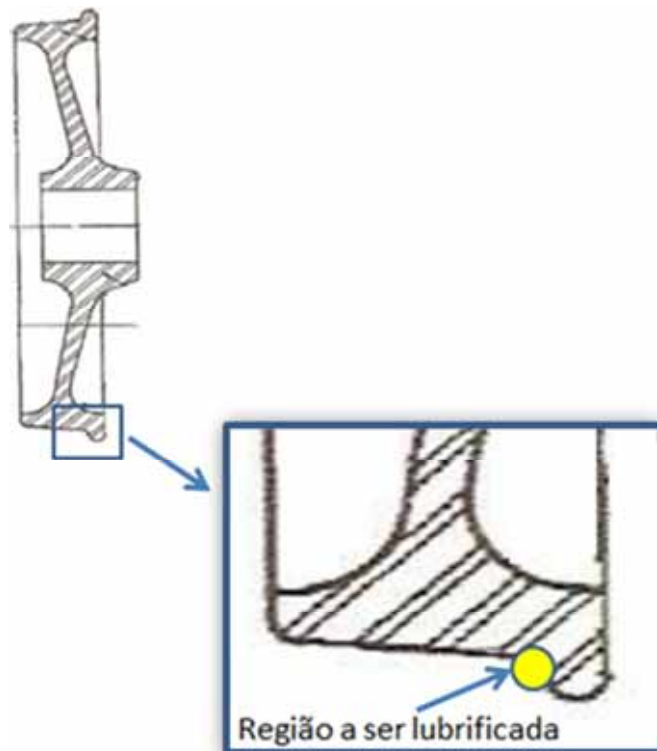
1 INTRODUÇÃO

1.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

As rodas de uma composição ferroviária estão em constante atrito com os trilhos por onde se deslocam os trens, assim são comuns os problemas de desgastes prematuros nas rodas e eventualmente nos trilhos também.

Segundo Neto (2012), os trilhos preferencialmente são mais rígidos quando comparados com as rodas do trem, isto ocorre porque é mais conveniente o desgaste das rodas em relação ao desgaste dos trilhos, pois a manutenção dos trilhos é mais cara em comparação com a manutenção das rodas. Sendo assim, as rodas de uma composição ferroviária tem um desgaste excessivo onde se faz necessária à lubrificação para o aumento da vida útil deste componente (Figura 1).

Figura 1 – Seção transversal de uma roda – Apresentação da região a ser lubrificada



Fonte: (Adaptado Neto, 2012).

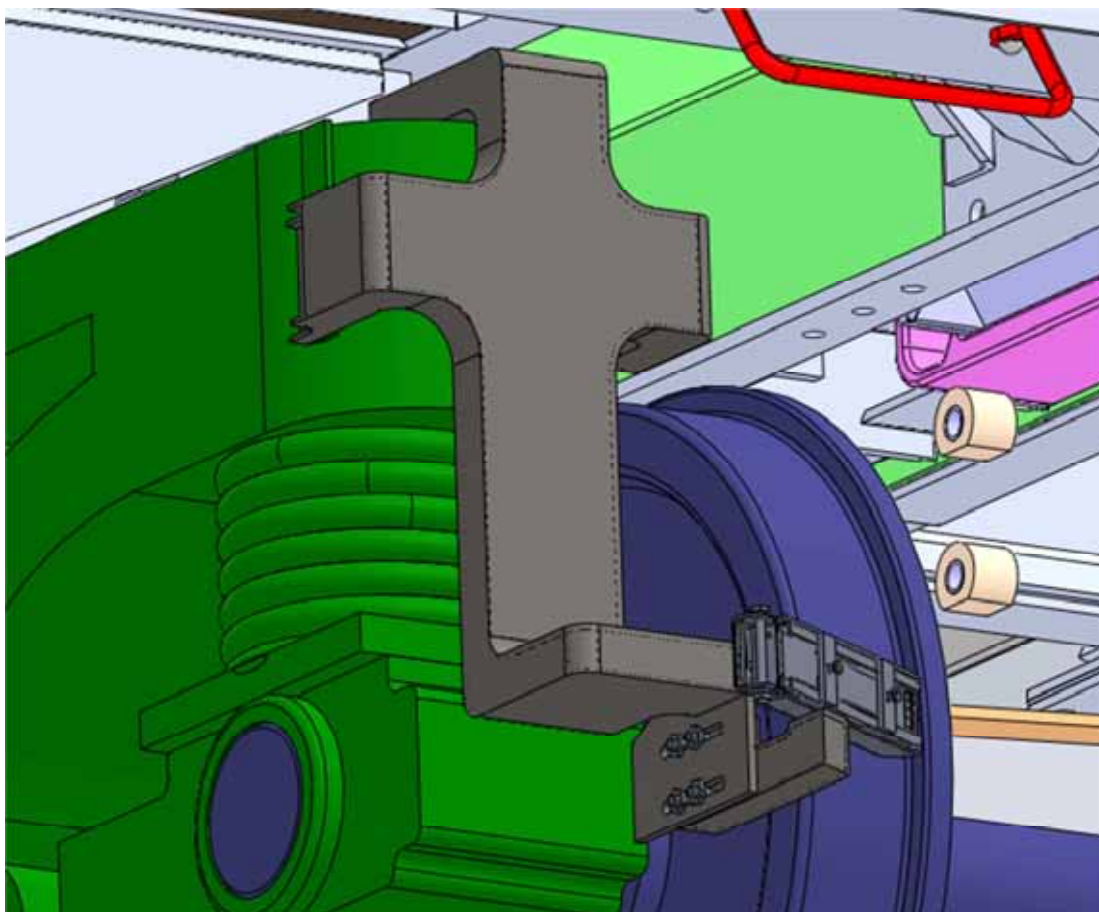
A região da roda, na qual está direcionada a lubrificação, é o friso, pois neste local ocorrem os principais problemas de desgaste evidenciados. Para esta finalidade existem

diversos lubrificantes, e dentre eles podemos citar o grafite sólido, que apresenta alguns pontos positivos, como por exemplo, baixo acúmulo de resíduos.

Assim sendo, para que seja feita a lubrificação dos frisos das rodas ferroviárias são necessários suportes anexados a estrutura do trem que sustentem o lubrificante, permitindo assim a atuação constante deste enquanto há a movimentação do trem, e são nestes suportes o enfoque deste trabalho.

A Figura 2 ilustra um suporte de uma pastilha de grafite, onde o suporte se encontra anexado ao trem acima do sistema de truques da composição ferroviária.

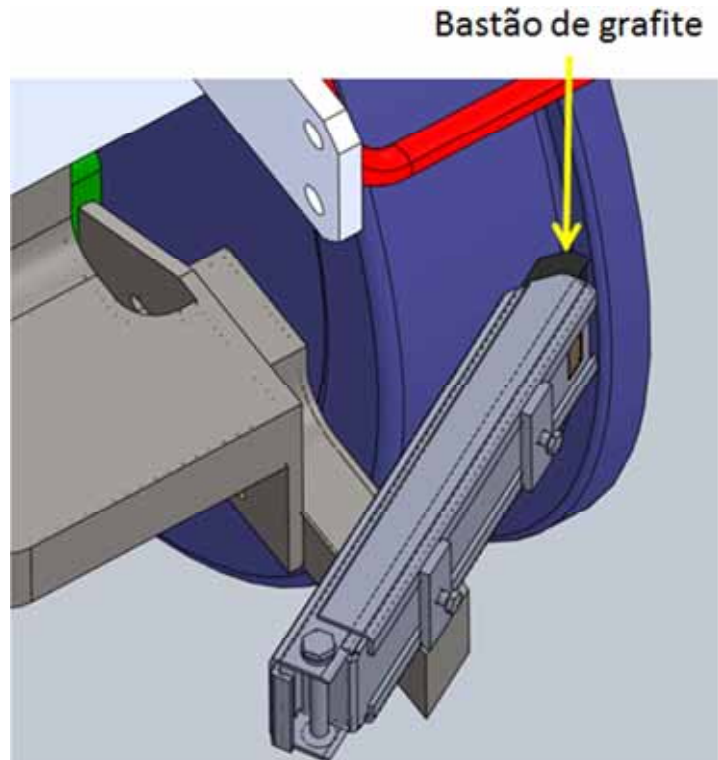
Figura 2 – Suporte de pastilha instalado no trem



Fonte: (do próprio autor).

Como é possível visualizar na Figura 3, o bastão de grafite se encontra em contato constantemente com o friso da roda. Isto ocorre porque a mola fita que se está dentro do suporte tende a regenerar o seu estado inicial (enrolado), desta forma empurra o bastão à medida que ele vai se desgastando e assim ocorre a lubrificação. O funcionamento do suporte será ilustrado detalhadamente no próximo capítulo.

Figura 3 – Bastão de grafite em contato com a roda do trem



Fonte: (do próprio autor).

Uma vez que, a lubrificação das rodas ferroviárias se torna justificável, deve-se refletir sobre o suporte ao qual faz a sustentação da pastilha de grafite. De modo geral, elementos ferroviários estão submetidos a acelerações devido às vibrações decorrentes ao deslocamento do trem sobre os trilhos. Estas acelerações por sua vez, acarretam em cargas dinâmicas nestes componentes ferroviários e trazer como consequência um aumento na tensão no componente que pode vir à fratura.

Desta forma é de fundamental importância à análise estrutural do suporte de pastilha, com o principal intuito de evitar problemas decorrentes das cargas dinâmicas provocadas pelas as acelerações que eventualmente ocorrem nos elementos ferroviários.

Assim esta monografia trará os passos necessários para a análise estrutural do suporte de pastilha para lubrificação de roda ferroviária, onde os carregamentos dinâmicos serão determinados pela norma IEC 61373, e as tensões admissíveis serão determinadas pela norma AISC.

1.2 JUSTIFICATIVA

Os elementos ferroviários anexados à estrutura de um trem estão submetidos a cargas dinâmicas (acelerações) consideráveis, principalmente aqueles que se situam próximos ao eixo do trem. Esta afirmação pode ser constatada, a partir das informações contidas na norma ferroviária europeia IEC 61373, na qual descreve em seus critérios de avaliação as acelerações para cada região de fixação dos elementos ferroviários. Esta se divide basicamente em quatro categorias que são: fixado abaixo do truque (próximo ao eixo), fixado acima do truque, fixado no corpo do trem (classe A) e fixado no corpo do trem (classe B).

O suporte de pastilha para lubrificação de roda ferroviária se encontra fixado acima dos truques e assim pode-se dizer que estará impreterivelmente sob a ação de acelerações consideráveis. Desta forma, o suporte deve ser submetido a uma análise estrutural na qual possa fornecer resultados que permitam avaliar se está ou não, dentro dos critérios exigidos pela norma ferroviária IEC61373.

Para a determinação dos deslocamentos da estrutura (suporte), e conseqüentemente a determinação das tensões atuantes nos casos de carga propostos pela norma ferroviária, é utilizado o método dos elementos finitos (MEF).

Segundo Lima (2009), este método consiste basicamente em discretizar um meio contínuo em pequenos elementos que são descritos por formulações integrais ou diferenciais, onde são resolvidos por modelos matemáticos aproximados. A grande vantagem deste método é que pode ser implementado computacionalmente, reduzindo assim o tempo para resolução do problema.

A realização dos cálculos de forma analítica seria muito trabalhosa e demandaria muito tempo, pois uma ou mais iterações a cerca da configuração geométrica são necessárias para que se chegue a um resultado na qual atenta às especificações exigidas.

1.3 OBJETIVO

Este trabalho de graduação propõe um projeto de uma estrutura anexada ao corpo do trem, que faça a sustentação de um bastão de grafite que por sua vez lubrifique as rodas e esteja de acordo com a norma IEC 61373 (norma ferroviária europeia).

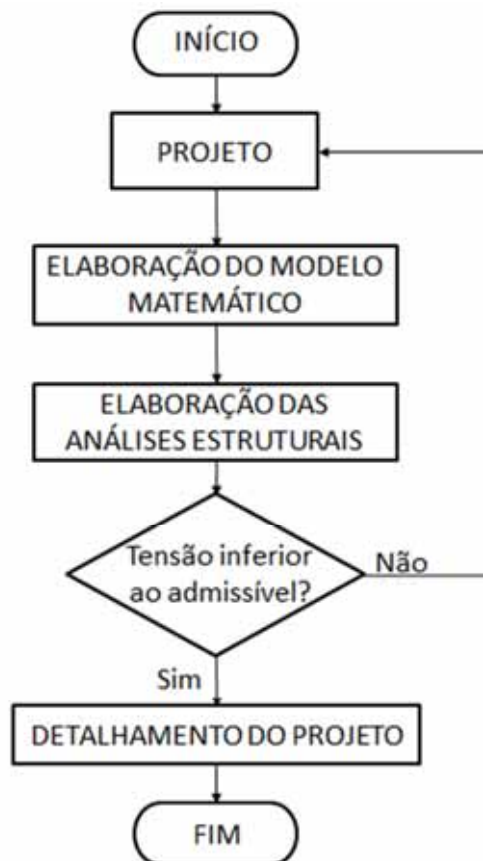
1.4 SISTEMÁTICA PARA RESOLUÇÃO DO PROBLEMA

Para a resolução do problema foi adota uma sistemática, na qual segue os passos a seguir.

- 1°) Projeto de acordo com as premissas iniciais
- 2°) Elaboração do modelo matemático (elementos finitos)
- 3°) Realização das análises estruturais
- 4°) Comparação com as tensões admissíveis
 - Se a tensão atuante < tensão admissível.
 - Ir para o passo 5.
 - Senão
 - Voltar ao passo 1.
- 5°) Detalhamento do projeto com a concepção final

O fluxograma, apresentado na Figura 4, ilustra a metodologia adotada.

Figura 4 – Fluxograma para resolução do trabalho



Fonte: (do próprio autor).

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta monografia está dividida em seis capítulos, sendo:

O capítulo 1 justificará a análise deste componente, bem como a sistemática de solução do problema.

No capítulo 2, veremos os fundamentos teóricos necessários para a assimilação dos conceitos envolvidos pela norma ferroviária IEC 61373.

No capítulo 3, está a metodologia para a determinação dos carregamentos adotados mediante a norma ferroviária e os materiais necessários para a realização deste estudo.

No capítulo 4, serão apresentados os resultados das análises estruturais para os carregamentos propostos pela norma, sendo eles o teste funcional, teste de vida útil e teste de choque e serão discutidos os resultados encontrados e comparados com as tensões admissíveis determinadas pela norma AISC.

No capítulo 5, serão apresentadas as conclusões do trabalho e possíveis melhorias que poderão ser posteriormente adotadas em trabalhos futuros.

Por último serão apresentadas as referências bibliográficas utilizadas para este trabalho e no apêndice estão os resultados obtidos na análise modal.

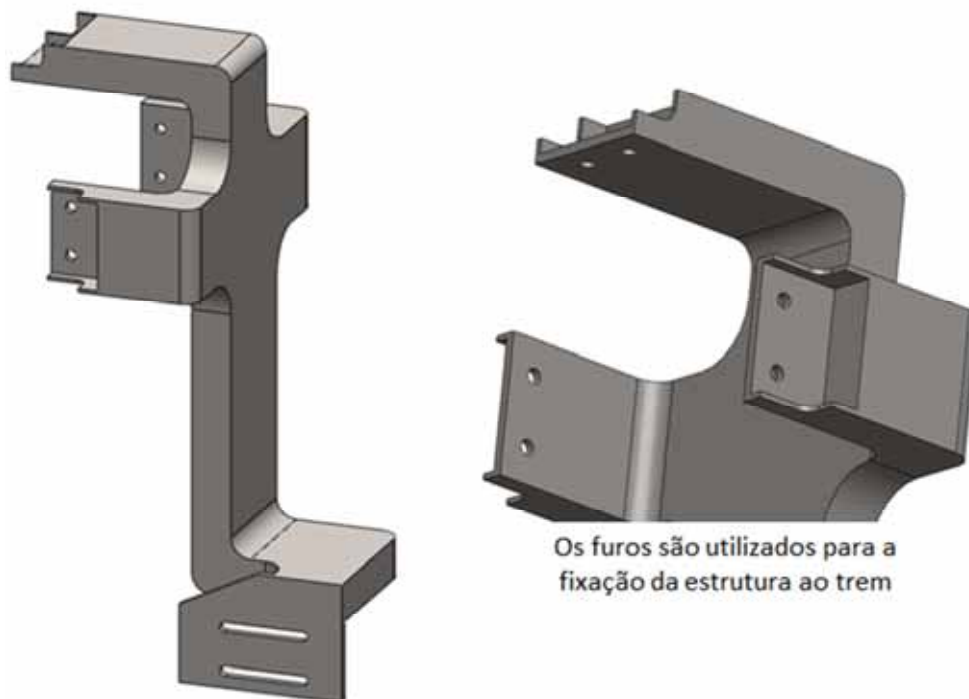
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 DISPOSITIVO

O suporte de lubrificação de roda ferroviária é composto pelos seguintes componentes:

- 1) **Corpo primário:** O corpo primário é a principal estrutura do suporte de pastilha. Este componente é fixado no trem, mais especificamente acima dos truques. A Figura 5 ilustra este componente, bem como sua fixação.

Figura 5 – Vista isométrica e pontos de fixação do corpo primário



Fonte: (do próprio autor).

Quadro 1 - Propriedades mecânicas consideradas no corpo primário.

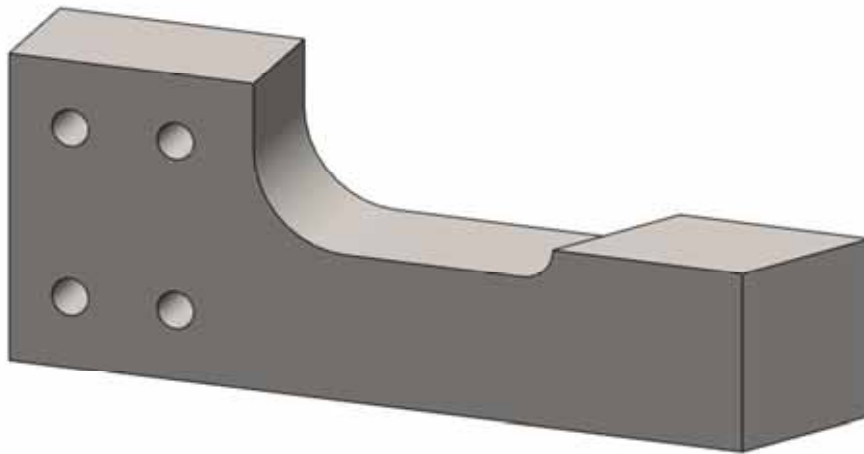
Aço baixo carbono fundido	
Tensão de escoamento (σ_y)*	200 MPa
Modulo de elasticidade (E)**	200 GPa
Modulo de elasticidade transversal (G)**	77 GPa
Poisson (μ)**	0,3
Densidade (ρ)**	7850 kg/m ³
Massa total	22,6 kg

*Propriedade de acordo com CHIAVERINI, 2005.

**Propriedade de acordo com a norma NBR 8800, 2008.

- 2) **Corpo secundário:** O corpo secundário faz a ligação entre o corpo primário e o suporte de gaveta. Na Figura 6 é possível observar que existem furações nesta estrutura, que por parafusos, é fixado no corpo primário. Além disto, como existem oblongos no corpo primário é possível à movimentação longitudinal do corpo secundário e conseqüentemente o ajuste da posição do suporte de gaveta.

Figura 6 – Vista isométrica do corpo secundário



Fonte: (do próprio autor).

Quadro 2 - Propriedades mecânicas consideradas no corpo secundário.

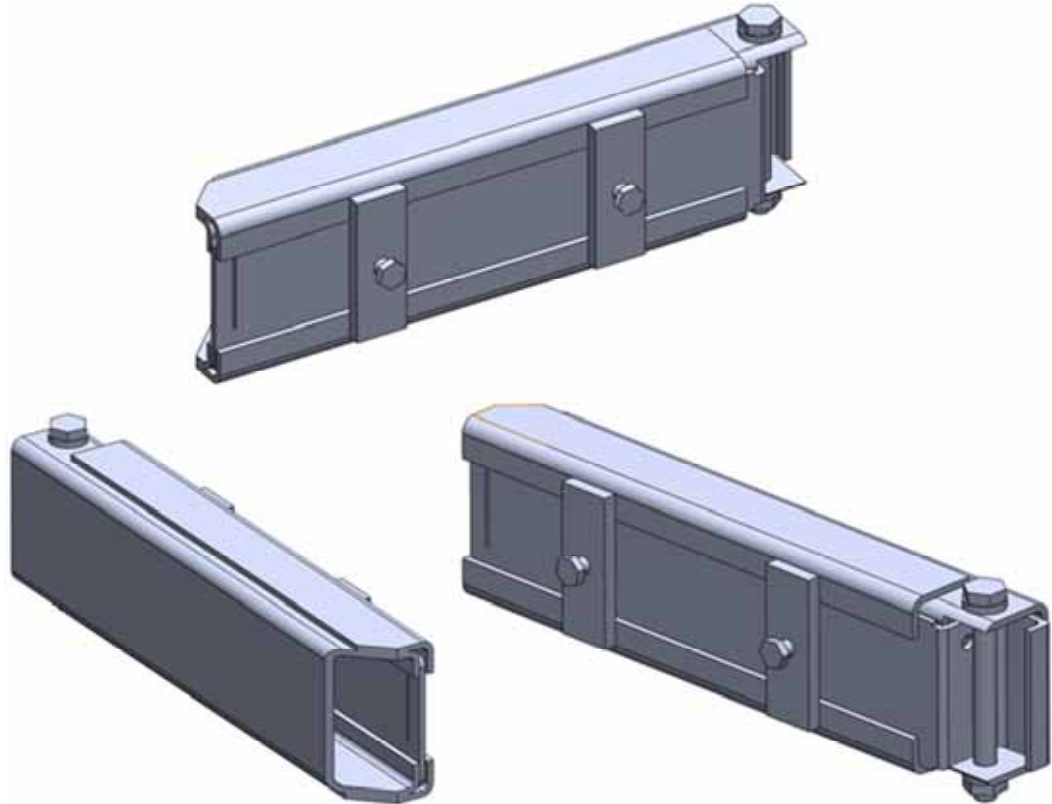
Aço baixo carbono fundido	
Tensão de escoamento (σ_y)*	200 MPa
Modulo de elasticidade (E)**	200 GPa
Modulo de elasticidade transversal (G)**	77 GPa
Poisson (μ)**	0,3
Densidade (ρ)**	7850 kg/m ³
Massa total	1,7 kg

*Propriedade de acordo com CHIAVERINI, 2005.

**Propriedade de acordo com a norma NBR 8800, 2008.

- 3) **Suporte de gaveta:** O suporte de gaveta (Figura 7) está ligado ao corpo primário por um cordão de solda. Neste componente está alojado o bastão de grafite que faz a lubrificação da roda.

Figura 7 – Suporte de gaveta



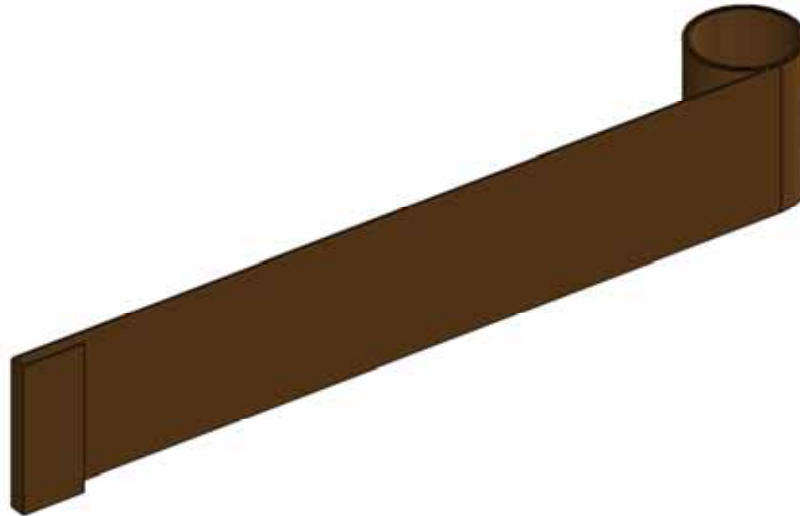
Fonte: (do próprio autor).

Quadro 3 - Propriedades mecânicas consideradas no suporte de gaveta.

Aço ASTM A36 (MATWEB, 2014)	
Tensão de escoamento (σ_y)	250 MPa
Modulo de elasticidade (E)	200 GPa
Modulo de elasticidade transversal (G)	77 GPa
Poisson (μ)	0,3
Densidade (ρ)	7850 kg/m ³
Massa total	2,4 kg

- 4) **Mola fita:** A mola fita (Figura 8) é o componente no qual pressiona o bastão de grafite contra a roda. Este componente está fixado na tampa do suporte de gaveta.

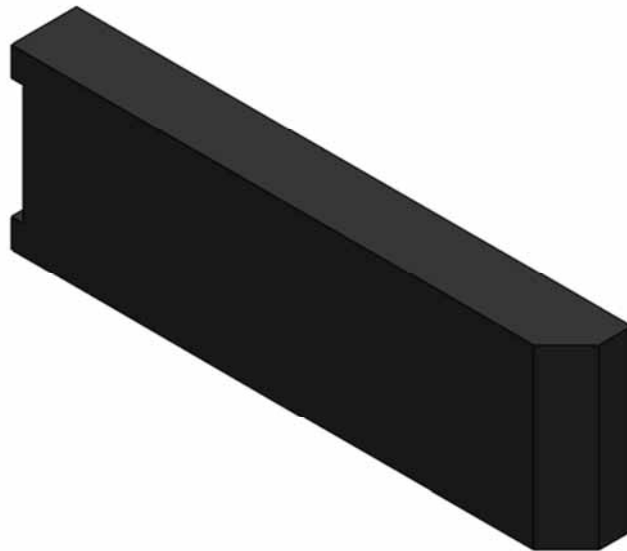
Figura 8 – Mola fita



Fonte: (do próprio autor).

- 5) Bastão de grafite (lubrificante):** O bastão de grafite (Figura 9) é um componente sólido que se desgasta devido o atrito que existe entre ele e a roda.

Figura 9 – Bastão de grafite

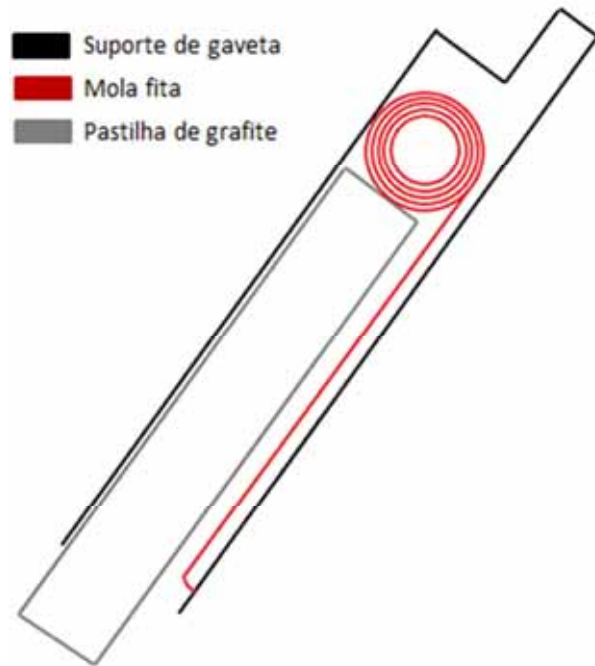


Fonte: (do próprio autor).

2.2.1 Funcionamento

A mola fita se encontra fixada no suporte de gaveta por uma de suas extremidades e apenas encostada na parte traseira do bastão de grafite (Figura 10).

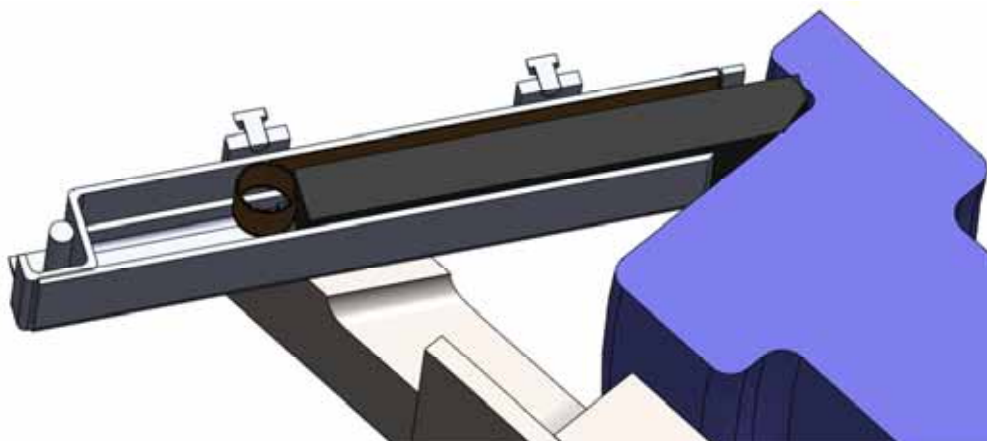
Figura 10 – Esquema simplificado ilustrando a atuação da mola fita



Fonte: (do próprio autor).

À medida que o bastão é desgastado pelo atrito com a roda do trem a mola fita começa a se enrolar, desta forma empurra o bastão contra a roda, realizando assim a lubrificação (Figura 11).

Figura 11 – Seção transversal do suporte de pastilha



Fonte: (do próprio autor).

2.2 TEORIA DA MÁXIMA ENERGIA DE DISTORÇÃO (CRITÉRIO DE VON MISES)

Segundo Shigley (1984), a teoria da energia de distorção também conhecida como teoria de von Mises-Hencky, prevê que o início do escoamento de material dúctil (predominantemente utilizado para aços) começa quando a energia de distorção do cristal é igual ou superior a energia de distorção do cristal quando submetido a um ensaio de tração.

Os equacionamentos a seguir ilustram como é obtido as tensões equivalentes de von Mises, que são utilizados em projetos para a determinação das tensões admissíveis dos mesmos.

Primeiramente, para a determinação da energia de deformação, é considerado um cubo unitário no qual apresenta tensões principais de modo que $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$. Assim, o trabalho realizado em qualquer uma das três direções principais pode ser desenvolvido como:

$$u_n = \frac{\sigma_n \times \varepsilon_n}{2} \quad (1)$$

Onde:

u_n : Energia de deformação para uma direção n;

σ_n : Tensão principal para uma direção n;

ε_n : Deformação específica para uma direção n.

Portanto, para energia total de deformação temos:

$$u = u_1 + u_2 + u_3 = [1/(2E)] \times [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)] \quad (2)$$

Onde:

μ : Coeficiente de Poisson.

Definindo uma tensão média como sendo igual à média aritmética das tensões principais, pode-se determinar a quantidade de energia devido à variação de volume em função da tensão média:

$$u_v = \frac{3\sigma_{méd}^2}{2E} \times (1 - 2\mu) \quad (3)$$

Sendo, $\sigma_{méd}^2 = [(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3]^2$, temos:

Assim a energia de distorção é a subtração entre a energia total de deformação e a energia devido à variação de volume:

$$u_d = u - u_v = \frac{1 + \mu}{3E} \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right] \quad (4)$$

Para a definição do critério, determina-se a energia de distorção para o teste de tração simples, onde $\sigma_1 = S_e$ e $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$.

$$u_d = \frac{1 + \mu}{3E} S_e^2 \quad (5)$$

Iguala-se então este resultado (5) a equação (4):

$$2S_e^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \quad (6)$$

Entretanto, no início do escoamento temos $\sigma_3 = 0$, portanto:

$$S_e^2 = \sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2 \quad (7)$$

Por último, define-se então como tensão equivalente de von Mises, para fins de projeto:

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} \quad (8)$$

2.3 VIBRAÇÕES ALEATÓRIAS

Segundo Thomson (1978), vibrações aleatórias são características de uma função na qual não é possível determinar seu valor em um dado instante de tempo. Entretanto, apesar destas vibrações serem imprevisíveis, elas apresentam certo grau de regularidade e desta forma é possível uma abordagem probabilística do fenômeno.

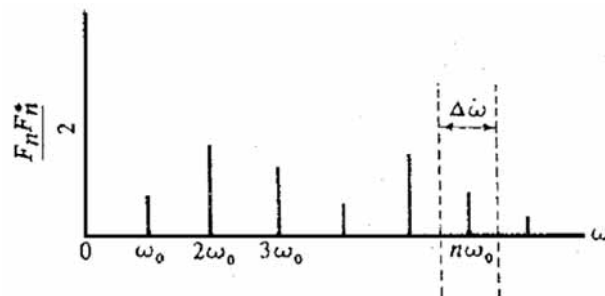
A partir de um grande conjunto de amostras de funções aleatórias de um fenômeno, onde é possível se estabelecer uma confiabilidade em um método estatístico, pode-se obter a média deste conjunto e pode-se obter também o valor associado às variáveis em função do tempo que estão associados à distribuição de probabilidade.

2.3.1 Densidade espectral

Segundo Thomson (1978), vibrações aleatórias contêm frequências em uma distribuição contínua sobre uma faixa larga e a quantidade de energia em cada faixa desta é de interesse neste estudo. Para exemplificar este problema, considera-se inicialmente uma frequência periódica $F(t)$ que contém muitas frequências discretas (Figura 12). Para esta função é possível calcular o valor médio quadrático, onde este valor corresponde à soma dos valores médios quadráticos de cada componente.

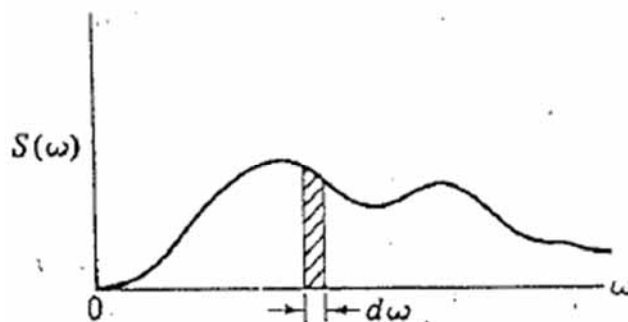
Assim, como supomos inicialmente que o número de frequências discretas é muito grande, desta forma pode-se aproximar esta função discreta em uma função contínua, como ilustrado na Figura 13.

Figura 12 – Espectro discreto de frequências de uma função periódica



Fonte: (THOMSON, 1978).

Figura 13 – Curva de densidade espectral contínua



Fonte: (THOMSON, 1978).

Esta função de densidade espectral pode ser encontrada na norma IEC 61373, como curvas ASD (*Acceleration Spectral Density*). Para as análises randômicas (aleatórias), são utilizadas estas curvas que partem do mesmo princípio de construção, entretanto apresentada com uma força de excitação diferente do apresentado neste exemplo.

2.4 APRESENTAÇÃO DAS NORMAS

2.4.1 Norma IEC 61373

A norma ferroviária europeia IEC 61373 (*International Electrotechnical Commission*), apresenta os requisitos necessários para a avaliação de um componente ferroviário. O trecho a seguir extraído da norma ilustra os objetivos que ela visa alcançar:

Esta norma especifica os requisitos para os testes de equipamentos destinados ao uso em veículos ferroviários, que posteriormente estarão sujeitos a vibrações e choques do ambiente operacional ferroviário. Para obter a garantia de que a qualidade do equipamento é aceitável, deve suportar os testes de duração que simulam as condições de serviço visto em toda sua vida útil. (Norma IEC 61373, 2010, p. 10, tradução).

Os testes que o componente ferroviário deve suportar a fim de estar em conformidade com a norma são:

- Teste aleatório funcional (*Functional random test*):

Os níveis randômicos deste teste são mínimos a serem aplicados, a fim de demonstrar que o equipamento em teste é capaz de funcionar, quando submetidos a condições que podem ocorrer em serviço. (Norma IEC 61373, 2010, p. 10, tradução).

- Teste de vida útil (*Simulated long-life test*):

“Este teste visa estabelecer a integridade mecânica do equipamento, sob vibrações acima dos níveis de serviço. Onde não é necessário demonstrar capacidade de operar sob estas condições.” (Norma IEC 61373, 2010, p. 10, tradução).

- Teste de choque (*Shock testing*):

O teste de choque visa simular a ocorrência de eventos raros (grandes acelerações). O componente não opera sob estas condições mais é necessário demonstrar integridade estrutural frente a este carregamento. (Norma IEC 61373, 2010, p. 10, tradução).

2.4.1.1 Classificação por categorias

As acelerações e vibrações aleatórias submetidas ao elemento ferroviário são decorrentes do posicionamento de fixação do componente. A norma IEC classifica da seguinte maneira:

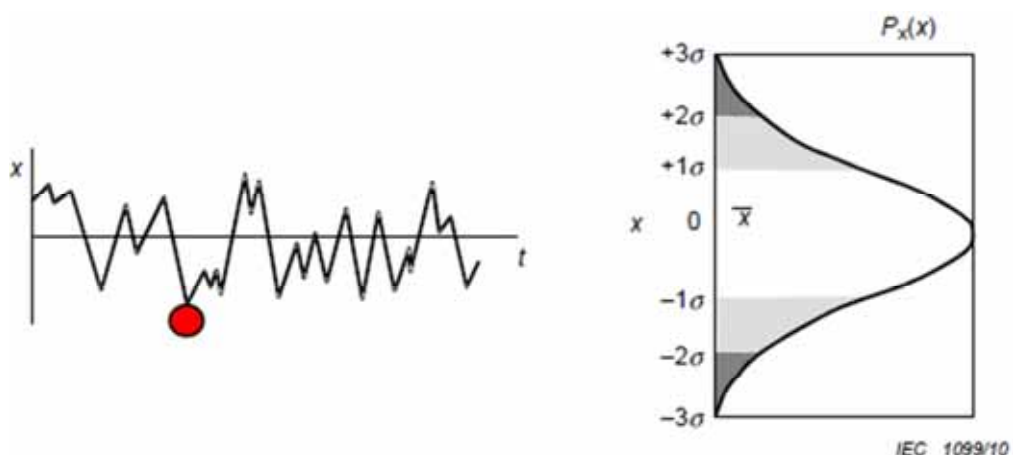
- Montado no corpo do trem (Classe A): componentes fixados acima do chassi do trem;
- Montado no corpo do trem (Classe B): montado dentro de uma caixa de equipamento fixado no chassi do trem;
- Montado sobre os truques;
- Montado sobre os eixos.

As acelerações, de acordo com a norma IEC, se intensificam à medida que o elemento ferroviário se posiciona cada vez mais próximo do eixo. Desta forma, as acelerações das estruturas fixadas nos eixos são maiores quando comparadas as encontradas nas estruturas fixadas acima dos truques. No capítulo seguinte veremos que por isso o suporte de pastilha deve ser fixado acima dos truques e não abaixo, com o intuito de reduzir os níveis de vibração.

2.4.1.2 Teste aleatório funcional e teste de vida útil (vibrações aleatórias)

O teste aleatório funcional e o teste de vida útil representam as vibrações aleatórias que ocorrem no decorrer da operação do componente. Estas vibrações aleatórias podem ser distribuídas em uma curva de Gauss, como ilustrada na Figura 14.

Figura 14 – Sinal de uma vibração aleatória e curva gaussiana



Fonte: (Norma IEC 61373, 2010).

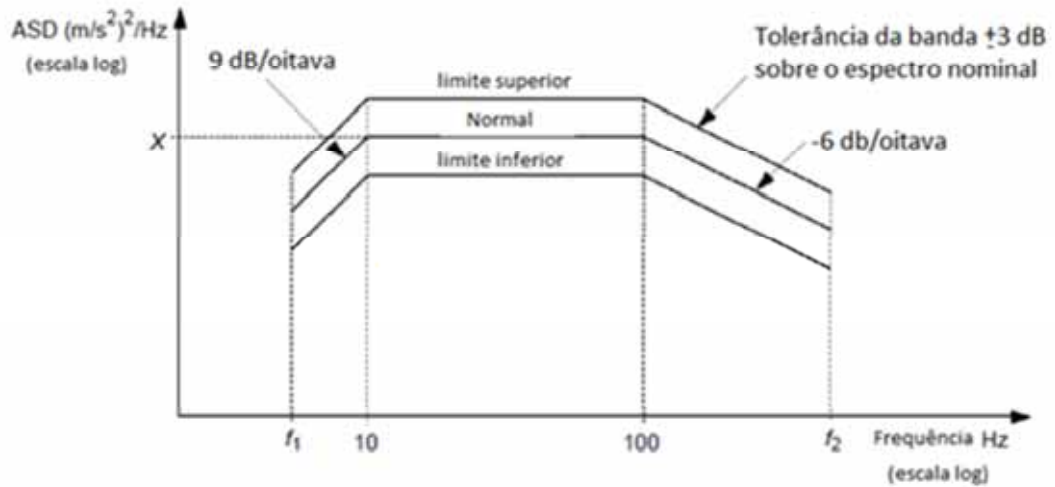
De forma simplificada, pode se medir as acelerações em cada região da composição ferroviária, e plotar estas acelerações em função do tempo (Figura 14). Segundo Thomson (1978), através de uma função de transferência, pois a relação entre a saída e a entrada é

linear, passa-se o sinal obtido no domínio do tempo para o domínio da frequência. Esta função obtida no domínio da frequência, para a norma IEC, é conhecida como curva ASD (*Acceleration Spectral Density*).

Na norma IEC, existem curvas ASD para o teste aleatório funcional e para o teste de vida útil. A diferença entre estas duas considerações feitas pela norma estão nos níveis ASD de cada um dos testes. No teste aleatório funcional, os níveis são menores quando comparados com o teste de vida útil, isto ocorre porque no primeiro são impostos os níveis de aceleração espectral sob o qual o equipamento está submetido em operação. Já no segundo teste, os níveis de ASD são maiores, mas o equipamento apenas precisa demonstrar integridade estrutural quando submetido a este teste.

A Figura 15 ilustra um trecho da norma na qual apresente estes níveis e a curva ASD para o suporte de pastilha (nível ASD apresentado no eixo Y da curva a seguir).

Figura 15 – Curva ASD para categoria de equipamentos fixados acima do truque



Quando a massa é: ≤ 100 kg:

$$f_1 = 5 \text{ Hz}$$

$$f_2 = 250 \text{ Hz}$$

Quando a massa é: $> 100 \text{ kg} \leq 250$ kg:

$$f_1 = \frac{250}{\text{mass}} \times 2 \text{ Hz}$$

$$f_2 = \frac{250}{\text{mass}} \times 100 \text{ Hz}$$

Quando a massa é: > 250 kg:

$$f_1 = 2 \text{ Hz}$$

$$f_2 = 100 \text{ Hz}$$

	Vertical	Transversal	Longitudinal
Teste aleatório funcional, nível ASD (m/s²)²/Hz	0,19	0,144	0,0414
Teste de vida útil, nível ASD (m/s²)²/Hz	6,12	4,62	1,32

Fonte: (Adaptado da Norma IEC 61373, 2010).

Na Figura 15 pode se observar os níveis ASD, tanto para o teste funcional (*functional test*) quanto para o teste de vida útil (*long-life test*). Observa-se também que os níveis ASD apresentados estão relacionados com os três eixos x, y e z correspondentes respectivamente à longitudinal, vertical e transversal. Estes eixos são descritos como:

- Longitudinal:

O eixo longitudinal está orientado na direção paralela ao trilho.

- Vertical:

O eixo vertical corresponde à direção perpendicular ao plano do solo.

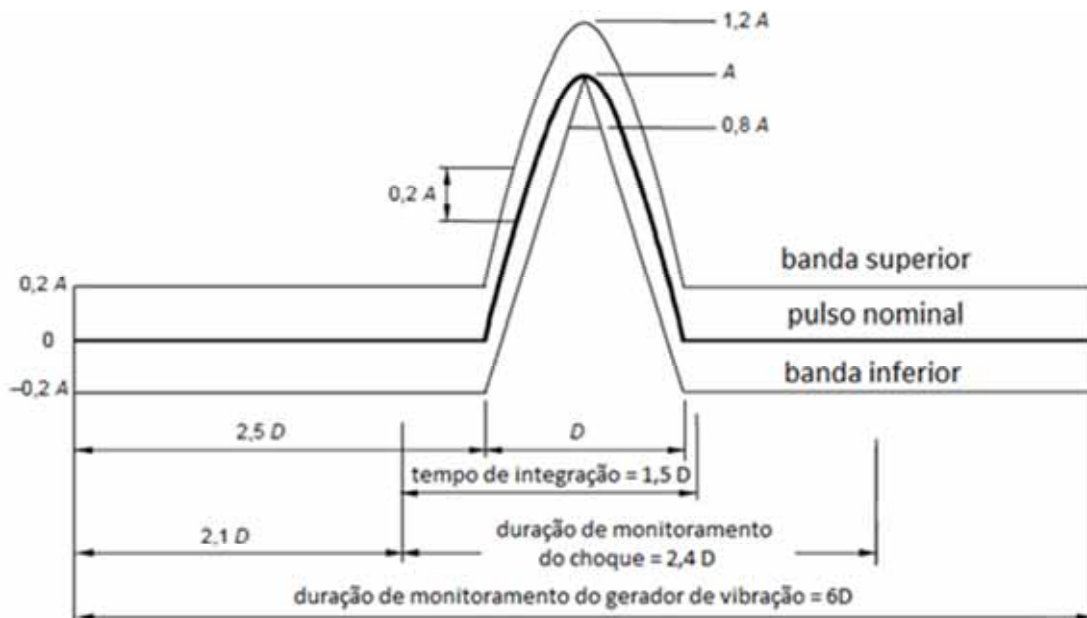
- Transversal:

O eixo transversal corresponde à direção perpendicular ao trilho

2.4.1.3 Teste de choque (*Shock testing*)

O teste de choque representa eventuais acelerações pico que podem ocorrer na estrutura em uma situação limite. O suporte deve apenas suportar as acelerações propostas pela norma sem perder sua integridade estrutural, mas não é necessária sua operação mediante a este carregamento. A Figura 16 exemplifica a curva de aceleração proposta pela norma.

Figura 16 – Curva de choque para equipamentos fixados acima do truque



Fonte: (Adaptado da Norma IEC 61373, 2010).

Observa-se na Figura 16 que existe um período que antecede o início da aceleração ($2,5D$) e após em um período D ocorre de fato à aceleração. Ao final tem-se um período de aceleração nula de mesma duração que o período inicial ($2,5D$).

2.4.2 Norma AISC

A norma AISC é utilizada neste trabalho para determinar as tensões admissíveis consideradas nos carregamentos. Para isto podemos classificar os carregamentos como:

- Caso de carga convencional:

Nesta situação se enquadram o teste aleatório funcional que corresponde às cargas atuantes sobre a estrutura durante seu funcionamento, idem a descrição do teste na norma IEC 61373.

- Caso de carga eventual:

Nestes casos de carga estão situados os carregamentos que raramente ocorrem, no qual podemos classificar os testes de vida útil e de choque.

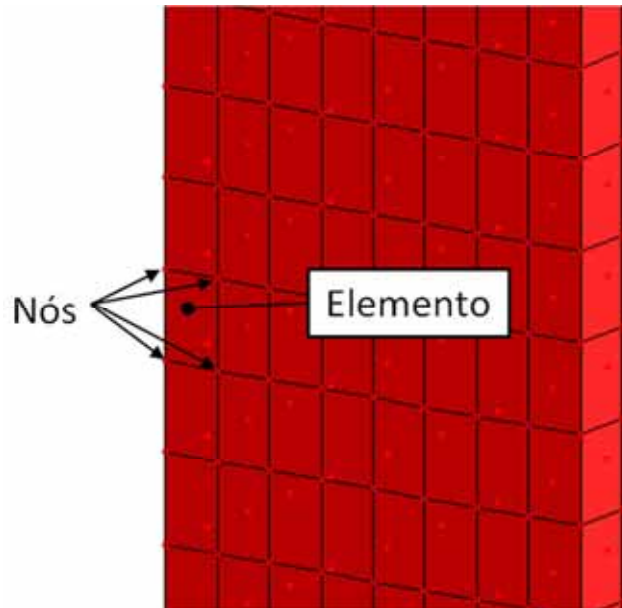
No caso de carga convencional a tensão admissível é 60% da tensão de escoamento e no caso eventual é de 80% do escoamento.

A tensão atuante na estrutura, que deve ser comparada com a tensão admissível, é a tensão equivalente de von Mises (obtida no modelo de elementos finitos nas análises estruturais).

2.5 ELEMENTOS FINITOS

Segundo Soriano (2009), o método dos elementos finitos é uma solução alternativa para modelos matemáticos contínuos, pois as soluções analíticas, em geral, oferecem grandes dificuldades. Assim, este método propõe discretizar um meio contínuo em uma quantidade finita de elementos, onde cada elemento estará interconectado ao seu elemento vizinho por pontos nodais. A Figura 17 ilustra uma região discretizada por uma malha (divisão do corpo em pequenas partes), na qual apresentam os elementos com seus respectivos nós.

Figura 17 – Ilustração de uma malha com seus nós e elementos



Fonte: (do próprio autor).

Este método parte do princípio da utilização de leis simples (usualmente polinomiais) para se obter uma solução aproximada do problema, ao invés de leis que apresentam as soluções exatas (método analítico), pois a obtenção de solução analítica nem sempre é possível, principalmente quando tem-se o contorno irregular do meio contínuo a ser discretizado.

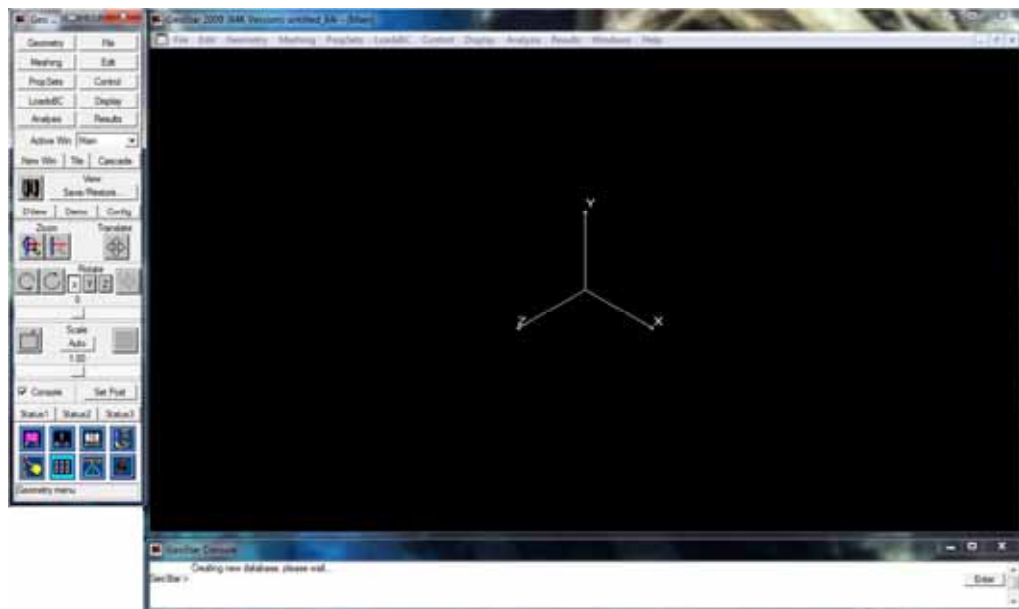
Os resultados obtidos do método, em geral, são deslocamentos nodais, e assim podem ser calculadas as deformações e tensões elementais. Este resultado obtido depende diretamente da qualidade da malha aplicada ao modelo, onde a malha considerada ideal é aquela no qual todos os elementos do modelo procuram ter o mesmo tamanho e formato geométrico. Para uma malha onde os elementos tenham tamanhos irregulares e formatos diferentes, pode haver a interferência na convergência dos resultados e conseqüentemente na distribuição dos deslocamentos nodais, ou seja, quanto menor o tamanho e mais uniforme sejam esses elementos mais confiável será o resultado apresentado.

O método dos elementos finitos apresenta grandes vantagens em relação a outros métodos de cálculo, pois existe uma facilidade maior em sua implementação computacional em relação aos demais. Desta forma, podemos reduzir o tempo dos cálculos necessários, e se falarmos em grandes estruturas ou cálculos complexos isto se torna extremamente importante.

2.6 COSMOS

A análise estrutural é executada através do método dos elementos finitos com o auxílio do programa COSMOS/M ® 2.95 2009 (64k version). O software COSMOS/M foi desenvolvido pela *Structural Reserch and Analysis Corporation* (SRAC), para a utilização em computadores pessoais e estações de trabalho. Nele estão incluídos módulos para resolução de problemas lineares, não lineares, estáticos, dinâmicos, entre outros. A Figura 18 ilustra a interface que o programa apresenta ao usuário.

Figura 18 – Interface do programa Cosmos



Fonte: (COSMOS/M ® 2.95, 2009)

3 MATERIAL E MÉTODO

3.1 MATERIAL

Na elaboração do suporte de pastilha para lubrificação de roda ferroviária é necessário à utilização de ferramentas computacionais e normas que forneçam as tensões e esforços admissíveis, bem como os carregamentos que devem ser aplicados a estrutura. A seguir estão listados os softwares e normas (materiais) utilizados, incluindo suas respectivas finalidades:

- Software SolidWorks: Utilizado na elaboração do modelo CAD.
- Software Cosmos: Utilizado para a elaboração do modelo matemático (elementos finitos) e para a análise estrutural.
- Norma IEC 61373: Através desta norma são determinados os carregamentos considerados na análise estrutural do suporte.
- Norma AISC: A norma AISC é utilizada para a determinação das tensões admissíveis para a estrutura (exceto região dos olhais e parafusos), frente aos carregamentos considerados na norma IEC 61373.
- Norma NBR 8800: Através desta norma são determinados os esforços admissíveis para os parafusos, olhais e soldas existentes na estrutura.

3.2 MÉTODO

O método utilizado para a elaboração do suporte de pastilha consiste basicamente em projetar inicialmente uma estrutura na qual atenda as premissas iniciais. Estas premissas iniciais devem satisfazer algumas questões como respeitar as distâncias entre a fixação do suporte e o friso da roda, construir um dispositivo que pressione o bastão contra a roda permitindo a lubrificação, elaborar um suporte com massa reduzida ao máximo possível e evitar soldas no dispositivo.

Partindo destas premissas, inicialmente é projetado um suporte (configuração inicial) e sobre este é feito o modelo de elementos finitos. Com o modelo de elementos finitos são elaboradas as análises estruturais, de acordo com os passos a seguir:

- 1º) Análise estática contemplando somente o peso próprio;
- 2º) Análise modal para obtenção dos modos de vibração (incluindo a frequência natural) com suas respectivas participações de massa;
- 3º) Após a análise modal são elaboradas as análises randômicas e de choque, no qual utilizam os valores desta análise modal para o cálculo das acelerações;
- 4º) É feita a combinação linear entre a tensão obtida na análise estática com as tensões obtidas nas análises dinâmicas.

Com os resultados das análises estruturais, são verificadas se as tensões obtidas são inferiores as tensões admissíveis. Caso não sejam inferiores ao admissível, são feitas alterações geométricas até se obter resultados satisfatórios.

3.2.1 Modelo de elementos finitos

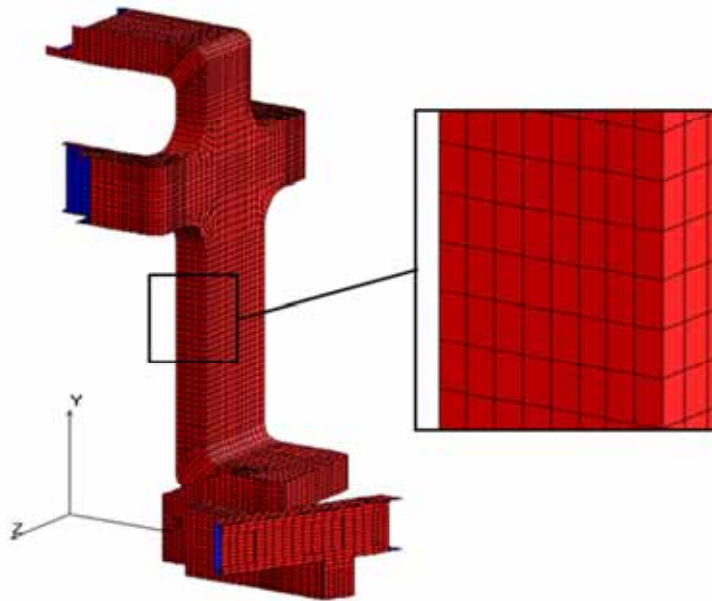
No modelo de elementos finitos são utilizados elementos de casca (SHELL 4) e elementos de beam (BEAM 3D), onde:

SHELL4: elemento de casca quadrilateral de 04 nós com membrana e flexibilidade para modelos tridimensionais estruturais e térmicos. Possui 6 graus de liberdade por nó (3 de translação e 3 de rotação);

BEAM3D: elemento estrutural e térmico tridimensional com 2 nós uniaxiais. Possui 6 graus de liberdade por nó (3 de translação e 3 de rotação).

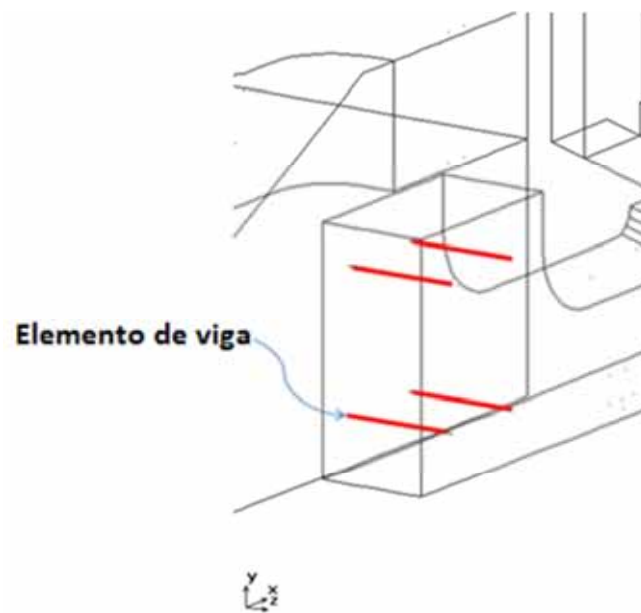
Os elementos de viga são utilizados nos parafusos de fixação do suporte secundário ao suporte primário e na tampa do suporte de gaveta, para o restante de estrutura são utilizados os elementos de casca. As Figuras 19 a 21 ilustram o modelo de elementos finitos considerados nas análises estruturais.

Figura 19 – Modelo de elementos finitos – Detalhe da malha em casca



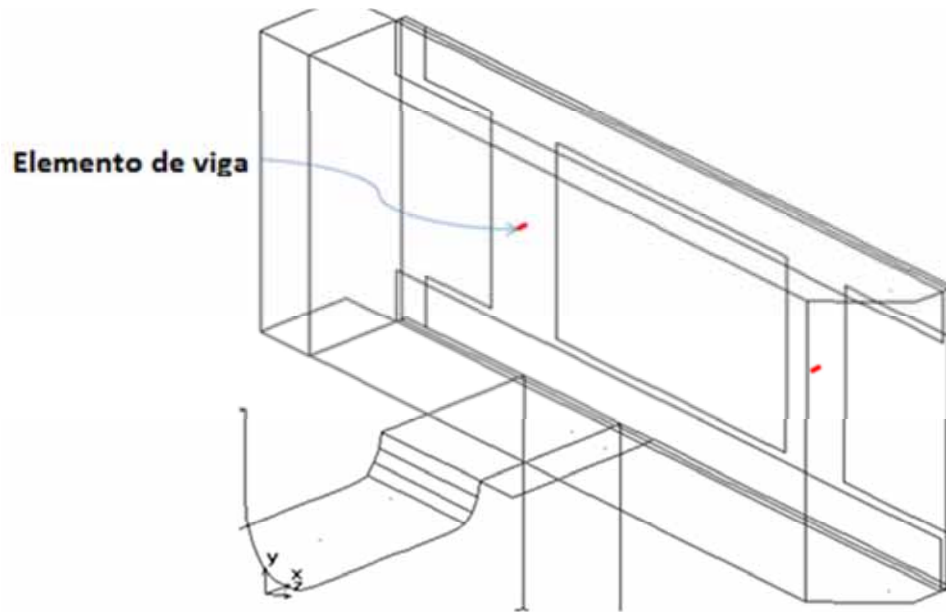
Fonte: (do próprio autor).

Figura 20 – Detalhe dos elementos de viga que ligam o corpo primário ao secundário



Fonte: (do próprio autor).

Figura 21 – Detalhe dos elementos de viga que travam a tampa do suporte

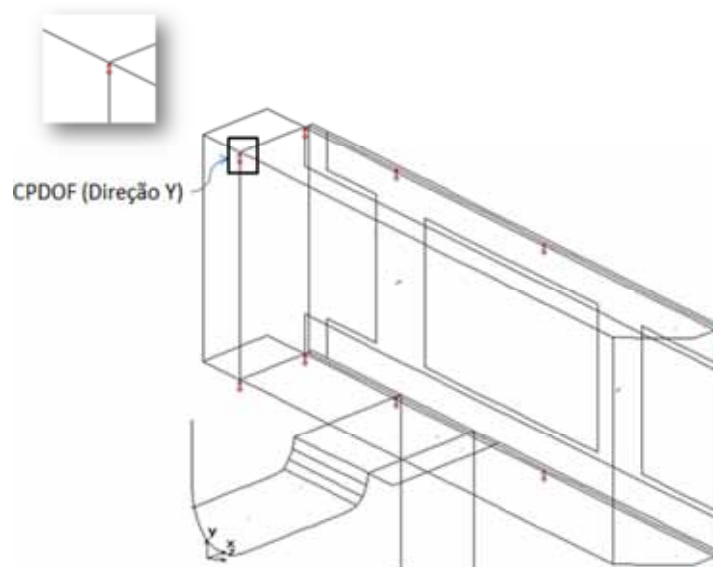


Fonte: (do próprio autor).

Nas análises dinâmicas efetuadas no software Cosmos não é possível à utilização de elementos de contato (Gap), desta forma são utilizados acoplamentos (descritos pelo software como CPDOF's) para representar o contato entre os componentes do suporte.

O CPDOF define um par de graus de liberdade acoplados, ou seja, se o nó mestre (o primeiro nó solicitado pelo software é o mestre, demais são escravos) se deslocar em uma dada direção o nó escravo se deslocará na mesma direção e sentido, e com o mesmo valor. A teoria é válida para os seis graus de liberdades dos nós, três translações e três rotações.

Figura 22 – Identificação dos CPDOF's utilizados no suporte de gaveta

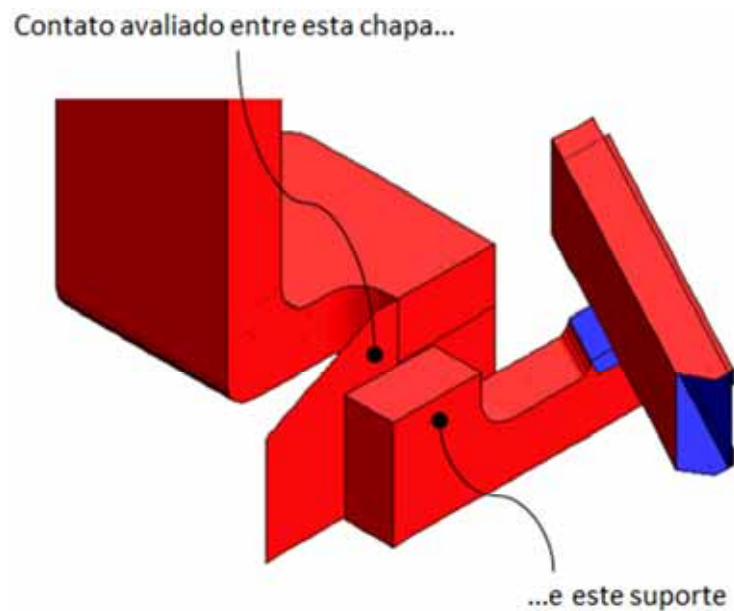


Fonte: (do próprio autor).

Como pode ser visualizado na Figura 22, no suporte de gaveta são considerados CPDOF's na direção vertical, em apenas alguns pontos. Esta aproximação é válida para qualquer carregamento imposta a estrutura, uma vez que na prática não há deslocamento relativo entre a tampa e o suporte de gaveta.

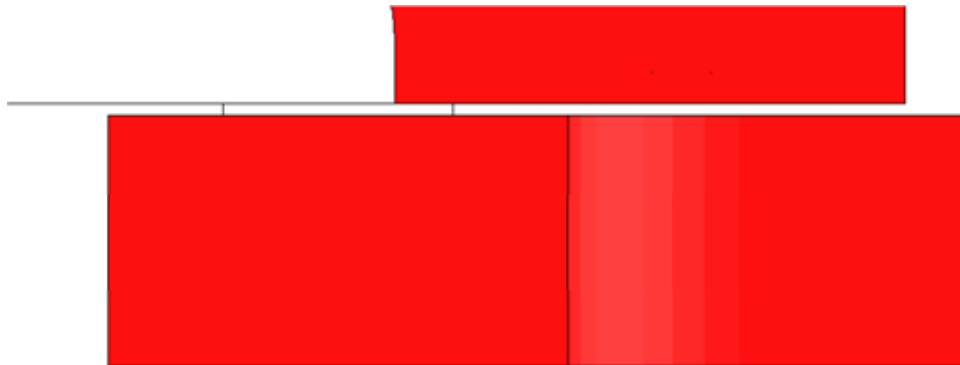
Já em relação ao contato existente entre o corpo primário e o corpo secundário (Figuras 23 e 24), foi feito um estudo do comportamento que há entre um componente e o outro (em termos de deslocamento). Inicialmente foram processadas as análises sem os CPDOF's, e após verificou-se o deslocamento relativo que há entre um nó e outro.

Figura 23 – Indicação dos componentes em contato



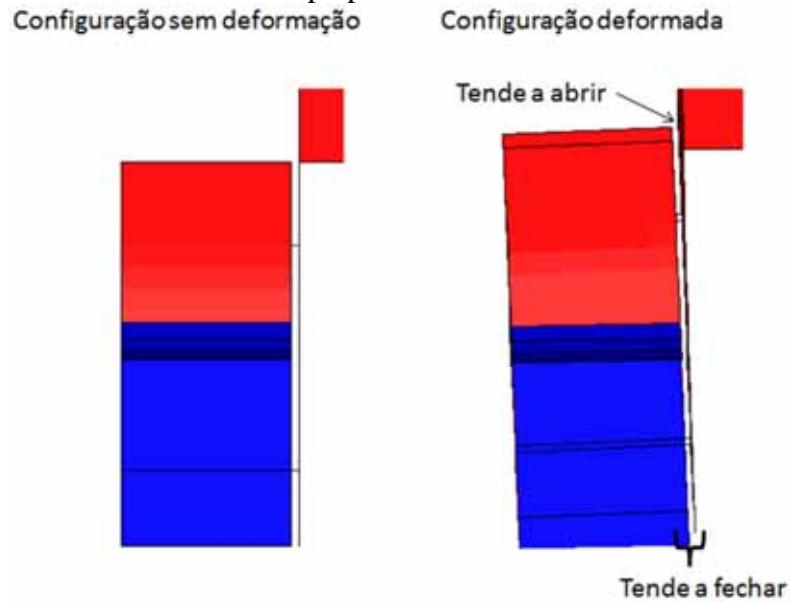
Fonte: (do próprio autor).

Figura 24 – Vista superior da região onde ocorre o contato



Fonte: (do próprio autor).

Figura 25 – Comparativo entre a configuração não deformada (esquerda) e deformada (direita) – Região de contato entre o corpo primário e o secundário

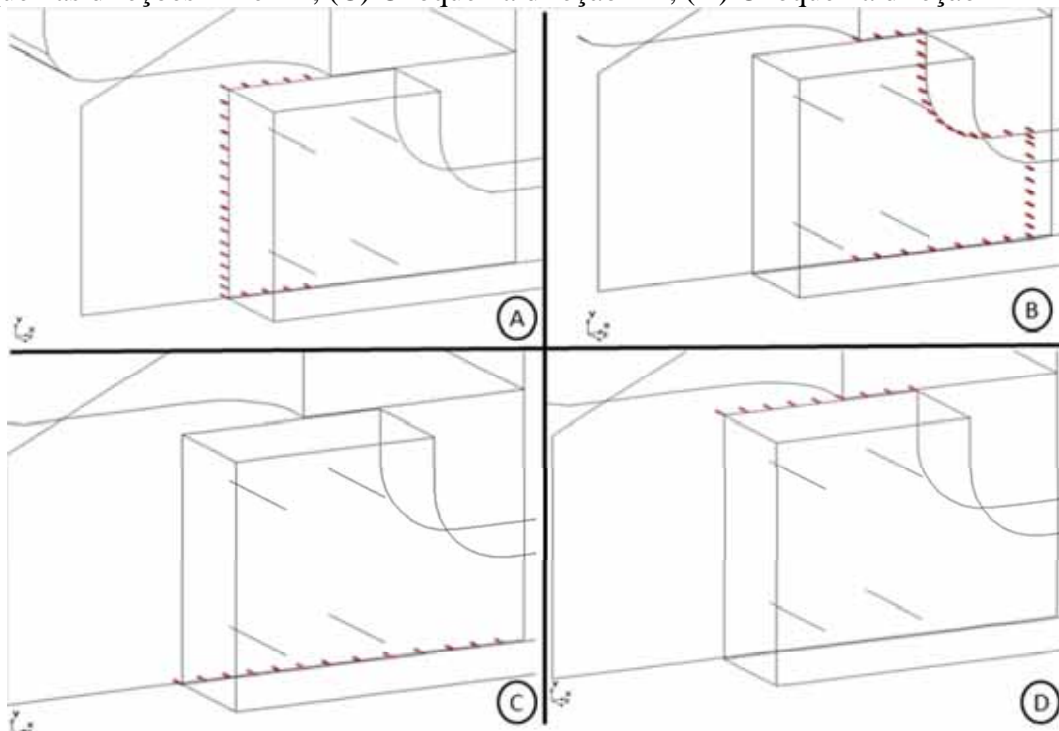


Fonte: (do próprio autor).

A Figura 25 exemplifica como são verificados os deslocamentos relativos entre as chapas, onde apenas nas regiões que tendem a fechar são inseridos CPDOF's.

A Figura 26 ilustra os CPDOF's inseridos nos modelos, para todos os carregamentos de choque considerados na norma IEC 61373.

Figura 26 – CPDOF's considerados nas análises: (A) Choque nas direções +X e -Z; (B) Choque nas direções -X e +Z; (C) Choque na direção +Y; (D) Choque na direção -Y



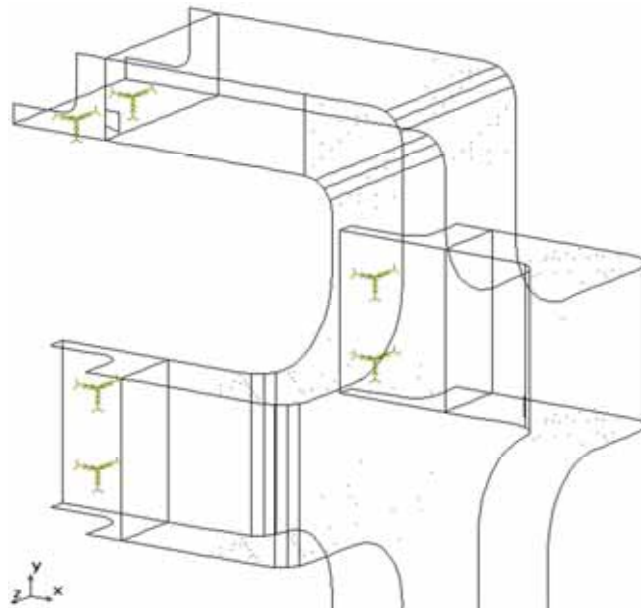
Fonte: (do próprio autor).

Nas situações A, B, C e D estão os choques nas direções (+X e -Z), (-X e +Z), +Y, -Y, respectivamente. Lembrando que a direção X é paralela ao trilho, direção Y é perpendicular ao plano do solo e a direção Z é perpendicular ao trilho.

Para os carregamentos randômicos (teste funcional e de vida útil) não é adotado esta concepção de inserir CPDOF's nas regiões que tendem a fechar, pois não há um movimento relativo evidente entre as chapas e, além disto, esta avaliação não contribui para os resultados das análises, uma vez que as tensões encontradas não tem grande influência devido a este deslocamento relativo, diferentemente do que ocorre na análise de choque que é de fundamental importância esta avaliação.

Por último, as condições de contorno consideradas (Figura 27) são restrições rotacionais e translacionais nos pontos de fixação do suporte a estrutura do trem.

Figura 27 – Condições de contorno



Fonte: (do próprio autor).

3.2.2 Análise randômica

As análises randômicas são referentes aos testes funcionais e de vida útil. Basicamente estes dois testes diferem quanto à intensidade dos níveis ASD encontrados na norma IEC 61373. Os passos a seguir demonstram como são realizadas as análises:

1º) Análise estática: É elaborada uma análise estática com o intuito de contemplar as tensões devido ao peso próprio da estrutura (considerar gravidade (g) igual à $9,81 \text{ m/s}^2$);

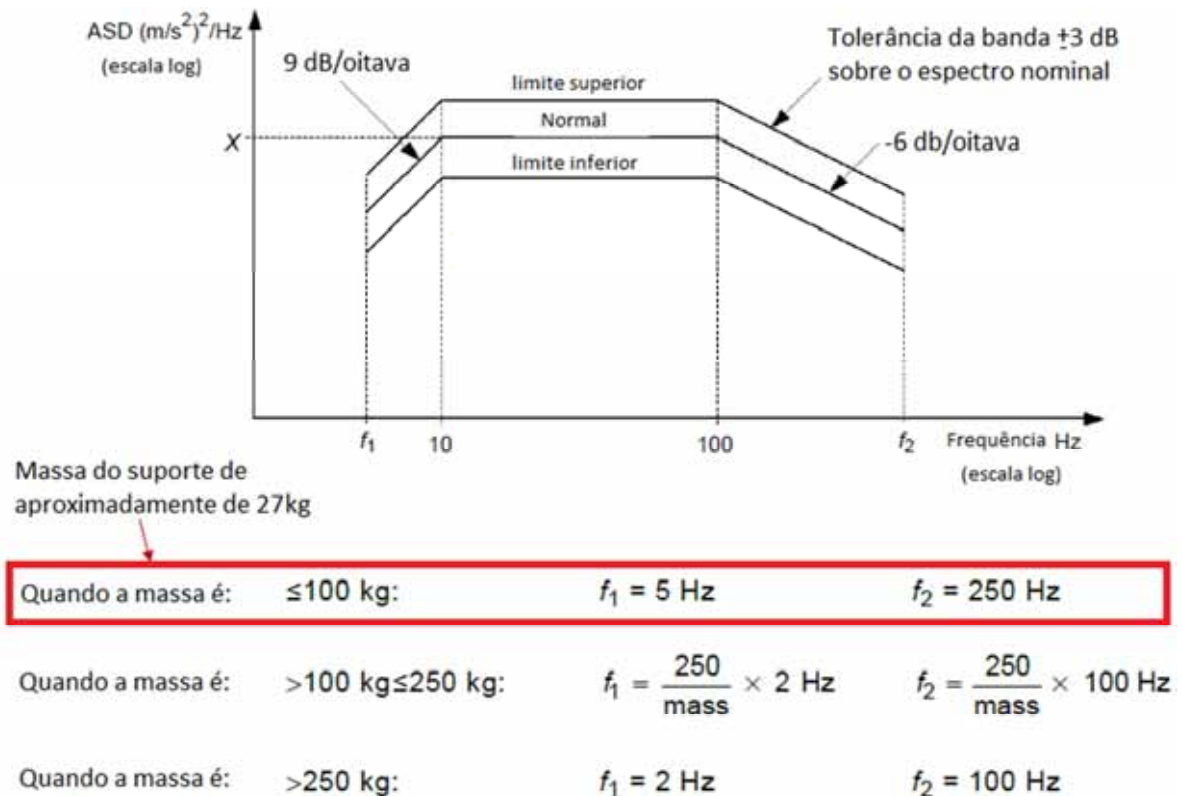
2º) Análise modal: Na análise modal são obtidos os modos de vibração (incluindo as frequências naturais) com as respectivas participações de massa. É requisitado ao software que calcule os duzentos primeiros modos de frequência, desta forma obtemos participações de massa superiores a 90% em todas as direções;

3º) Análise randômica: Neste passo é feito uma análise de superposição onde são utilizados os dados obtidos na análise modal. Para a análise randômica são determinadas as curvas ASD (densidade espectral de aceleração) de acordo com os dados fornecidos pela norma, para ambos os carregamento (teste funcional e teste de vida útil). As curvas ASD estão descritas no item a seguir.

3.2.2.1 Definição das curvas ASD

Para a obtenção das curvas ASD são necessários dois parâmetros. O primeiro é a qual grupo de classificação pertence o componente ferroviário, que neste caso como descrito anteriormente pertence ao grupo que está fixado acima do truque. O segundo parâmetro se refere à massa do equipamento (aproximadamente 27 kg). Nas figuras 28 e 29, estão a curva ASD e seus respectivos valores para o grupo de equipamentos fixados acima dos truques.

Figura 28 – Curva ASD para equipamentos fixados acima do truque



Fonte: (Adaptado da Norma IEC 61373, 2010).

Figura 29 – Valores da curva ASD para equipamentos fixados acima do truque

	Vertical	Transversal	Longitudinal
Teste aleatório funcional, nível ASD $(m/s^2)^2/Hz$	0,19	0,144	0,0414
Teste de vida útil, nível ASD $(m/s^2)^2/Hz$	6,12	4,62	1,32

Fonte: (Adaptado da Norma IEC 61373, 2010).

A massa do suporte é de aproximadamente 27kg. Desta forma, temos os seguintes pares ordenados pertencentes à curva ASD:

Tabela 1 - Pares ordenados da curva ASD

Eixo X (frequência) [Hz]	Eixo Y (nível ASD) [(m/s ²) ² /Hz]
f1=5Hz	ASD1
10	X
100	X
f2=250Hz	ASD2

Os valores “X” ilustrados na Tabela 1 são determinados pela norma IEC e podem ser visualizados na Figura 29. Nesta figura estão todos os valores atribuídos a “X”, para ambos os testes e para as três direções, como por exemplo, para o teste funcional na direção vertical o nível ASD é igual a 0,190 (m/s²)²/Hz.

Por último, são determinados os valores de ASD1 e ASD2, que se referem aos níveis ASD para o início e fim da curva. Estes valores são calculados a partir das inclinações das curvas que podem ser visualizadas na Figura 28, onde são iguais à 9db/oitava para o trecho da curva entre 5 à 10Hz e -6db/oitava para o trecho entre 100 à 250Hz.

3.2.2.2 Cálculo de ADS1 e ASD2

Os níveis de densidade espectral de aceleração são calculados pela seguinte equação:

$$\frac{ASD_h}{ASD_l} = \left(\frac{f_h}{f_l}\right)^{\frac{m}{3,01}} \quad (9)$$

Onde:

ASD_h: maior valor de ASD [(m/s²)²/Hz];

ASD_l: menor valor de ASD [(m/s²)²/Hz];

f_h: valor de frequência no ponto de maior nível ASD [Hz];

f_l: valor de frequência no ponto de menor nível ASD [Hz];

m: medida de dB/oitava relativa ao trecho da curva em questão [dB/oitava].

Os cálculos a seguir exemplificam como é procedido para a determinação de todas as curvas ASD, tanto para as três direções quanto para ambos os testes verificados.

Exemplo: Cálculo dos níveis ASD para o teste funcional na direção vertical

Tabela 2 - Dados da curva ASD para direção vertical

<i>Eixo X (frequência)</i> [Hz]	<i>Eixo Y (nível ASD)</i> [(m/s ²) ² /Hz]
$f1=5\text{Hz}$	$ASD1 = ?$
10	$X = 0,190$
100	$X = 0,190$
$f2=250\text{Hz}$	$ASD2 = ?$

- Para o trecho entre 5 à 10Hz:

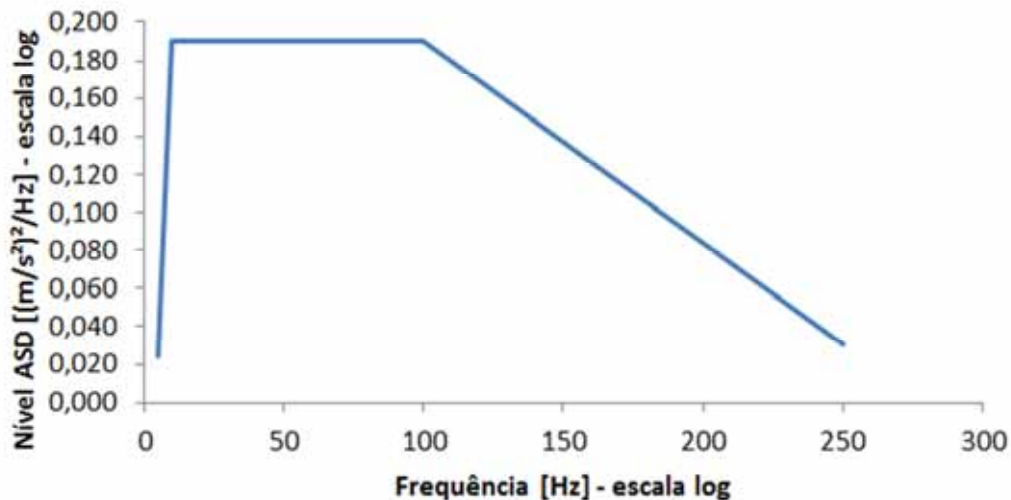
$$\frac{ASD_h}{ASD_l} = \left(\frac{f_h}{f_l}\right)^{\frac{m}{3,01}} \rightarrow \frac{0,190}{ASD_l} = \left(\frac{10}{5}\right)^{\frac{9}{3,01}} \rightarrow ASD_l = 0,024 \left(\frac{m}{s^2}\right)^2 / \text{Hz}$$

- Para o trecho entre 100 à 250Hz:

$$\frac{ASD_h}{ASD_l} = \left(\frac{f_h}{f_l}\right)^{\frac{m}{3,01}} \rightarrow \frac{0,190}{ASD_l} = \left(\frac{100}{250}\right)^{\frac{-6}{3,01}} \rightarrow ASD_l = 0,031 \left(\frac{m}{s^2}\right)^2 / \text{Hz}$$

Assim, a curva obtida pode ser visualizada na Figura 30.

Figura 30 – Curva ASD para a direção vertical (Y)



Para as demais curvas ASD, os cálculos são análogos e os resultados podem ser visualizados nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 - Curva ASD para o teste funcional

Eixo X (frequência) [Hz]	Eixo Y (nível ASD) [(m/s ²) ² /Hz]	
	Direção transversal	Direção longitudinal
5	0,018	0,0052
10	0,144	0,0414
100	0,144	0,0414
250	0,023	0,0067

Tabela 4 - Curva ASD para o teste de vida útil

Eixo X (frequência) [Hz]	Eixo Y (nível ASD) [(m/s ²) ² /Hz]		
	Direção vertical	Direção transversal	Direção longitudinal
5	0,77	0,58	0,17
10	6,12	4,62	1,32
100	6,12	4,62	1,32
250	0,99	0,74	0,21

Após a realização da análise randômica para ambos os testes, temos:

4º) Combinação linear dos resultados: Para o carregamento randômico os valores de tensões e deslocamentos obtidos são multiplicados por 3,0 de forma a se garantir valores reais inferiores a 3,0xRMS com confiabilidade de 99,7%, ou seja, como na análise randômica são obtidos valores de tensões RMS deve-se multiplicar por 3,0 para cobrir uma probabilidade acima de 99,7% da curva gaussiana.

Finalmente são combinados linearmente os valores de tensões obtidos na análise randômica (multiplicado por 3,0) com as tensões obtidas na análise estática.

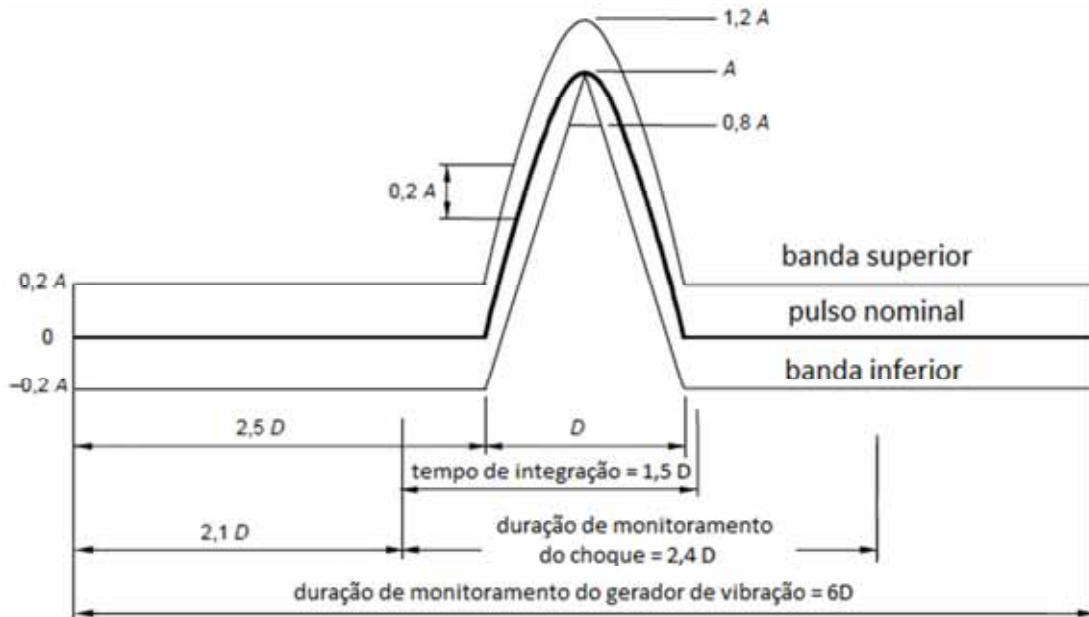
3.2.3 Análise de choque

Para a elaboração da análise de choque são repetidos os passos 1 e 2 descritos na análise randômica. Após a elaboração da análise estática (passo 1) e da análise modal (passo 2) é realizada a análise de choque, como descrito a seguir:

3º Passo: Análise de choque.

A análise de choque também é uma superposição na qual utiliza os valores encontrados na modal. Para esta análise é determinada a curva de choque segundo os parâmetros especificados pela norma IEC 61373, que são duração do período de choque e o pico de aceleração.

Figura 31 – Curva de choque para componentes fixados acima do truque



Categoria	Orientação	Pico de aceleração A m/s ²	Duração nominal D ms
1	Vertical	30	30
Classe A e B montado sobre o corpo do trem	Transversal	30	30
	Longitudinal	50	30
2	Todas as direções	300	18
Montado sobre o truque			
Montado no eixo	Todas as direções	1000	6

Fonte: (Adaptado da Norma IEC 61373, 2010)

A Figura 31 ilustra a curva de choque, o período de duração nominal do choque (D) e o pico de aceleração (A). Pode se verificar nesta imagem também que existe um período 2,5D antes e depois do choque com aceleração nula e também que esta curva de aceleração deve ser aplicada para todas as três direções. Para a categoria do suporte de pastilha (fixado acima do

truque), o período nominal de duração D e o pico de aceleração A , são respectivamente 18 milissegundos e 300 m/s^2 .

Para a representação da curva de choque (período entre $2,5D$ a $3,5D$) é utilizado uma função Senoidal, de acordo com a equação apresentada a seguir:

$$A = 300 \text{ m/s}^2 \times \text{sen}\left(\frac{\pi \times t}{T}\right) \quad (10)$$

Onde:

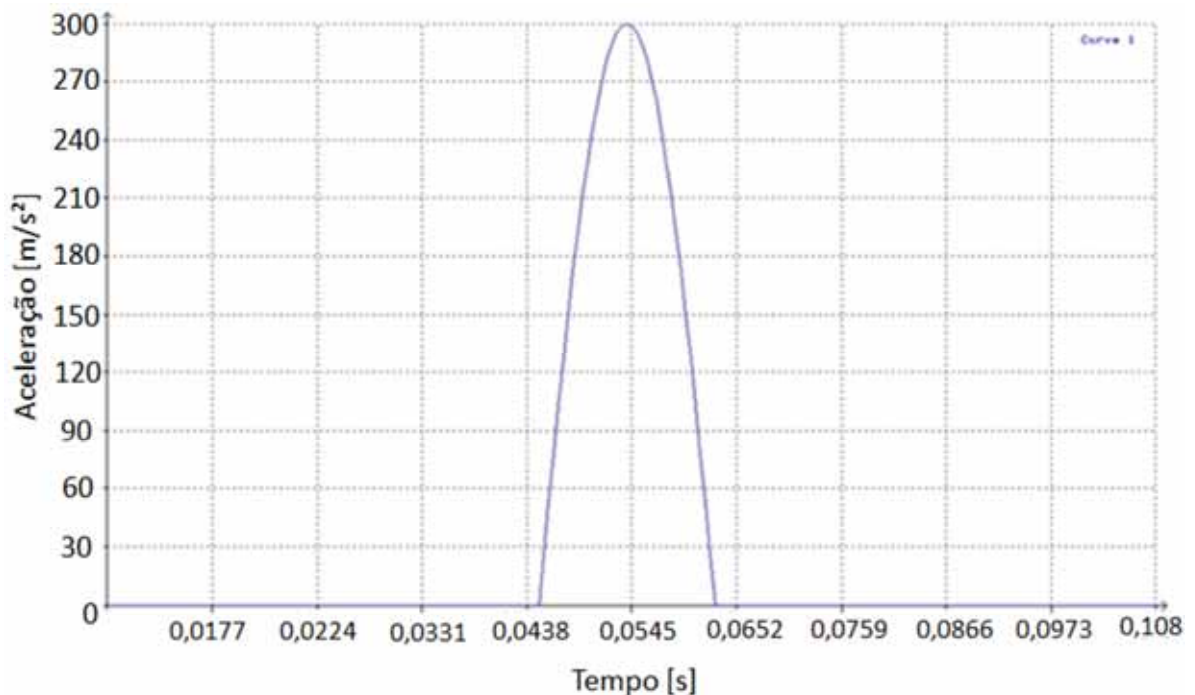
A: aceleração [m/s^2];

t: instante de tempo utilizado na descrição da curva de choque, step [s];

T: período total do choque [s];

Para a curva senoidal são utilizados 36 pontos para descrevê-la, ou seja, como o período de choque é 18 ms existe um ponto a cada 0,5 ms. A Figura 32 ilustra a curva utilizada:

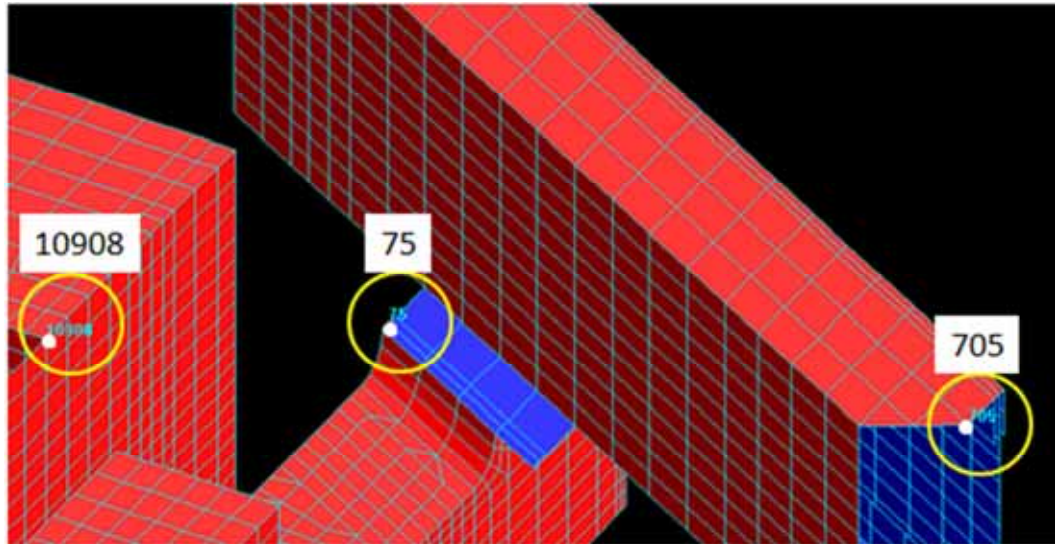
Figura 32 – Curva de choque utilizada na análise estrutural



Outro ponto importante na análise de choque é que devem ser selecionados alguns nós da estrutura que a representem de maneira significativa, ou seja, selecionar nós em regiões

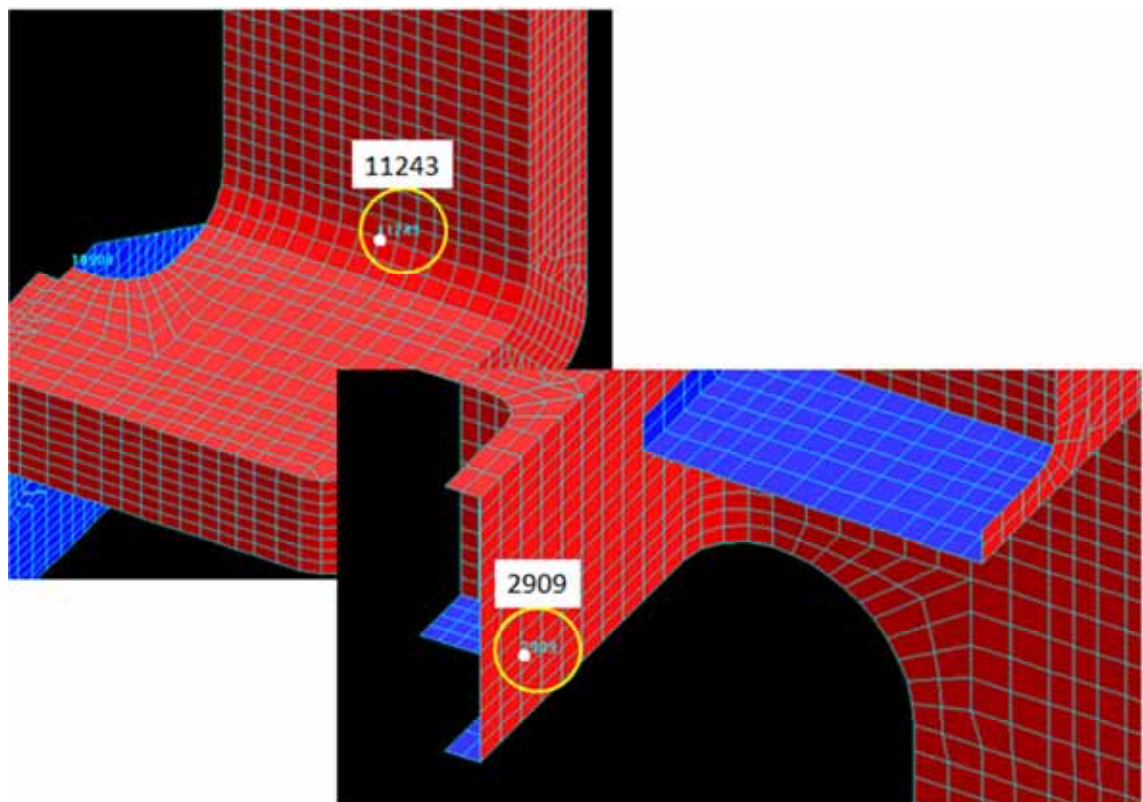
que provavelmente apresentem tensões ou deslocamentos significativos, e nós com condições de contorno para verificar a aplicação do carregamento. Os nós selecionados são: 75, 705, 2909, 10908 e 11243. As Figuras 33 e 34 ilustram estes nós.

Figura 33 – Nós de resposta da análise de choque



Fonte: (do próprio autor).

Figura 34 – Nós de resposta da análise de choque



Fonte: (do próprio autor).

Para os nós selecionados são obtidos os máximos deslocamentos da estrutura levando em consideração todo o período da análise de choque. Nos steps com os máximos deslocamentos são calculadas as tensões (para as três direções: vertical, longitudinal e transversal).

Após a realização da análise de choque, temos:

4º) Combinação linear dos resultados: São combinados linearmente os valores de tensões obtidos na análise de choque com as tensões obtidas na análise estática.

3.3 FORMA DA ANÁLISE DO RESULTADO

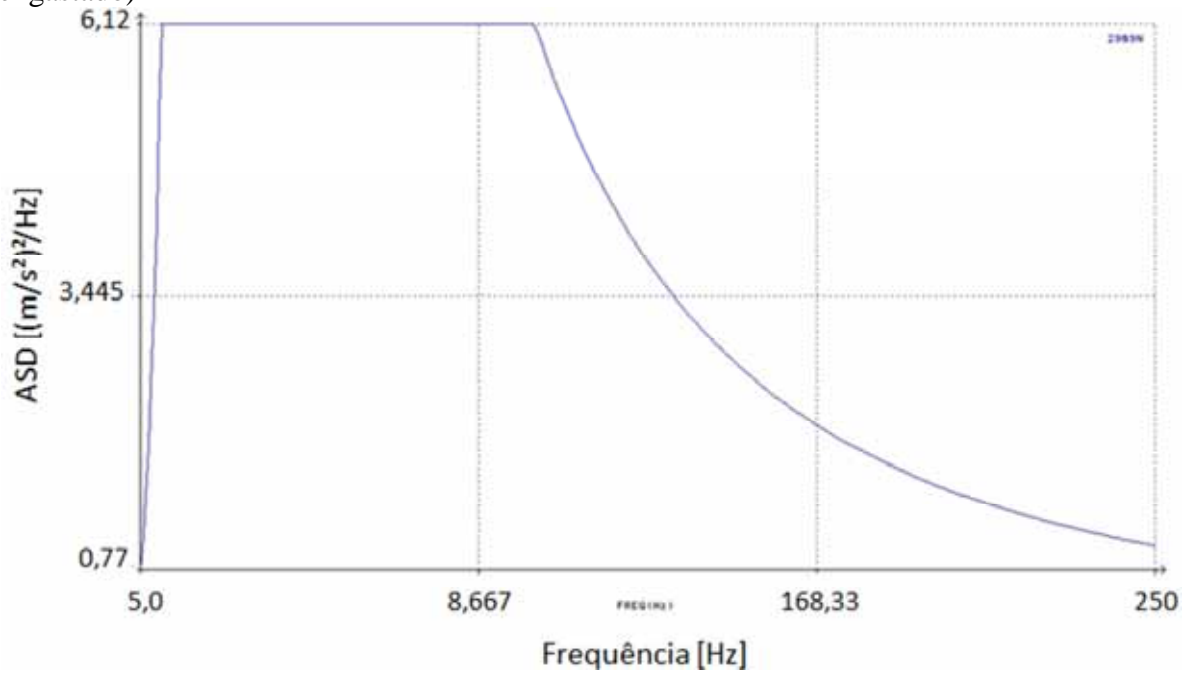
3.3.1 Análise estática

Na análise estática é verificado o somatório das reações de apoio da estrutura e comparadas com o valor teórico, neste caso a reação esperada é igual ao peso ($m \cdot g$, m =massa e g =aceleração da gravidade). Após é verificado se a configuração deformada (em escala aumentada) condiz com a atuação do peso próprio. Como são obtidos pequenos deslocamentos, a avaliação estática linear é válida.

3.3.2 Análise randômica

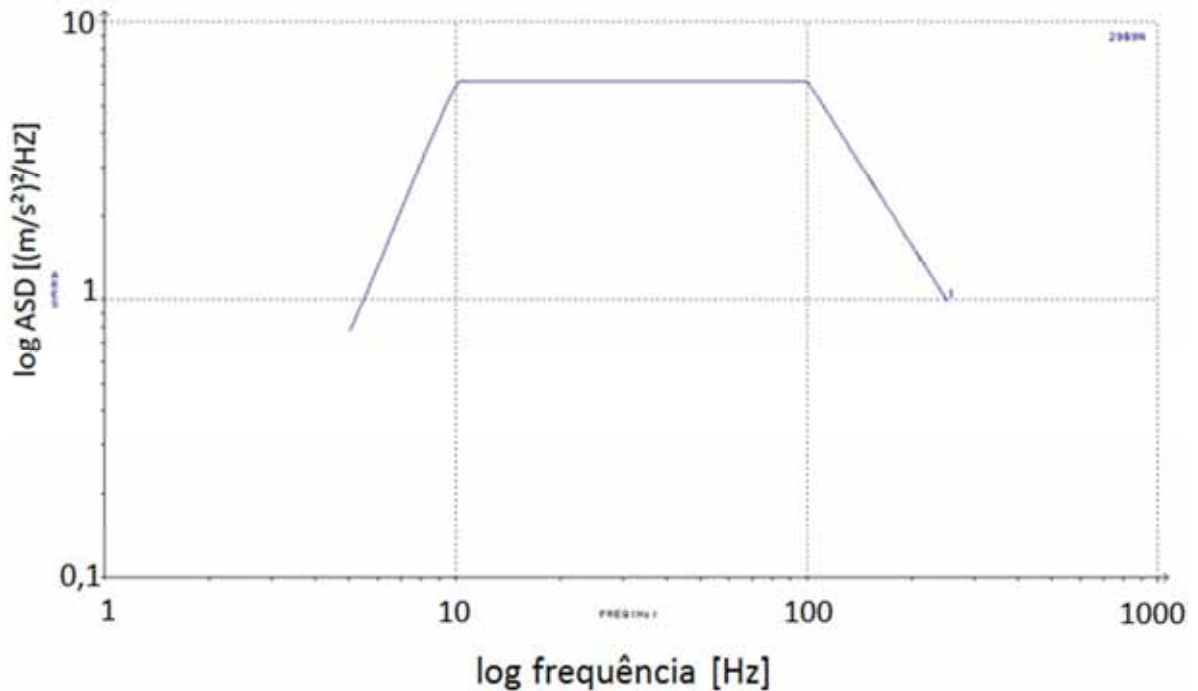
Nas análises randômicas são verificadas as curvas de resposta do pós-processamento para os nós com condições de contorno (neste caso são os nós engastados). Os resultados destas curvas devem ser as mesmas do pré-processamento, ou seja, as curvas de resposta são as curvas ASD. As Figuras 35 e 36 ilustram a curva de resposta de um nó engastado na análise randômica.

Figura 35 – Curva de resposta randômica – Teste de vida útil (direção Y) – Nó 2909 (engastado)



Fonte: (do próprio autor).

Figura 36 – Curva de resposta randômica (dilog) – Teste de vida útil (direção Y) – Nó 2909 (engastado)



Fonte: (do próprio autor).

As curvas das Figuras 35 e 36 representam as repostas randômicas com escalas (X e Y) linearizadas e logarítmicas, respectivamente. Ambas as curvas correspondem ao nó 2909 que

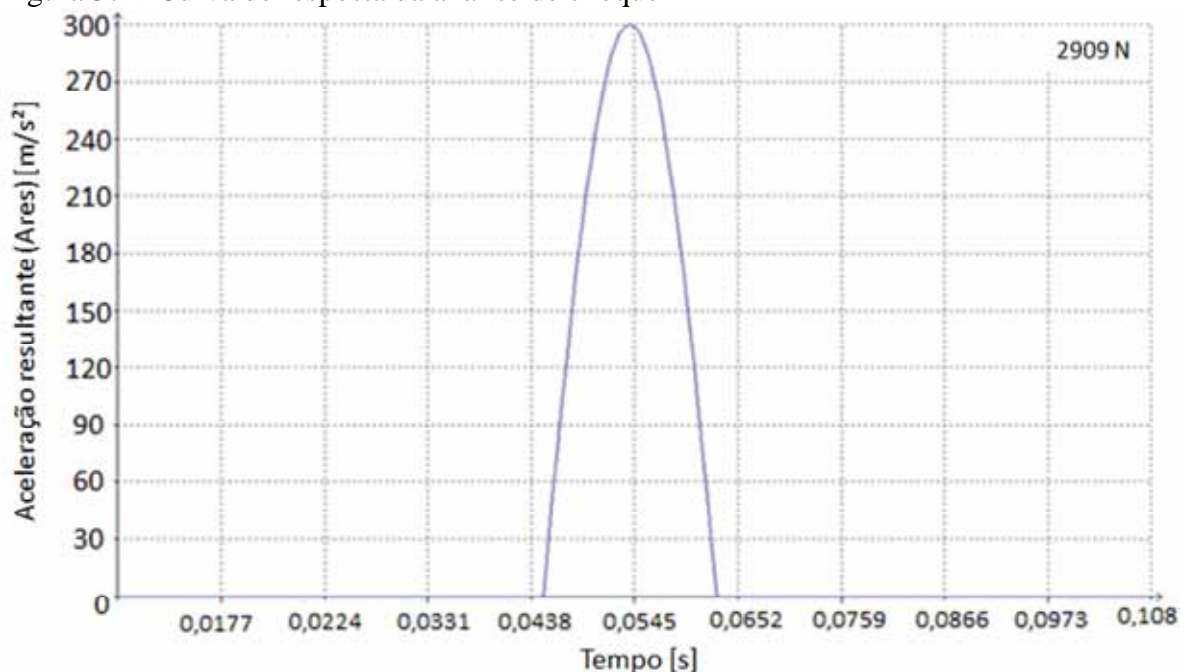
está engastado. Assim a mesma curva randômica solicitada pela norma IEC 61373 para a aplicação do carregamento podemos visualizar no output do programa.

3.3.3 Análise de choque

De forma semelhante procedida na análise randômica, na análise de choque podemos verificar os carregamentos aplicados segundo as curvas de respostas dos nós engastados.

A Figura 37 ilustra a curva de resposta da análise de choque. Desta forma é possível verificar se a aceleração imposta à estrutura está condizente com o esperado.

Figura 37 – Curva de resposta da análise de choque

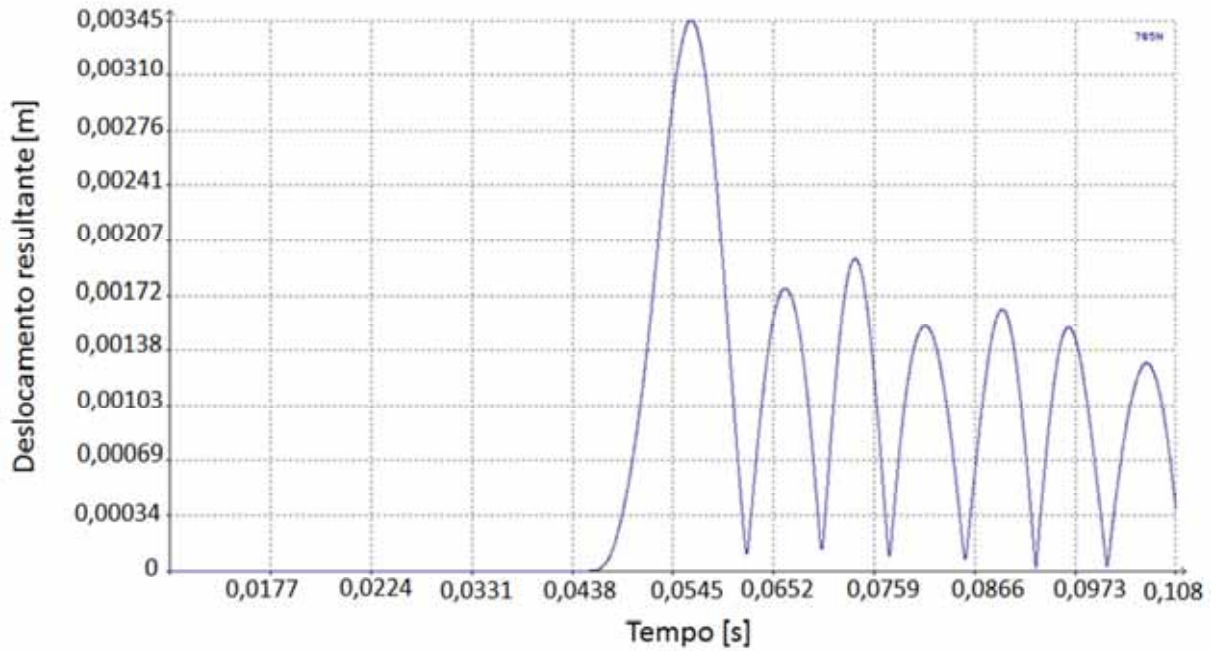


Fonte: (do próprio autor).

Contudo, além da verificação da aceleração, também são verificados os deslocamentos nodais em alguns pontos da estrutura (como já mencionado na metodologia). É necessário realizar esta verificação, porque o software solicita ao usuário quais devem ser os steps (instantes de tempo) a serem plotados, ou seja, em qual instante de tempo serão visualizadas as tensões.

Na Figura 38 é possível observar o deslocamento corresponde ao nó 705 (indicado na metodologia), na análise de choque na direção +X. Pode-se verificar que após o pico aceleração temos o maior deslocamento do nó (tempo = 55,92 ms), portanto a maior tensão para este nó se encontra neste instante de tempo.

Figura 38 – Deslocamento do nó 705 ao longo da análise de choque



Fonte: (do próprio autor).

3.3.4 Análise das tensões obtidas

São obtidas tensões nodais para comparação com os admissíveis considerados. Desta forma, é possível visualizar concentrações de tensões em pontos importantes da estrutura.

Para a interface dos elementos de casca com os elementos de beam, em geral, não são considerados as tensões obtidas, pois esta interface está modelada de modo simplificado. Então, para a avaliação desta região será utilizado à norma NBR8800 que prevê esmagamento de olhais e esforços admissíveis nos parafusos (parafusos correspondem aos elementos de beam).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados das análises estruturais, bem como as discussões que devem ser feitas acerca destes. Serão calculadas as margens de segurança, as tensões admissíveis, os esforços nos parafusos, as tensões de esmagamento nos olhais e as tensões nas soldas.

4.1 ANÁLISE ESTÁTICA

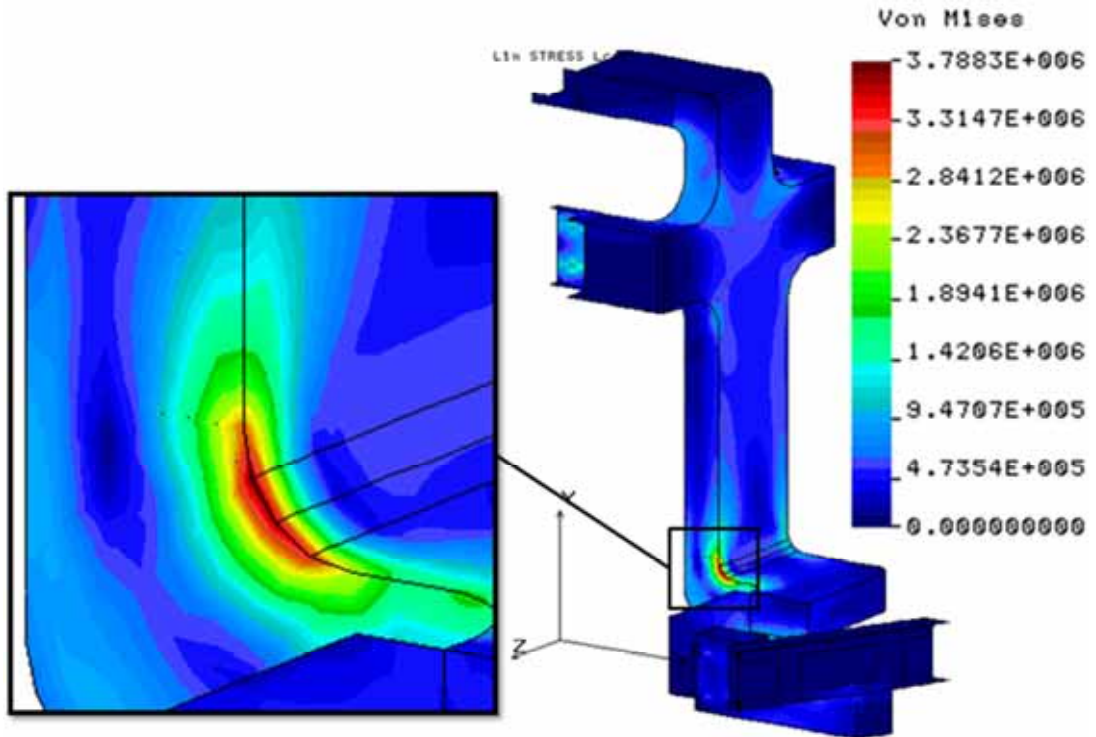
Os resultados obtidos na análise estática, que contempla a ação do peso próprio, podem ser visualizados na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados obtidos na análise estática

Caso de carga	Tensões (von Mises) máximas atuantes no modelo [MPa]	Deslocamento máximo resultante [mm]
Peso próprio da estrutura	3,7	0,05

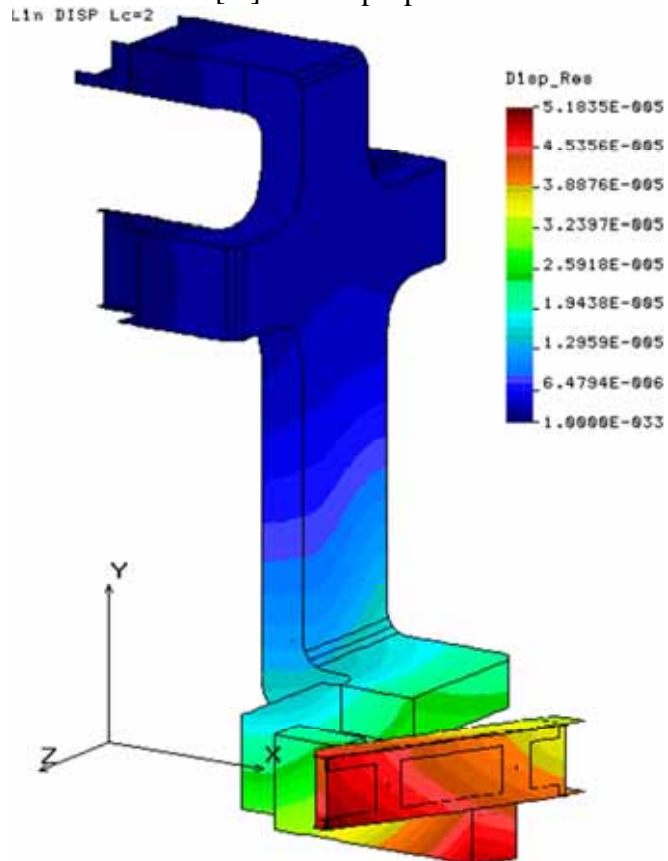
A Figura 39 ilustra os resultados de tensões von Mises obtido na análise estrutural, enquanto a Figura 40 ilustra o deslocamento resultante obtido.

Figura 39 – Tensões (von Mises) [Pa] – Peso próprio da estrutura - Detalhe



Fonte: (do próprio autor).

Figura 40 – Deslocamento resultante [m] – Peso próprio da estrutura



Fonte: (do próprio autor).

4.2 ANÁLISE DE CHOQUE

Os resultados encontrados nas análises de choque podem ser visualizados na Tabela 6. Nesta tabela estão combinados linearmente os resultados da análise de choque e da análise estática.

O cálculo utilizado para determinação da margem de segurança pode ser visualizado pela equação 11. A tensão admissível, também listado na tabela, corresponde a 80% da tensão de escoamento (caso de carga eventual, segundo norma AISC).

$$M.S. = \left(\frac{\sigma_{adm} - \sigma_{m\acute{a}x}}{\sigma_{adm}} \right) \times 100 \quad (11)$$

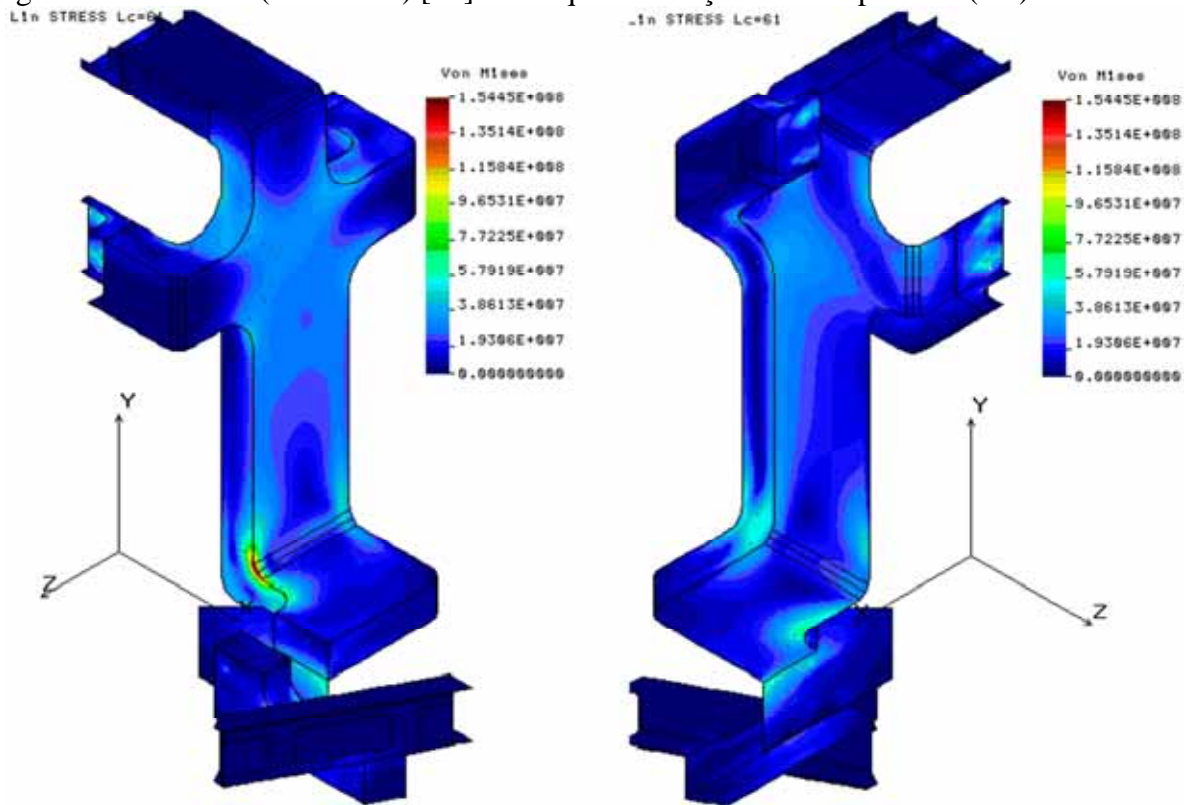
Tabela 6 - Tensões (von Mises) [MPa] máximas encontradas nas análises de choque

Direção e sentido da carga de choque	Tensão de escoamento [MPa]	Tensão admissível [MPa]	Tensão (von Mises) máxima atuante [MPa]	Margem de segurança (M.S.) [%]	Instante de tempo da ocorrência da máxima tensão [ms]
Longitudinal negativo (-X)	200,0	160,0	113,8	28,9	55,83
Longitudinal positivo (+X)	200,0	160,0	123,6	22,8	55,92
Vertical negativo (-Y)	200,0	160,0	149,1	6,8	55,43
Vertical positivo (+Y)	200,0	160,0	154,4	3,5	55,49
Transversal negativo (-Z)	200,0	160,0	135,7	15,2	54,76
Transversal positivo (+Z)	200,0	160,0	146,3	8,6	54,13

Como pode ser visualizado na Tabela 10, a máxima tensão de von Mises encontrada nas análises está situada no caso de carga onde ocorre o choque na direção vertical positiva (+Y) com valor igual a 154,4 MPa. Desta forma, as tensões estão abaixo do admissível considerado que é de 160 MPa, de acordo com a norma AISC.

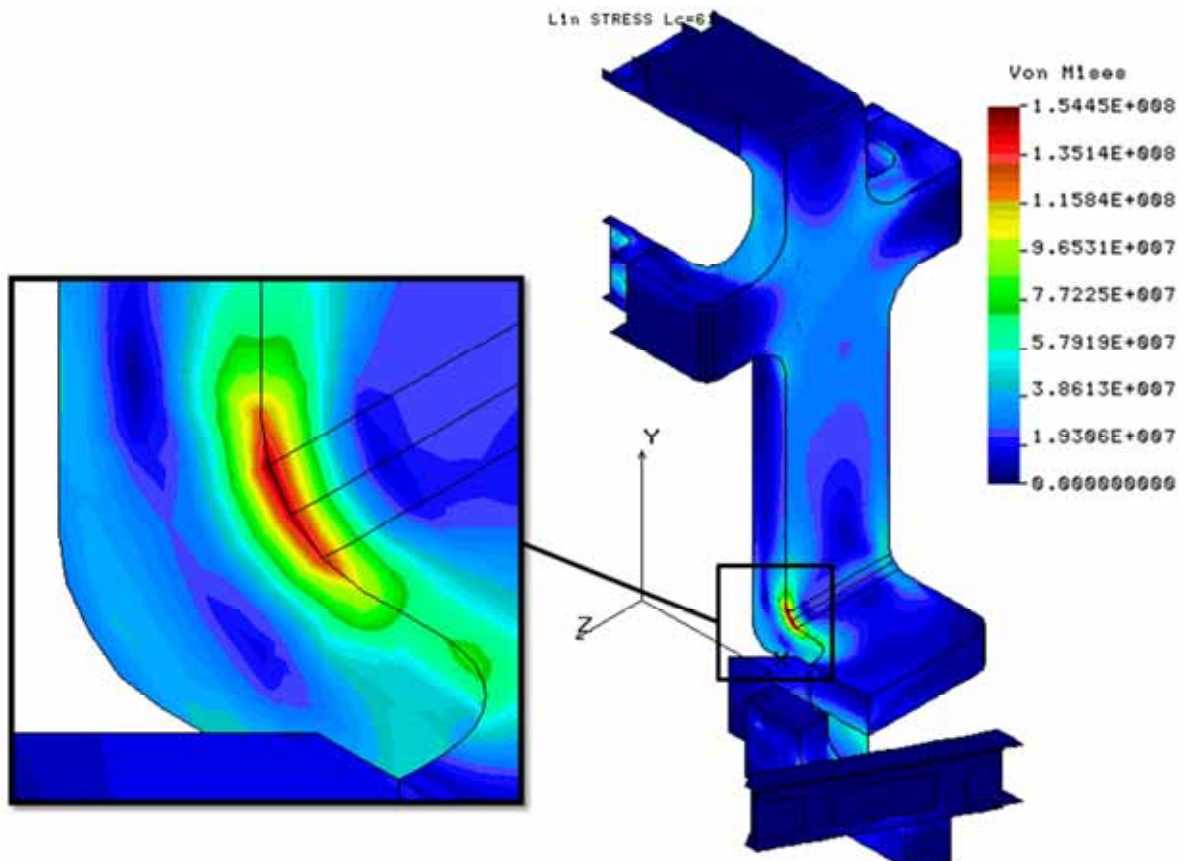
As Figuras 41 e 42 ilustram os resultados obtidos, assim como o detalhe das regiões onde foram identificadas as tensões máximas.

Figura 41 – Tensões (von Mises) [Pa] – Choque na direção vertical positiva (+Y)



Fonte: (do próprio autor).

Figura 42 – Tensões (von Mises) [Pa] – Choque na direção vertical positiva (+Y) – Detalhe da máxima tensão



Fonte: (do próprio autor).

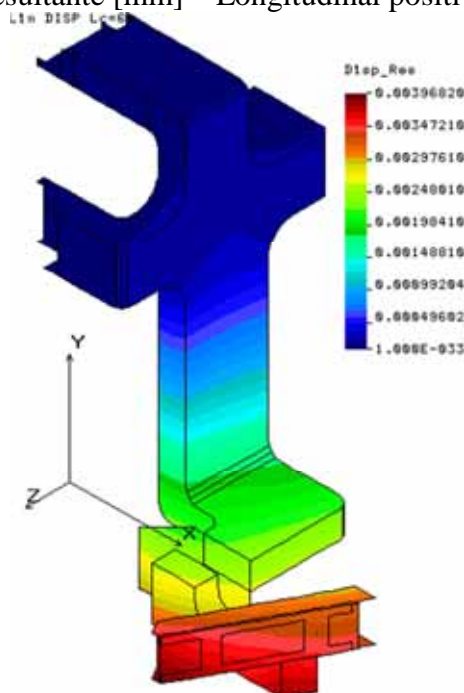
A Tabela 7 apresenta os resultados dos deslocamentos resultantes máximos para os casos de carga analisados.

Tabela 7 - Deslocamentos resultantes máximos [mm]

Direção e sentido da carga de choque	Deslocamento resultante [mm]
Longitudinal negativo (-X)	3,6
Longitudinal positivo (+X)	3,9
Vertical negativo (-Y)	2,2
Vertical positivo (+Y)	2,3
Transversal negativo (-Z)	3,0
Transversal positivo (+Z)	2,4

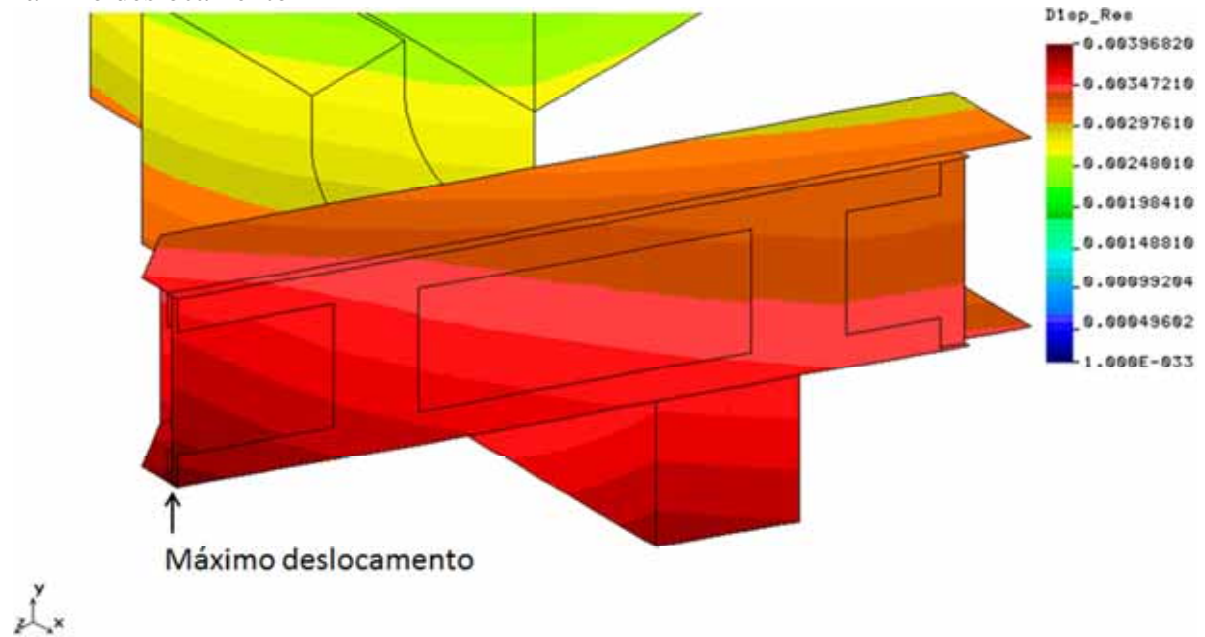
As Figuras 43 e 44 apresentam o caso de carga longitudinal positivo, no qual apresentou o maior deslocamento resultante.

Figura 43 – Deslocamento resultante [mm] – Longitudinal positivo (+X)



Fonte: (do próprio autor).

Figura 44 – Deslocamento resultante [mm] – Longitudinal positivo (+X) – Detalhe do máximo deslocamento

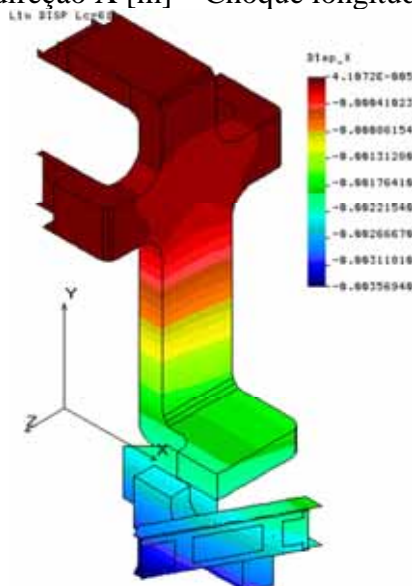


Fonte: (do próprio autor).

Na Figura 45 foi possível visualizar o máximo deslocamento resultante encontrado para a aplicação do choque na direção longitudinal positiva.

Como o deslocamento apresentado é a resultante das três direções, presume-se inicialmente que a máxima tensão obtida ocorreria nos casos de carga com o máximo deslocamento. No entanto, quando visualizamos o deslocamento do choque na direção X, verificamos que o valor máximo encontrado é próximo ao valor máximo resultante (Figura 45, máximo deslocamento igual à -3,56 mm).

Figura 45 – Deslocamento na direção X [m] – Choque longitudinal positivo (+X)



Fonte: (do próprio autor).

Assim, pode-se dizer que o deslocamento resultante é composto principalmente pelo valor do deslocamento direcional. Desta forma, como os deslocamentos na direção Y flexionam o corpo primário no sentido de menor inércia, pode-se justificar porque são encontradas máximas tensões para as acelerações verticais.

4.3 ANÁLISES RANDÔMICAS

Nas Tabelas 8 e 9 estão apresentados os resultados encontrados de tensões de von Mises para as análises estruturais, sob os carregamentos aleatório funcional e teste de vida útil, respectivamente. Os valores de tensão e deslocamento encontrados nos carregamentos randômicos são multiplicados por 3,0 e combinados linearmente com os valores encontrados na análise estática, a fim de se garantir valores inferiores a 99,7% da curva gaussiana (3 desvios padrões).

As margens de segurança são determinadas pela equação 11, da mesma forma que foi apresentado para a análise de choque. Além disto, as tensões admissíveis apresentadas estão de acordo com a norma ASIC, ou seja, para o teste aleatório funcional corresponde a 60% da tensão de escoamento (caso de carga convencional) e no teste de vida útil este valor é igual a 80% da tensão de escoamento (caso de carga eventual).

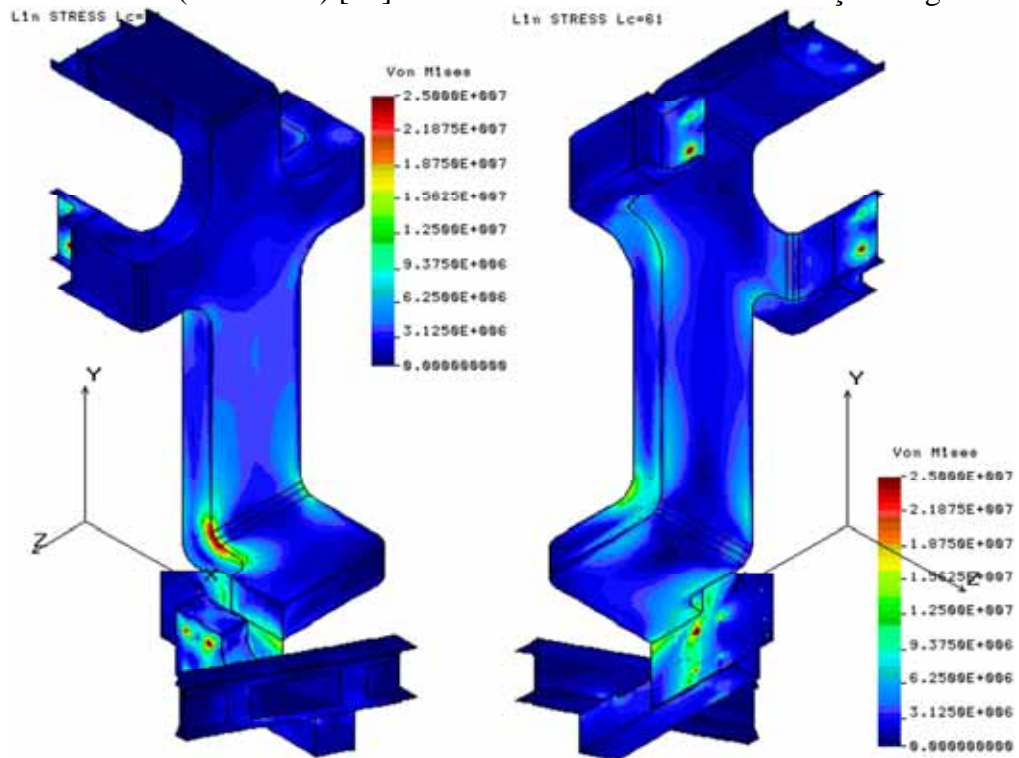
Tabela 8 - Tensões (von Mises) [MPa] máximas encontradas nas análises randômicas (teste aleatório funcional)

Caso de carga	Tensão de escoamento [MPa]	Tensão admissível [MPa]	Tensão (von Mises) máxima atuante [MPa]	Margem de segurança (M.S.) [%]
Longitudinal (X)	200,0	120,0	8,4	93,0
Vertical (Y)	200,0	120,0	14,7	87,8
Transversal (Z)	200,0	120,0	25,0	79,2

Tabela 9 - Tensões (von Mises) [MPa] máximas encontradas nas análises randômicas (teste de vida útil)

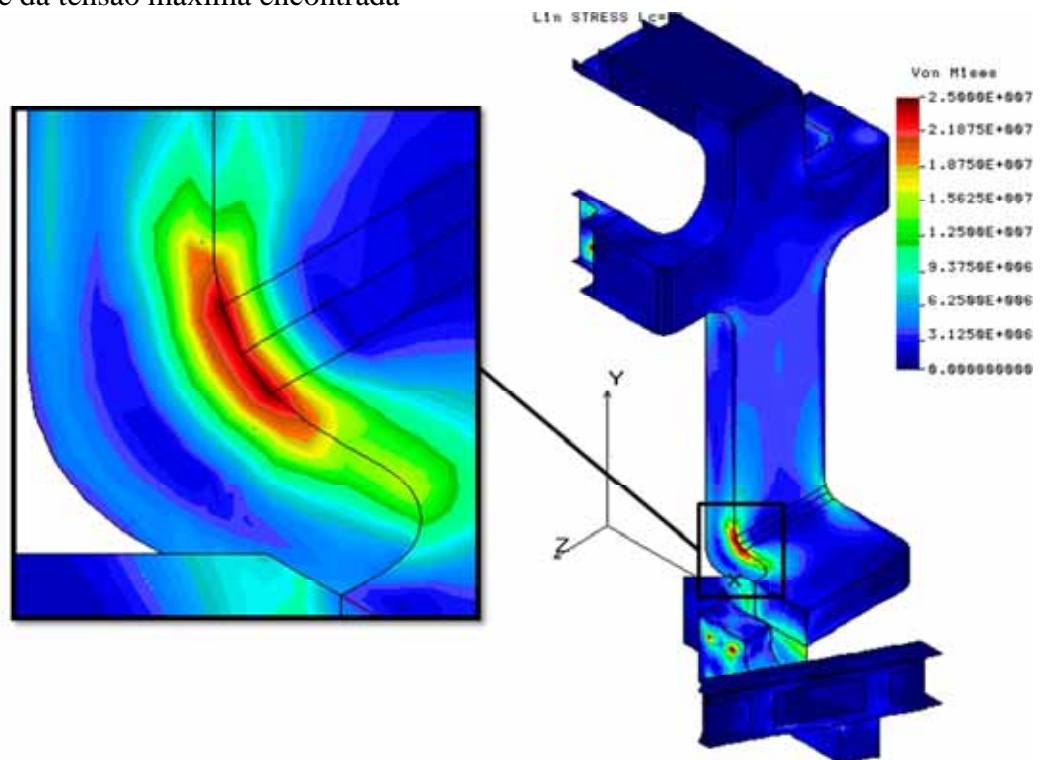
Caso de carga	Tensão de escoamento [MPa]	Tensão admissível [MPa]	Tensão (von Mises) máxima atuante [MPa]	Margem de segurança (M.S.) [%]
Longitudinal (X)	200,0	160,0	49,3	69,2
Vertical (Y)	200,0	160,0	75,9	52,6
Transversal (Z)	200,0	160,0	137,4	14,1

Figura 46 – Tensões (von Mises) [Pa] – Teste aleatório funcional – Direção longitudinal (X)



Fonte: (do próprio autor).

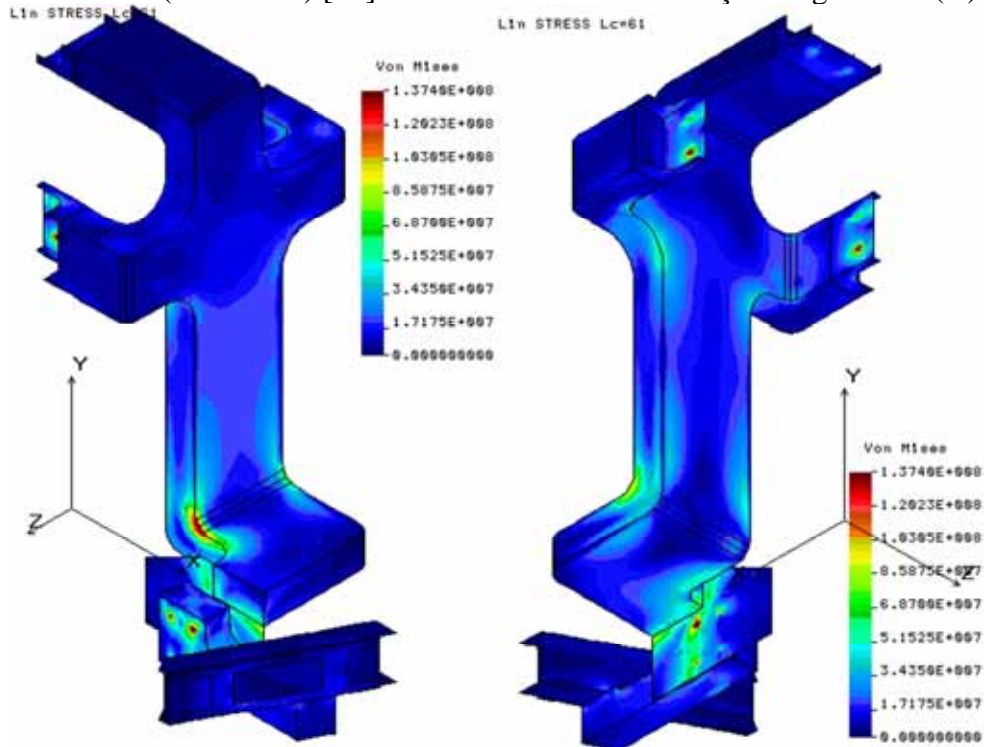
Figura 47 – Tensões (von Mises) [Pa] – Teste aleatório funcional – Direção longitudinal (X) – Detalhe da tensão máxima encontrada



Fonte: (do próprio autor).

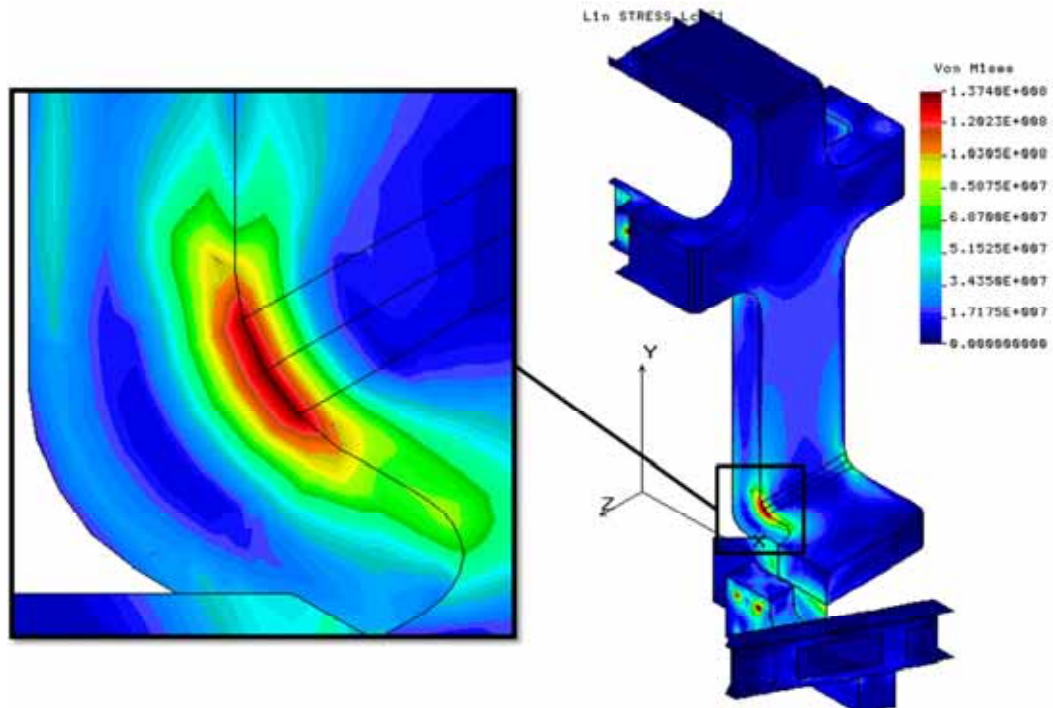
As Figuras 46 e 47 ilustram os resultados encontrados para o teste aleatório funcional. Como pode-se observar as tensões apresentadas nestes casos de carga são inferiores quando comparadas com os demais carregamentos apresentados.

Figura 48 – Tensões (von Mises) [Pa] – Teste de vida útil – Direção longitudinal (X)



Fonte: (do próprio autor).

Figura 49 – Tensões (von Mises) [Pa] – Teste de vida útil – Direção longitudinal (X) – Detalhe da tensão máxima encontrada



Fonte: (do próprio autor).

As Figuras 48 e 49 ilustram os resultados encontrados para o teste de vida útil. Como pode-se observar as tensões apresentadas nestes casos de carga são superiores quando comparadas com o teste aleatório funcional. Isto ocorre, pois os níveis ASD, conseqüentemente as acelerações RMS, são maiores para estes carregamentos, resultando assim em tensões maiores.

As Tabelas 10 e 11 apresentam os resultados de deslocamento resultante para os testes aleatórios e de vida útil.

Tabela 10 - Deslocamento resultante [mm] – Teste aleatório funcional

Caso de carga	Deslocamento resultante (1,0 x RMS) [mm]	Deslocamento resultante (3,0 x RMS + Peso próprio) [mm]
Longitudinal (X)	0,09	0,24
Vertical (Y)	0,11	0,28
Transversal (Z)	0,15	0,43

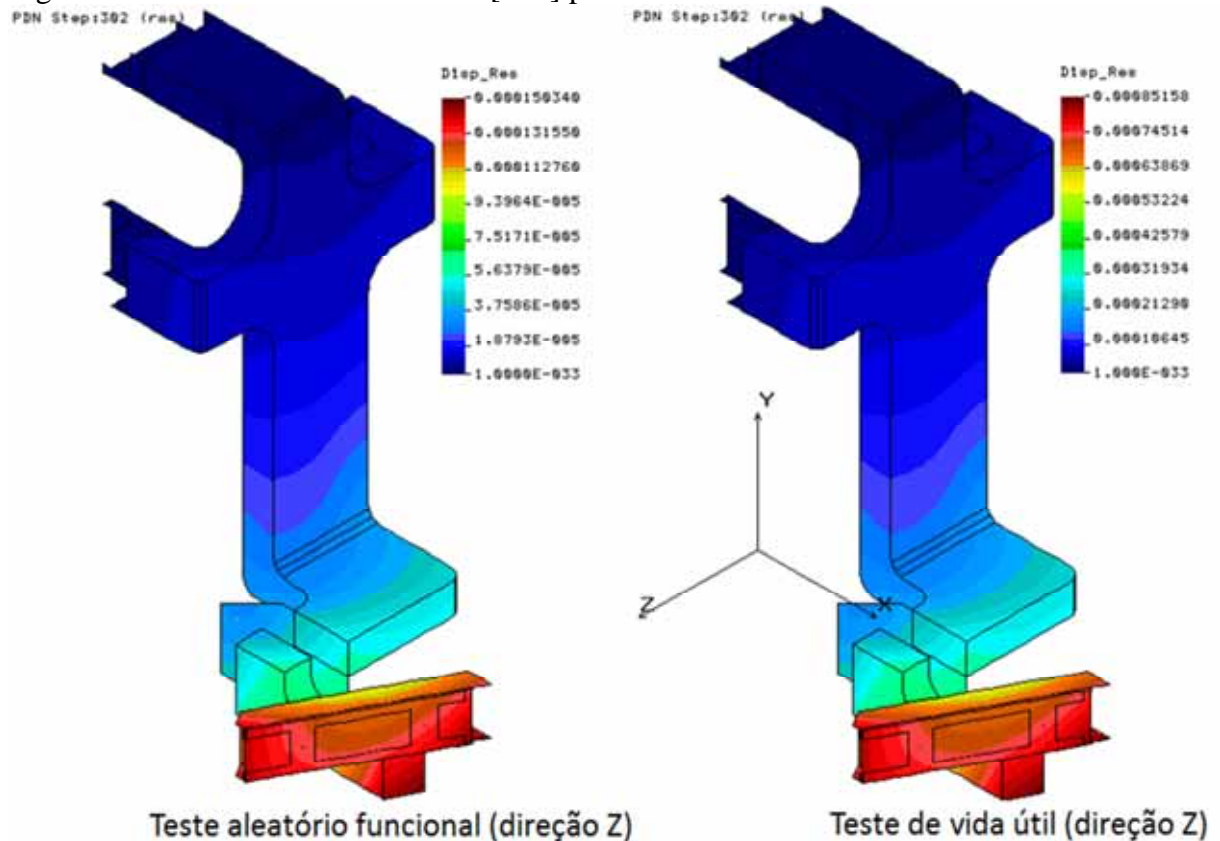
Tabela 11 - Deslocamento resultante [mm] – Teste de vida útil

Caso de carga	Deslocamento resultante (1,0 x RMS) [mm]	Deslocamento resultante (3,0 x RMS + Peso próprio) [mm]
Longitudinal (X)	0,53	1,56
Vertical (Y)	0,64	1,89
Transversal (Z)	0,85	2,53

Os deslocamentos apresentados nas Tabelas 10 e 11 são os valores RMS encontrados nas análises. Estes são multiplicados por três e somados com os resultados da análise estática (também ilustrados nas tabelas), para obtenção dos valores de deslocamento referentes às tensões máximas apresentadas anteriormente.

A Figura 50 ilustra os resultados obtidos (valor de 1,0 RMS) para a direção longitudinal em ambos os testes randômicos.

Figura 50 – Deslocamento resultante [mm] para ambos os testes randômicos



Fonte: (do próprio autor).

4.4 VERIFICAÇÃO DOS PARAFUSOS

Os parafusos da estrutura que ligam o corpo primário ao corpo secundário foram verificados de acordo com a norma NBR 8800. Os carregamentos considerados nas análises foram descritos através da norma como ações variáveis, sendo o teste aleatório funcional igual à combinações normais e os teste de vida útil e de choque como combinações excepcionais.

Os cálculos a seguir são obtidos da norma para determinação dos esforços resistentes, enquanto os esforços atuantes são obtidos do modelo de elementos finitos.

4.4.1 Cálculo da área resistente

A área resistente de cálculo representa um percentual da área da seção transversal do parafuso. As equações a seguir ilustram como é obtida a área efetiva do parafuso, de acordo com a norma NBR8800 seção 6.3.2.2.

$$A_b = \frac{\pi \times d_b^2}{4} \quad (12)$$

$$A_{be} = 0,75 \times A_b \quad (13)$$

Onde:

d_b : Diâmetro externo da rosca [mm];

A_b : Área bruta, baseada no diâmetro externo da rosca [mm];

A_{be} : Área resistente ou área efetiva do parafuso [mm].

4.4.2 Força de tração resistente

Para a determinação dos esforços de tração resistente dos parafusos é utilizada a equação a seguir, de acordo com a seção 6.3.3.1 da norma NBR 8800.

$$F_{t,Rd} = \frac{A_{be} \times f_{ub}}{\gamma_{a2}} \quad (14)$$

Onde:

f_{ub} : Resistência à ruptura do parafuso ou barra rosqueada à tração, especificada no Anexo A da norma NBR 8800 [MPa];

γ_{a2} : Coeficiente de ponderação da resistência à ruptura (seção 4.8.2.3 – pág. 23) [].

O valor de γ_{a2} é igual a 1,35 para casos convencionais (normais) e 1,15 para os casos eventuais (excepcionais).

4.4.3 Força de cisalhamento resistente

Para a determinação dos esforços de cisalhamento resistente dos parafusos é utilizado à equação a seguir, de acordo com a seção 6.3.3.2 da norma NBR 8800.

$$F_{v,Rd} = \frac{0,4 \times A_b \times f_{ub}}{\gamma_{a2}} \quad (15)$$

As variáveis envolvidas neste cálculo já foram descritas anteriormente.

4.4.4 Coeficiente de ponderação das ações (γ_g)

A norma NBR 8800 (página 18, tabela 1) menciona que os carregamentos devem ser multiplicados por coeficientes de ponderação das ações. Considerando que os carregamentos aplicados são ações variáveis, logo:

- Para o teste aleatório funcional (combinações normais): $\gamma_g = 1,50$
- Para o teste de vida útil e de choque (combinações excepcionais): $\gamma_g = 1,00$

4.4.5 Tração e cisalhamento combinados (R)

Como os esforços atuantes são combinados, ou seja, existe tanto esforços de tração quanto de cisalhamento, então determina-se a condição de esforços limite (seção 6.3.3.4 da norma NBR 8800). Esta condição limite é ilustrada na equação a seguir, e representa qual é o máximo esforço combinado que pode haver.

$$R = \left(\frac{F_{t,Sd}}{F_{t,Rd}} \right)^2 + \left(\frac{F_{v,Sd}}{F_{v,Rd}} \right)^2 \leq 1,0 \quad (16)$$

Onde:

$F_{t,Sd}$: Esforço de tração atuante [N];

$F_{t,Rd}$: Esforço de tração resistente [N];

$F_{v,sd}$: Esforço de cisalhamento atuante [N];

$F_{v,Rd}$: Esforço de cisalhamento resistente [N];

4.4.6 Cálculo da margem de segurança (M.S.)

O cálculo da margem de segurança pode ser visualizado pela equação a seguir:

$$M.S. = (1 - R) \times 100 \quad (17)$$

Onde:

R: esforço combinado [];

M.S.: Margem de segurança [%].

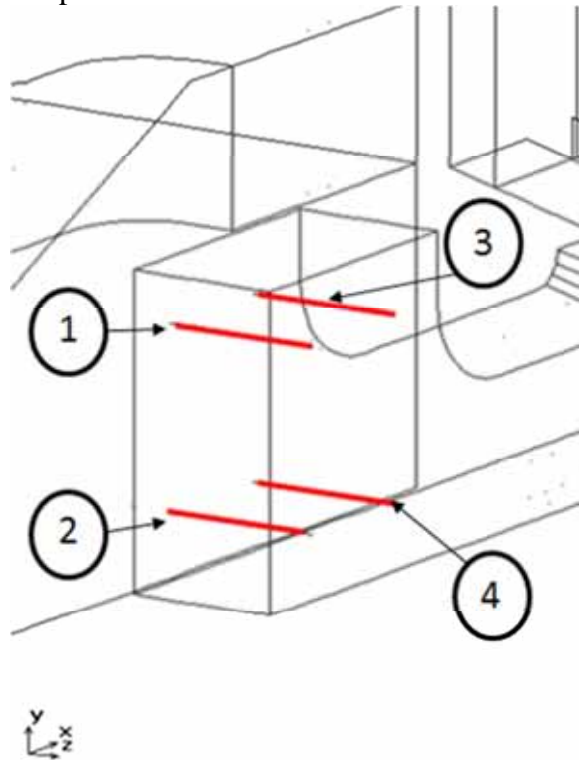
4.4.7 Resultados obtidos

Os dados utilizados para os cálculos são os seguintes:

- Diâmetro bruto (d_b) = 12mm
- Fator de ponderação na resistência do material:
 - $\gamma_{a2} = 1,35$ - para o teste aleatório funcional
 - $\gamma_{a2} = 1,15$ - para o teste de vida útil e de choque
- Limite de ruptura do material (f_{ub}) = 500 MPa; parafuso de alta resistência classe 5.6 (ruptura de acordo com a norma NBR 8800)
- Fator de ponderação na carga aplicada:
 - $\gamma_g = 1,50$ - para o teste aleatório funcional
 - $\gamma_g = 1,00$ - para o teste de vida útil e de choque

A Figura 51 representam os parafusos verificados e as Tabelas 12 e 13 ilustram os resultados obtidos.

Figura 51 – Numeração dos parafusos verificados



Fonte: (do próprio autor).

Tabela 12 - Esforços nos parafusos para o teste aleatório

Parafuso	$F_{t,sd}$ [N]	$F_{v,sd}$ [N]	$F_{t,rd}$ [N]	$F_{v,rd}$ [N]	R	Margem de segurança (M.S.) [%]
Longitudinal						
1	143,6	171,8	31415,9	16755,2	0,000	99,99
2	125,1	221,8	31415,9	16755,2	0,000	99,98
3	271,5	340,4	31415,9	16755,2	0,000	99,95
4	78,9	244,4	31415,9	16755,2	0,000	99,98
Vertical						
1	289,2	228,5	31415,9	16755,2	0,000	99,97
2	160,6	289,8	31415,9	16755,2	0,000	99,97
3	437,8	515,6	31415,9	16755,2	0,001	99,89
4	207,5	335,9	31415,9	16755,2	0,000	99,96
Transversal						
1	525,8	281,6	31415,9	16755,2	0,001	99,94
2	173,8	393,1	31415,9	16755,2	0,001	99,94
3	662,2	820,1	31415,9	16755,2	0,003	99,72
4	197,8	233,0	31415,9	16755,2	0,000	99,98

Tabela 13 - Esforços nos parafusos para o teste de choque e de útil

Parafuso	F t,sd [N]	F v,sd [N]	F t,rd [N]	F v,rd [N]	R	Margem de segurança (M.S.) [%]
Choque (-X)						
1	260,8	303,4	36879,6	19669,1	0,000	99,97
2	63,9	524,8	36879,6	19669,1	0,001	99,93
3	0,0	966,5	36879,6	19669,1	0,002	99,76
4	0,0	754,8	36879,6	19669,1	0,001	99,85
Choque (+X)						
1	0,0	325,3	36879,6	19669,1	0,000	99,97
2	0,0	610,6	36879,6	19669,1	0,001	99,90
3	872,6	1287,9	36879,6	19669,1	0,005	99,52
4	362,0	1020,9	36879,6	19669,1	0,003	99,72
Choque (-Y)						
1	0,0	1618,5	36879,6	19669,1	0,007	99,32
2	259,5	1024,2	36879,6	19669,1	0,003	99,72
3	0,0	2351,9	36879,6	19669,1	0,014	98,57
4	352,0	1351,6	36879,6	19669,1	0,005	99,52
Choque (+Y)						
1	336,4	1050,8	36879,6	19669,1	0,003	99,71
2	0,0	1393,4	36879,6	19669,1	0,005	99,50
3	77,9	2434,2	36879,6	19669,1	0,015	98,47
4	0,0	1784,4	36879,6	19669,1	0,008	99,18
Choque (-Z)						
1	0,0	436,7	36879,6	19669,1	0,000	99,95
2	0,0	611,2	36879,6	19669,1	0,001	99,90
3	2588,8	1313,9	36879,6	19669,1	0,009	99,06
4	1108,8	757,8	36879,6	19669,1	0,002	99,76
Choque (+Z)						
1	255,2	507,8	36879,6	19669,1	0,001	99,93
2	68,2	203,4	36879,6	19669,1	0,000	99,99
3	0,0	850,7	36879,6	19669,1	0,002	99,81
4	0,0	881,8	36879,6	19669,1	0,002	99,80
Vida útil (X)						
1	507,1	522,8	36879,6	19669,1	0,001	99,91
2	439,7	672,9	36879,6	19669,1	0,001	99,87
3	989,6	990,5	36879,6	19669,1	0,003	99,67
4	262,3	731,3	36879,6	19669,1	0,001	99,86
Vida útil (Y)						
1	1060,4	738,4	36879,6	19669,1	0,002	99,78
2	576,4	929,0	36879,6	19669,1	0,002	99,75
3	1624,2	1655,2	36879,6	19669,1	0,009	99,10
4	750,7	1077,7	36879,6	19669,1	0,003	99,66

		Vida útil (Z)				
1	1952,2	936,8	36879,6	19669,1	0,005	99,49
2	625,1	1321,8	36879,6	19669,1	0,005	99,52
3	1202,8	1304,4	36879,6	19669,1	0,005	99,45
4	1384,8	1573,2	36879,6	19669,1	0,008	99,22

4.4.8 Pressão de contato nos furos

A força resistente de cálculo na parede dos furos é calculada de acordo com a seção 6.3.3.3 da norma NBR8800 e pode ser visualizada pela equação a seguir:

$$F_{c,Rd} = \frac{1,2l_f \times t \times f_u}{\gamma_{a2}} \quad (18)$$

Onde:

l_f : É a distância, na direção da força, entre a borda do furo e a borda do furo adjacente ou a borda livre [mm];

t : É a espessura da parte ligada [mm];

f_u : É a resistência à ruptura do aço da parede do furo [MPa].

De modo conservativo foi adotado l_f igual a menor distância entre a borda do furo e a borda livre (14 mm). A resistência de ruptura do aço (material do corpo secundário) também foi adotada de modo conservativo, uma vez que este dado para aços fundidos não está explícito na literatura utilizada, portanto, o limite ruptura é considerado igual ao limite de escoamento do material (200 MPa).

Os dados utilizados nos cálculos das forças resistentes na parede dos furos estão listados a seguir:

- $l_f = 14 \text{ mm}$
- $t = 3,175 \text{ mm}$
- $f_u = 200 \text{ MPa}$
- Fator de ponderação na resistência do material:

$$\gamma_{a2} = 1,35 - \text{para o teste aleatório funcional}$$

$\gamma_{a2} = 1,15$ - para o teste de vida útil e de choque

A margem de segurança é calculada de acordo com a equação a seguir:

$$M.S. = \left(\frac{F_{c,Rd} - F_{v,Sd}}{F_{c,Rd}} \right) \times 100 \quad (19)$$

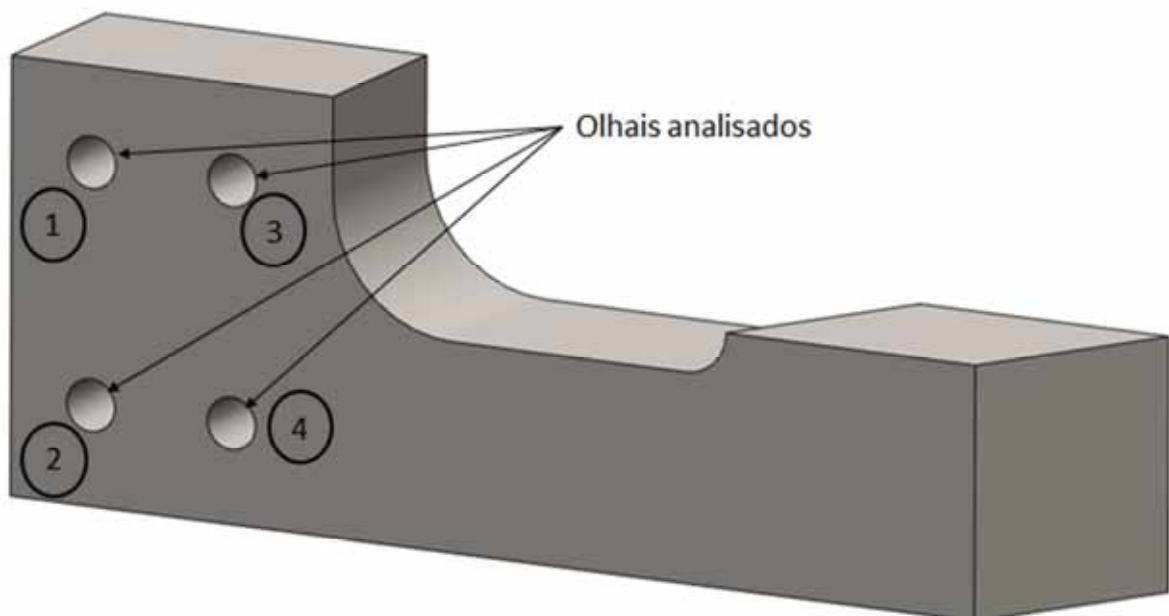
Onde:

M.S.: Margem de segurança [%];

$F_{v,Sd}$: Força atuante no olhal [N].

Na Figura 52 estão ilustrados os furos verificados. Nas tabelas 14 e 15 estão os resultados obtidos:

Figura 52 – Ilustração dos olhais analisados



Fonte: (do próprio autor).

Tabela 14 - Resultados da verificação dos olhais – Teste aleatório funcional

Olhal	$F_{v,sd}$ [N]	$F_{c,Rd}$ [N]	Margem de segurança (M.S.) [%]
Longitudinal (X)			
1	171,8	7902,2	97,83
2	221,8	7902,2	97,19
3	340,4	7902,2	95,69
4	244,4	7902,2	96,91
Vertical (Y)			

1	228,5	7902,2	97,11
2	289,8	7902,2	96,33
3	515,6	7902,2	93,48
4	335,9	7902,2	95,75
Transversal (Z)			
1	281,6	7902,2	96,44
2	393,1	7902,2	95,03
3	820,1	7902,2	89,62
4	233,0	7902,2	97,05

Tabela 15 - Resultados da verificação dos olhais – Teste de choque e vida útil

Olhal	$F_{v,sd}$ [N]	$F_{c,Rd}$ [N]	Margem de segurança (M.S.) [%]
Choque (-X)			
1	303,4	9276,5	96,73
2	524,8	9276,5	94,34
3	966,5	9276,5	89,58
4	754,8	9276,5	91,86
Choque (+X)			
1	325,3	9276,5	96,49
2	610,6	9276,5	93,42
3	1287,9	9276,5	86,12
4	1020,9	9276,5	89,00
Choque (-Y)			
1	1618,5	9276,5	82,55
2	1024,2	9276,5	88,96
3	2351,9	9276,5	74,65
4	1351,6	9276,5	85,43
Choque (+Y)			
1	1050,8	9276,5	88,67
2	1393,4	9276,5	84,98
3	2434,2	9276,5	73,76
4	1784,4	9276,5	80,76
Choque (-Z)			
1	436,7	9276,5	95,29
2	611,2	9276,5	93,41
3	1313,9	9276,5	85,84
4	757,8	9276,5	91,83
Choque (+Z)			
1	507,8	9276,5	94,53
2	203,4	9276,5	97,81

3	850,7	9276,5	90,83
4	881,8	9276,5	90,49
Vida útil (X)			
1	522,8	9276,5	94,36
2	672,9	9276,5	92,75
3	990,5	9276,5	89,32
4	731,3	9276,5	92,12
Vida útil (Y)			
1	738,4	9276,5	92,04
2	929,0	9276,5	89,99
3	1655,2	9276,5	82,16
4	1077,7	9276,5	88,38
Vida útil (Z)			
1	936,8	9276,5	89,90
2	1321,8	9276,5	85,75
3	1304,4	9276,5	85,94
4	1573,2	9276,5	83,04

4.5 VERIFICAÇÃO DAS SOLDAS

Os cálculos dos esforços resistentes da solda são obtidos através da norma NBR8800. O tipo de ligação soldada analisada e sua respectiva força resistente estão descritas a seguir.

4.5.1 Força resistente de cálculo de solda

A solda analisada é do tipo filete e se encontra entre o suporte de gaveta e o corpo secundário (Figura 53). Os cálculos considerados para a força admissível estão de acordo com a norma NBR 8800, seção 6.2.5.1 Tabela 8, e estão apresentados a seguir:

- Tipo de solda: Filete

$$l = 0,707 \times h \quad (20)$$

$$A_w = L \times h \quad (21)$$

$$F_{w,Rd} = \frac{0,6 \times A_w \times f_w}{\gamma_{w2}} \quad (22)$$

$$\sigma_R = \frac{F_{w,Rd}}{A_w} \quad (23)$$

$$M.S. = \left(\frac{\sigma_R - \sigma_{m\acute{a}x}}{\sigma_R} \right) \times 100 \quad (24)$$

Onde:

l: Altura nominal do cordão de solda [mm];

L: Comprimento da solda [mm];

h: Altura mínima do cordão de solda [mm];

f_w: Resistência mínima a tração da solda [MPa];

γ_{w2}: Coeficiente de ponderação da resistência do material, dados conforme nota K da tabela 8 da norma [];

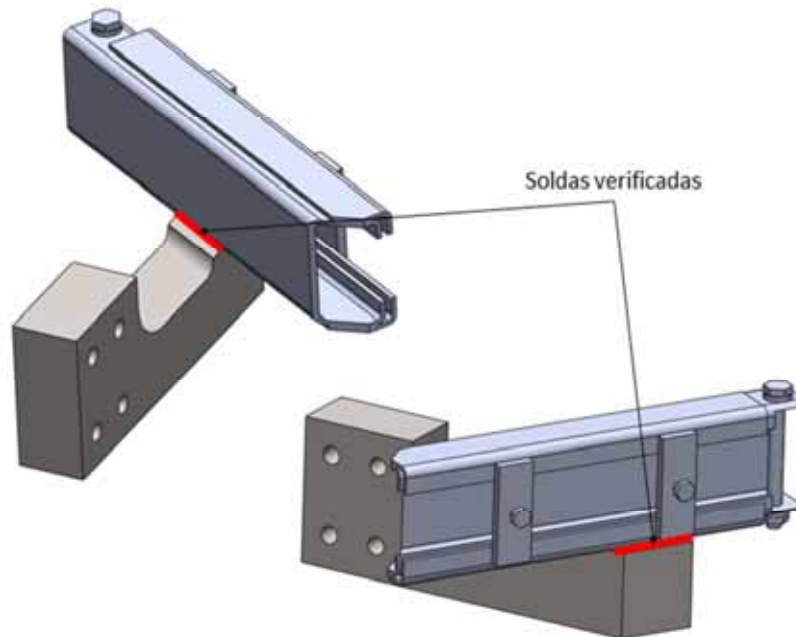
F_{w,Rd}: Força resistente da solda [N];

σ_R: Tensão resistente da solda [MPa];

σ_{máx}: Tensão (von Mises) máxima obtida no modelo de elementos finitos [MPa];

M.S.: Margem de segurança [%].

Figura 53 – Indicação das soldas verificadas



Fonte: (do próprio autor).

O material da solda é o aço ASTM A36 onde apresenta resistência mínima a tração de 250 MPa. Os dados utilizados nos cálculos estão listados a seguir:

- Altura nominal do cordão (l) = 3,175 mm (1/8")
- Comprimento do cordão (L) = 49,5 mm
- Resistência mínima a tração (f_w) = 250 MPa
- Coeficiente de ponderação na resistência do material:
 - $\gamma_{w2} = 1,35$ - para o teste aleatório funcional
 - $\gamma_{w2} = 1,15$ - para o teste de vida útil e de choque
- Coeficiente de ponderação na carga aplicada:
 - $\gamma_g = 1,50$ - para o teste aleatório funcional
 - $\gamma_g = 1,00$ - para o teste de vida útil e de choque

As Tabelas 16, 17 e 18 apresentam os resultados das verificações das soldas:

Tabela 16 - Resultados da verificação das soldas – Teste aleatório funcional

Caso de carga	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	σ_{R} [MPa]	Margem de segurança (M.S.) [%]
Longitudinal (X)	5,9	111,1	94,74
Vertical (Y)	7,6	111,1	93,14
Transversal (Z)	6,8	111,1	93,90

Tabela 17 - Resultados da verificação das soldas – Teste de vida útil

Caso de carga	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	σ_{R} [MPa]	Margem de segurança (M.S.) [%]
Longitudinal (X)	19,2	130,4	85,30
Vertical (Y)	25,9	130,4	80,11
Transversal (Z)	22,8	130,4	82,55

Tabela 18 - Resultados da verificação das soldas – Teste de choque

Caso de carga	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	σ_{R} [MPa]	Margem de segurança (M.S.) [%]
Choque (-X)	24,9	130,4	80,93
Choque (+X)	29,5	130,4	77,35
Choque (-Y)	28,7	130,4	77,97
Choque (+Y)	27,8	130,4	78,71
Choque (-Z)	17,8	130,4	86,34
Choque (+Z)	11,1	130,4	91,52

O posicionamento das soldas nestes componentes ferroviários deve ser localizado em regiões que apresentem tensões atuantes baixas (muito inferiores ao admissível). Como pode se ver no suporte de pastilha às soldas estão localizadas apenas nas regiões com tensões baixas. Caso se o suporte apresentasse soldas no corpo primário, a tensão admissível na solda poderia limitar a tensão máxima no componente. Além disto, seria necessário o alívio de tensões no componente inteiro, devido à quantidade elevada de soldas, aumentando assim o custo de produção.

Os resultados apresentados nas verificações (parafusos, olhais e solda) foram elaborados apenas nas regiões críticas e com os maiores esforços encontrados nas análises. Como os resultados obtidos foram acima do admissível, então pode-se dizer que não são esperados problemas no suporte de pastilha.

5 CONCLUSÃO

Os resultados das análises e verificações, apresentados no Capítulo 4 demonstram que as tensões resultantes e esforços máximos se encontram acima do admissível considerado. Desta forma, não são esperados problemas estruturais no suporte de pastilha decorrente dos carregamentos indicados pela norma ferroviária IEC 61373.

Além de avaliar a estrutura do suporte de pastilha, o trabalho teve como intuito também ilustrar como são elaboradas as análises estruturais devido a carregamentos dinâmicos em equipamentos anexadas a composição ferroviária. Assim, podemos expandir o raciocínio adotado para outros equipamentos fixados na mesma região. Para estruturas fixadas em outras regiões, no entanto, devemos alterar as curvas de carregamento, tanto randômica quando a curva de choque.

REFERÊNCIAS

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. **AISC 360-05**: Specification for structural steel buildings. Chicago, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projetos de estruturas de aço e de estruturas e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**. 7.ed. São Paulo: ABM, 2005. 600 p.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61373**: Railway applications – Rolling stock equipment – Shock and vibration tests. Genebra, 2010.

MATWEB. ASTM A36 Steel, Plate. Disponível em:<<http://www.matweb.com>>. Acesso em: 03 fev. 2014.

NETO, Camilo Borges. **Manual didático de ferrovias**. Paraná. 192 p. Disponível em:<<http://www.dtt.ufpr.br/Ferrovias/notas.htm>>. Acesso em: 03 jun. 2014.

SORIANO, Humberto Lima. **Elementos Finitos - Formulação e Aplicação na Estática e Dinâmica das Estruturas**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2009. 411 p.

SHIGLEY, Joseph Edward. **Elementos de máquina Volume 1**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1984. v. 3, 347 p.

THOMSON, William T. **Teoria da vibração com aplicações**. Rio de Janeiro: Interciência, 1978. 370 p.

APÊNDICE A – Resultados obtidos na análise modal

A Tabela 19 ilustra os resultados encontrados na análise modal. Nesta tabela pode-se visualizar os resultados das frequências naturais da estrutura com suas respectivas participações de massa.

Tabela 19 - Resultados da análise modal.

Número da frequência	Frequência [Hz]	Participação de massa na direção X	Participação de massa na direção Y	Participação de massa na direção Z
1	6,43E+01	0,333	6,29E-02	8,67E-03
2	7,38E+01	2,43E-04	4,70E-02	0,237
3	1,12E+02	7,57E-02	2,83E-02	2,96E-03
4	1,54E+02	2,24E-02	3,37E-02	0,359
5	2,07E+02	4,51E-02	3,34E-02	7,00E-03
6	2,98E+02	7,19E-03	9,65E-04	2,34E-03
7	3,32E+02	3,67E-03	4,73E-03	6,08E-02
8	3,56E+02	2,21E-02	2,90E-03	6,11E-04
9	3,95E+02	4,55E-04	3,26E-02	1,20E-02
10	4,51E+02	1,23E-03	0,553	3,83E-03
11	5,30E+02	3,03E-04	2,83E-03	6,89E-02
12	5,75E+02	6,75E-03	2,95E-02	3,43E-05
13	6,12E+02	4,71E-03	3,99E-03	9,60E-02
14	6,60E+02	2,57E-02	1,65E-04	1,71E-02
15	6,87E+02	2,77E-02	7,39E-06	3,30E-03
16	7,27E+02	2,83E-02	5,58E-03	7,52E-05
17	7,48E+02	1,84E-04	1,93E-04	9,19E-07
18	7,64E+02	1,71E-02	7,82E-03	9,35E-04
19	7,92E+02	5,23E-04	1,39E-02	7,73E-03
20	8,56E+02	1,65E-05	3,34E-05	2,30E-05
21	8,91E+02	6,54E-05	2,30E-03	1,24E-03
22	9,29E+02	1,07E-03	8,46E-03	9,35E-05
23	9,41E+02	1,21E-03	1,12E-02	6,33E-05
24	1,01E+03	3,32E-05	7,28E-04	1,87E-03
25	1,02E+03	5,80E-05	1,16E-03	2,90E-03
26	1,05E+03	5,47E-05	8,57E-04	1,59E-03
27	1,12E+03	9,81E-04	8,30E-06	3,74E-05
28	1,13E+03	1,51E-04	3,86E-03	9,66E-05
29	1,19E+03	9,07E-05	9,95E-06	1,93E-04
30	1,26E+03	1,18E-04	1,63E-04	5,79E-05
31	1,28E+03	2,09E-03	4,33E-06	1,26E-05
32	1,32E+03	6,40E-04	5,09E-04	4,69E-03

33	1,36E+03	4,64E-03	1,24E-03	1,48E-03
34	1,43E+03	2,42E-04	1,04E-02	5,45E-04
35	1,48E+03	1,39E-03	7,64E-04	6,59E-06
36	1,50E+03	1,57E-03	8,75E-04	4,95E-05
37	1,53E+03	2,16E-03	6,48E-04	6,73E-05
38	1,58E+03	6,03E-05	2,18E-05	3,06E-06
39	1,60E+03	2,78E-03	6,97E-04	1,96E-05
40	1,63E+03	1,02E-02	1,10E-03	4,12E-06
41	1,65E+03	2,31E-04	4,49E-05	1,79E-09
42	1,66E+03	1,98E-05	2,45E-04	7,82E-06
43	1,72E+03	3,98E-04	1,19E-04	5,46E-05
44	1,74E+03	5,98E-05	1,34E-03	1,89E-05
45	1,81E+03	4,63E-03	2,63E-05	4,39E-08
46	1,83E+03	5,14E-04	7,82E-04	2,55E-06
47	1,85E+03	3,07E-02	5,76E-04	5,52E-06
48	1,88E+03	8,52E-03	1,61E-04	1,61E-05
49	1,92E+03	1,33E-02	1,01E-04	7,10E-05
50	1,99E+03	4,23E-04	4,60E-04	1,88E-05
51	2,01E+03	4,07E-06	1,38E-04	1,71E-06
52	2,03E+03	3,39E-04	1,56E-04	1,65E-05
53	2,12E+03	1,03E-03	2,26E-06	1,47E-03
54	2,12E+03	1,66E-02	1,18E-03	6,82E-04
55	2,15E+03	2,93E-04	2,28E-04	5,85E-03
56	2,18E+03	7,42E-04	1,62E-06	3,86E-03
57	2,24E+03	1,05E-04	1,56E-04	7,16E-04
58	2,27E+03	2,67E-04	5,86E-04	3,83E-03
59	2,28E+03	2,44E-04	6,61E-05	4,40E-05
60	2,31E+03	3,67E-03	1,01E-03	5,78E-04
61	2,34E+03	9,67E-04	2,39E-05	3,81E-04
62	2,36E+03	3,32E-05	5,24E-06	3,31E-06
63	2,37E+03	3,86E-04	7,25E-05	1,09E-04
64	2,41E+03	6,27E-04	9,57E-03	3,57E-03
65	2,43E+03	1,77E-03	5,16E-07	4,84E-04
66	2,45E+03	2,36E-04	1,17E-03	4,85E-04
67	2,46E+03	5,75E-06	4,63E-07	5,85E-06
68	2,48E+03	3,05E-02	8,72E-05	1,33E-03
69	2,51E+03	5,37E-06	3,72E-06	5,26E-07
70	2,52E+03	8,25E-03	5,07E-03	1,56E-03
71	2,55E+03	3,81E-03	7,02E-04	1,51E-04
72	2,56E+03	1,46E-03	5,93E-04	3,04E-04
73	2,59E+03	1,06E-03	3,93E-06	1,72E-04
74	2,61E+03	4,25E-03	1,05E-03	1,46E-05
75	2,65E+03	1,52E-04	5,57E-04	1,13E-03
76	2,69E+03	4,53E-04	7,38E-05	3,28E-04

77	2,70E+03	2,59E-07	5,08E-06	1,55E-05
78	2,75E+03	7,58E-04	7,55E-08	6,56E-05
79	2,81E+03	1,39E-03	1,63E-03	1,29E-05
80	2,83E+03	2,77E-04	3,39E-04	1,69E-05
81	2,85E+03	8,91E-03	1,11E-03	7,33E-05
82	2,86E+03	2,23E-04	9,24E-05	5,28E-06
83	2,90E+03	6,63E-06	1,26E-05	1,79E-04
84	2,93E+03	7,04E-04	2,48E-06	3,18E-04
85	2,94E+03	2,53E-03	2,75E-05	3,07E-04
86	2,99E+03	6,48E-04	9,53E-05	1,51E-03
87	3,04E+03	9,98E-04	9,47E-07	6,00E-05
88	3,09E+03	2,61E-05	7,93E-06	1,06E-04
89	3,12E+03	2,16E-02	3,25E-05	1,26E-05
90	3,15E+03	2,22E-03	3,94E-06	8,11E-06
91	3,17E+03	2,59E-02	1,64E-05	2,25E-05
92	3,19E+03	6,16E-03	3,11E-06	1,03E-04
93	3,19E+03	2,17E-05	8,93E-08	2,60E-06
94	3,24E+03	9,63E-05	8,54E-07	3,23E-06
95	3,25E+03	1,07E-02	9,77E-06	9,04E-05
96	3,26E+03	1,88E-03	2,33E-05	9,22E-10
97	3,33E+03	1,29E-04	1,23E-06	1,06E-04
98	3,33E+03	2,78E-04	8,18E-07	9,58E-05
99	3,36E+03	3,14E-03	2,90E-05	1,11E-04
100	3,38E+03	1,04E-03	7,86E-06	6,08E-06
101	3,38E+03	1,34E-02	7,66E-05	2,09E-04
102	3,39E+03	4,59E-05	7,84E-08	6,16E-04
103	3,44E+03	2,58E-03	2,70E-05	3,64E-04
104	3,45E+03	3,50E-03	3,59E-05	4,26E-04
105	3,48E+03	3,70E-04	1,34E-07	1,45E-03
106	3,49E+03	3,36E-04	9,40E-06	3,95E-05
107	3,51E+03	3,60E-04	1,34E-06	4,66E-07
108	3,59E+03	3,79E-03	3,34E-05	5,37E-05
109	3,59E+03	8,03E-04	1,00E-05	1,52E-05
110	3,64E+03	7,66E-03	3,05E-06	4,36E-07
111	3,67E+03	1,10E-03	2,98E-05	6,45E-07
112	3,68E+03	3,22E-05	1,35E-04	5,61E-04
113	3,68E+03	7,11E-04	3,28E-06	3,16E-05
114	3,70E+03	2,05E-04	4,49E-06	2,90E-06
115	3,75E+03	2,99E-04	4,50E-06	7,59E-05
116	3,77E+03	1,90E-05	1,35E-08	1,35E-03
117	3,84E+03	2,53E-04	1,97E-06	2,78E-03
118	3,88E+03	3,51E-04	1,91E-05	3,26E-04
119	3,89E+03	7,00E-05	2,00E-06	3,31E-05
120	3,96E+03	1,34E-03	5,65E-06	4,50E-05

121	3,98E+03	1,26E-03	2,97E-05	1,87E-03
122	4,01E+03	1,52E-06	9,73E-06	8,92E-03
123	4,05E+03	1,47E-03	9,39E-06	2,21E-04
124	4,07E+03	2,46E-04	1,57E-05	9,30E-06
125	4,10E+03	4,21E-06	4,08E-07	2,70E-08
126	4,12E+03	1,05E-05	6,44E-05	5,36E-04
127	4,14E+03	1,09E-04	1,17E-09	1,15E-05
128	4,15E+03	9,69E-04	5,30E-07	4,20E-05
129	4,17E+03	1,82E-03	5,83E-06	2,81E-05
130	4,18E+03	2,47E-03	1,83E-04	1,24E-04
131	4,23E+03	6,30E-05	1,94E-06	8,26E-06
132	4,24E+03	4,72E-04	7,83E-07	1,66E-03
133	4,25E+03	4,71E-04	1,49E-06	2,04E-04
134	4,30E+03	1,39E-04	1,35E-05	9,63E-04
135	4,34E+03	1,22E-03	2,36E-06	1,68E-04
136	4,38E+03	2,80E-05	1,22E-05	7,96E-05
137	4,39E+03	1,53E-06	2,05E-07	7,61E-05
138	4,44E+03	2,44E-04	2,46E-06	8,28E-05
139	4,48E+03	1,20E-04	7,30E-05	6,31E-05
140	4,51E+03	3,49E-06	9,97E-06	4,82E-05
141	4,54E+03	4,13E-04	8,34E-08	2,73E-04
142	4,55E+03	1,94E-04	1,25E-04	1,95E-06
143	4,58E+03	1,33E-04	2,60E-07	1,56E-04
144	4,59E+03	2,32E-04	3,60E-05	6,63E-04
145	4,60E+03	3,63E-07	5,07E-07	2,69E-05
146	4,63E+03	2,00E-03	8,90E-06	8,87E-09
147	4,66E+03	3,14E-06	9,76E-07	1,48E-06
148	4,67E+03	1,11E-04	1,18E-06	2,97E-06
149	4,70E+03	1,49E-06	7,91E-07	1,78E-07
150	4,74E+03	3,68E-04	2,23E-06	6,46E-05
151	4,75E+03	3,52E-05	9,12E-07	3,31E-06
152	4,76E+03	1,02E-04	5,16E-06	1,27E-06
153	4,79E+03	2,65E-04	1,32E-07	2,73E-05
154	4,83E+03	3,11E-05	1,41E-05	4,97E-06
155	4,85E+03	4,98E-05	4,23E-05	4,91E-07
156	4,89E+03	5,77E-04	1,45E-04	1,96E-05
157	4,91E+03	6,59E-06	7,08E-08	2,32E-06
158	4,92E+03	4,29E-05	3,05E-04	3,26E-07
159	4,94E+03	8,88E-05	2,28E-04	7,80E-06
160	4,97E+03	1,25E-04	7,92E-05	1,66E-05
161	4,98E+03	2,32E-04	3,02E-04	6,31E-05
162	5,02E+03	1,81E-04	2,07E-04	3,74E-06
163	5,04E+03	1,57E-03	1,01E-05	4,93E-06
164	5,05E+03	6,38E-04	5,35E-04	5,82E-06

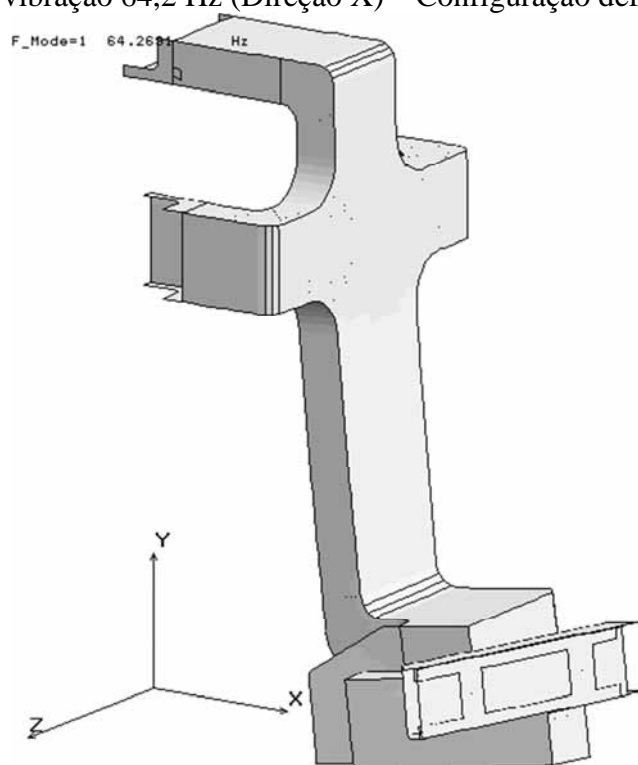
165	5,09E+03	7,02E-04	1,17E-04	1,28E-05
166	5,10E+03	3,16E-04	5,29E-04	9,99E-05
167	5,12E+03	3,01E-04	3,54E-04	7,75E-05
168	5,16E+03	3,07E-05	2,27E-04	1,13E-05
169	5,18E+03	1,79E-03	4,46E-03	7,45E-05
170	5,21E+03	6,51E-07	8,82E-05	6,18E-05
171	5,23E+03	1,11E-05	8,84E-05	4,97E-05
172	5,23E+03	1,84E-04	8,47E-04	1,12E-06
173	5,25E+03	4,93E-05	6,46E-04	1,87E-05
174	5,28E+03	3,76E-07	4,57E-05	2,72E-06
175	5,29E+03	3,46E-04	1,25E-03	1,51E-05
176	5,30E+03	4,36E-07	8,52E-05	2,12E-08
177	5,32E+03	5,04E-05	2,63E-04	4,03E-05
178	5,34E+03	4,35E-05	7,76E-06	3,38E-04
179	5,37E+03	1,05E-06	3,00E-04	4,91E-06
180	5,42E+03	8,94E-05	1,01E-04	1,88E-05
181	5,45E+03	7,53E-08	5,06E-06	1,76E-05
182	5,46E+03	2,23E-04	1,83E-04	1,44E-06
183	5,49E+03	4,19E-05	1,87E-04	1,94E-05
184	5,51E+03	4,89E-04	6,23E-04	2,84E-04
185	5,53E+03	3,96E-04	7,48E-05	7,70E-05
186	5,54E+03	1,35E-06	7,19E-05	1,87E-06
187	5,57E+03	8,22E-06	3,79E-04	5,03E-06
188	5,59E+03	1,98E-06	6,77E-05	4,31E-07
189	5,62E+03	9,71E-06	5,41E-04	1,10E-06
190	5,66E+03	7,09E-05	1,81E-04	9,43E-04
191	5,69E+03	3,38E-04	2,33E-04	4,14E-05
192	5,70E+03	1,75E-04	5,65E-06	1,46E-05
193	5,73E+03	2,89E-04	2,71E-04	1,78E-04
194	5,75E+03	3,01E-04	1,71E-04	2,22E-10
195	5,79E+03	3,57E-06	8,17E-06	2,98E-06
196	5,82E+03	1,57E-04	5,71E-04	7,95E-05
197	5,84E+03	2,31E-05	1,87E-04	6,34E-06
198	5,86E+03	1,99E-05	3,14E-06	8,53E-05
199	5,88E+03	5,29E-07	3,22E-05	2,53E-06
200	5,91E+03	7,13E-06	1,80E-04	5,60E-05

Somatório de massa

0,940	0,955	0,961
-------	-------	-------

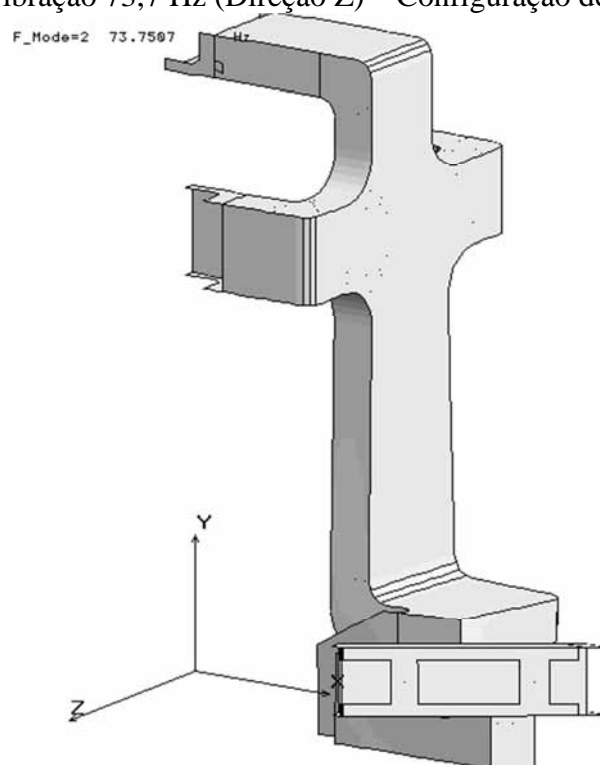
As Figuras 54 a 57 ilustram os modos de vibração da estrutura com as maiores participações de massa encontradas.

Figura 54 – Modo de vibração 64,2 Hz (Direção X) – Configuração deformada



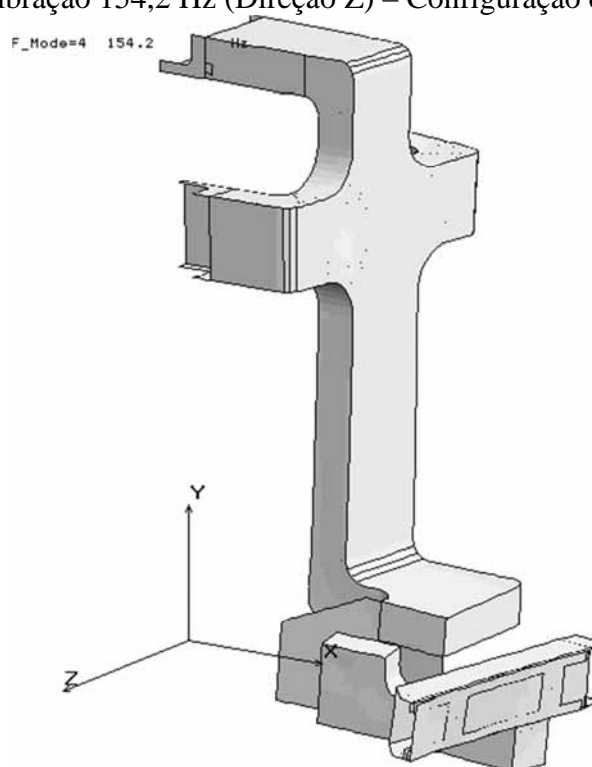
Fonte: (do próprio autor).

Figura 55 – Modo de vibração 73,7 Hz (Direção Z) – Configuração deformada



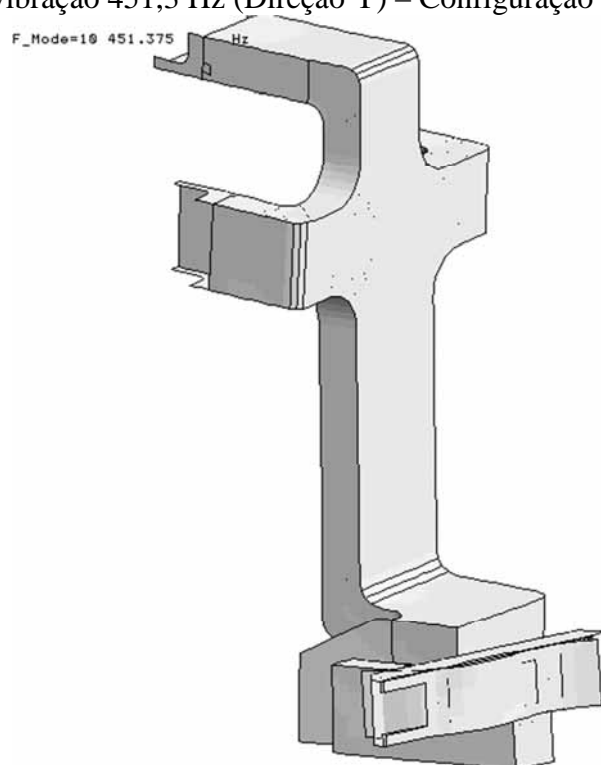
Fonte: (do próprio autor).

Figura 56 – Modo de vibração 154,2 Hz (Direção Z) – Configuração deformada



Fonte: (do próprio autor).

Figura 57 – Modo de vibração 451,3 Hz (Direção Y) – Configuração deformada



Fonte: (do próprio autor).