

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP ESCOLA DE MINAS DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



Carlos Eduardo dos Santos

ANÁLISE POR ELEMENTOS FININITOS DE ESTRUTURAS METÁLICAS RESSONANTES NA REDUÇÃO DA INCRUSTAÇÃO EM VAGÕES DE MINÉRIO

OURO PRETO - MG 2023 Carlos Eduardo dos Santos carlos.eduardo1@aluno.ufop.edu.br

ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS DE ESTRUTURAS METÁLICAS RESSONANTES NA REDUÇÃO DA INCRUSTAÇÃO EM VAGÕES DE MINÉRIO

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Professor orientador: Dr. Gustavo Paulinelli Guimarães

OURO PRETO – MG 2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO



Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO REITORIA ESCOLA DE MINAS DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Carlos Eduardo dos Santos

Análise por elementos finitos de estruturas metálicas ressonantes na redução da incrustação em vagões de minério

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico

Aprovada em 14 de março de 2023

Membros da banca

Prof. Dr. Gustavo Paulinelli Guimarães - Orientador(a) (Universidade Federal de Ouro Preto) Prof. Dr. Diogo Antônio de Sousa - (Universidade Federal de Ouro Preto) Eng. Ian Eiras Versiani Passos - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Prof. Dr. Gustavo Paulinelli Guimarães, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 29/03/2023.



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Paulinelli Guimaraes, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 29/03/2023, às 10:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do <u>Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015</u>.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <u>http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?</u> <u>acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0</u>, informando o código verificador **0500132** e o código CRC **60A4AA14**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.003970/2023-59

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163 Telefone: (31)3559-1533 - www.ufop.br SEI nº 0500132

A Deus dedico mais esta etapa vencida, minha mãe e irmã, pelo apoio. A meus amigos por todo tempo junto, bem como a ajuda.

AGRADECIMENTO

Em primeiro lugar, a Deus, que durante todos os meus anos de estudos, fez com que os meus objetivos fossem alcançados.

À minha mãe e irmã, por estarem ao meu lado e também pelo amor incondicional e apoio demonstrado ao longo de todo o tempo em que me dediquei a este trabalho. Ao prof. Dr. Gustavo Paulinelli Guimarães, por ter sido meu orientador e desempenhado tal função com dedicação e amizade. Ao professor Diogo Antônio de Souza, por todos os conselhos, pela ajuda e paciência com que guiaram o meu aprendizado.

Aos amigos Guilherme, Luiz, Matheus, Mateus, Rodrigo, Samuel, Thassio, Túlio e Tadeu, com quem convivi intensamente durante os últimos anos, também pelo companheirismo e pela troca de experiências que por sua vez, me permitiram crescer, não só como pessoa, mas também como formando. Por fim, a todos aqueles que contribuíram, de alguma forma, para a realização deste trabalho.

"Talvez não tenhamos conseguido fazer o melhor. Mas lutamos para que o melhor fosse feito. Não somos o que deveríamos ser, não somos o que iremos ser, mas graças a Deus não somos o que éramos".

Martin Luther King

RESUMO

A incrustação de minério em vagões gôndola, é um problema que afeta todas as empresas de transporte ferroviário, causando inúmeros problemas como gasto elevado, volume morto e ociosidade. O presente trabalho se propõe o desenvolvimento de um modelo de chapas que possuam a frequência natural, sintonizadas á do virador de vagões. Neste caso, considera-se critérios econômicos e estruturais ao longo do desenvolvimento dos modelos. A metodologia utilizada foi o desenvolvimento de um modelo através da representação geométrica na forma virtual, em sistemas computacionais de auxílio ao projeto CAD (desenho assistido por computador), integrada com a análise através do Método dos Elementos Finitos (MEF), procedimento numérico para determinar soluções aproximadas de problemas de valores sobre o contorno de equações diferenciais. A análise da resposta das chapas sobre diferentes princípios de projeto, como frequência natural, resposta harmônica, tensão, alongamento, deformação e critério de Von Mises, permite à pesquisa determinar o modelo mais eficiente. Conclui-se que é uma solução viável, a utilização de estruturas metálicas auxiliares na resolução da incrustação de minério.

Palavras-chave: Vibrações Mecânicas. Ressonância. Incrustação de Minério.

ABSTRACT

Ore fouling in gondola wagons is a problem that affects all railroad transport companies, causing numerous problems such as high costs, dead volume and idleness. The present work proposes the development of a model of plates that have the natural frequency, tuned to that of the car dumper. In this case, economic and structural criteria are considered throughout the development of the models. The methodology used was the development of a model through geometric representation in virtual form, in computer aided design CAD (computer aided design) systems, integrated with the analysis through the Finite Element Method (FEM), a numerical procedure to determine approximate solutions to problems of values on the boundary of differential equations. The analysis of the response of the plates on different design principles, such as natural frequency, harmonic response, stress, elongation, strain, and Von Mises criteria, allows the research to determine the most efficient model. It is concluded that it is a viable solution, the use of auxiliary metallic structures in the resolution of ore fouling.

Key-words: Mechanical Vibrations. Resonance. Ore Encrustation.

LISTA DE FIGURAS

Figura1: Caracterização do problema	
Figura 2: Tempo de operação para movimentar o rechego de minério	13
Figura 3: Esquema da vibração na zona de ressonância	19
Figura 4: Sistema Cantiléver	
Figura 5: exemplo da discretização de uma peça por elementos quadriculados	22
Figura 6: Nós e elementos presentes em uma malha	22
Figura 7: Simulação de esforços no ANSYS	23
Figura 8: Processo de modelagem	23
Figura 9: vista lateral de um vagão gôndola	24
Figura 10: vista superior de um vagão gôndola	25
Figura 11: vista frontal de um vagão gôndola	25
Figura 12: virador de vagões	
Figura 13: Características das ligações em particulados úmidos	
Figura 14: Sticking	
Figura 15: Fluxograma das atividades desenvolvidas no presente estudo	
Figura 16: Modelagem CAD do vagão	
Figura 17: Montagem do estudo	
Figura 18: Deslocamento do modelo	
Figura 19: Modelo da chapa	
Figura 20: Modelo da malha	
Figura 21: Força de 5 kN nas traves laterais	
Figura 22: Carga Estática de 50 kN.	
Figura 23: Modelo 1: Chapas na borda superior da curvatura, entre os reforços	
Figura 24: Modelo 2: Chapas na borda superior da curvatura, nos reforços	
Figura 25: Modelo 3: Chapas na curvatura, entre os reforços	
Figura 26: Modelo 4: Chapas na borda superior da curvatura, nos reforços	
Figura 27: Gráfico de frequências naturais de cada modelo	
Figura 28: Resultado da frequência Natural de um modelo	
Figura 29: Tensão encontrada no modelo 1	
Figura 30: Tensão encontrada no modelo 2	40
Figura 31: Tensão encontrada no modelo 3	40
Figura 32: Tensão encontrada no modelo 4	40

Figura 33: Gráfico comparativo de tensão entre os modelos	. 41
Figura 34: Alongamento encontrado no modelo 1	. 42
Figura 35: Alongamento encontrado no modelo 2	. 42
Figura 36: Alongamento encontrada no modelo 3	42
Figura 37: Alongamento encontrado no modelo 4	43
Figura 38: Gráfico comparativo de alongamento entre os modelos	. 43
Figura 39: Deformação encontrado no modelo 1	. 44
Figura 40: Deformação encontrada no modelo 2	45
Figura 41: Deformação encontrada no modelo 3	45
Figura 42: Deformação encontrada no modelo 4	45
Figura 43: Gráfico comparativo de deformação entre os modelos	. 46
Figura 44: Resposta harmônica do modelo 3	. 47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação das vibrações	15
Tabela 2: Frequências naturais da estrutura	31
Tabela 3: Caracterização do material	32
Tabela 4: Variáveis e indicadores	35
Tabela 5: Comparativo da tensão de Von Mises	47
Tabela 6: Quadro comparativo	48

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
	1.1 Formulação do Problema	11
	1.2 Justificativa	12
	1.3 Objetivos	13
	1.3.1 Geral	13
	1.3.2 Específicos	14
	1.4 Estrutura do trabalho	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
	2.1 Vibração	15
	2.1.1 Frequência Natural	16
	2.1.2 Ressonância	16
	2.1.3 Sistema com N Graus de Liberdade	17
	2.1.4 Controle das Frequências Naturais	19
	2.1.5 Sistemas Contínuos	20
	2.2 Método de Elemento Finitos MEF	21
	2.3 Vagões	24
	2.4 Sticking	26
	2.4.1 Efeitos microscópicos da umidade em materiais particulados	26
	2.4.2 Adesão	27
3	METODOLOGIA	28
	3.1 Tipos de pesquisa	28
	3.2 Matérias e Métodos	29
	3.2.1 Construção da Geometria	30
	3.2.2 Construção do Estudo	30
	3.2.3 Estudo do Modelo	31
	3.2.4 Chapas	32
	3.2.5 Condições de Contorno	33
	3.3 Variáveis e Indicadores	34
	3.4 Instrumento de Coleta de Dados	35
	3.5 Tabulação dos dados	35
	3.6 Considerações Finais do Capítulo	35
4	RESULTADOS	36
	4.1 Análises Modal e Harmônica dos Sistemas	36
	4.1.1 Análise de Tensão	38
	4.1.2 Análise de Alongamento	41
	4.1.3 Análises de Deformação	44
	4.1.4 Tensão de Von Mises	47
	4.2 Avaliação de resultados	48
5	CONCLUSÃO	49
	5.1 Conclusões	49
	5.2 Trabalhos Futuros	49

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

A vibração é um fenômeno muito comum, tanto no dia a dia das pessoas quanto em empresas. Sendo assim, a oscilação em equipamentos industriais pode ser um sinal e uma fonte de problemas. Outras vezes, a vibração poderá apenas ser uma consequência da operação de uma máquina e ter uma utilidade específica, sem causa qualquer tipo de preocupação. Em linhas gerais, qualquer movimento que se repita, após um intervalo de tempo, é denominado vibração ou oscilação (RAO, 2009).

Observa-se que, atrelado a esse conceito, tem-se a frequência natural, sendo a taxa na qual um objeto vibra livremente, após ser perturbado, por exemplo, arrancado, dedilhado ou atingido. Um objeto vibrante pode ter uma ou várias frequências naturais (JOHN AVISO, 1989).

A ressonância, pode ser definida como um fenômeno físico que ocorre quando uma força é aplicada sobre um sistema com frequência igual ou muito próxima da frequência natural desse sistema. A ressonância ocasiona um aumento na amplitude de oscilação maior do que aquele ocasionado por outras frequências (GRAHAM, 2017).

Após apresentado todas essas definições, é possível postular que poderia existir uma solução através da união desses conceitos, para ser introduzidas em vagões, como uma estrutura metálica cuja frequência de resposta esteja sintonizada a estrutura de virador de vagões, para resolução do fenômeno da água superficial nos minérios, que é muito comum, sendo definido como *sticking*, palavra inglesa, que significa colagem e aderência: quando o material tem a tendência de ficar em repouso sobre outro até certo ângulo, sem interferir nas propriedades intrínsecas e intensivas, variando neste caso, apenas o comportamento do material no ambiente em questão (MRS, 2022). Tal acontecimento gera uma série de problemas, a maioria deles ligados ao fato do material não escoar e se manter preso em paredes (MRS, 2022).¹

E para análise dessa possível solução, será utilizado o Método dos Elementos Finitos (MEF), em inglês, Finite *Element Method* (FEM) que segundo Rafael Brasil, (2020), é:

¹A MRS Logística S/A é uma empresa brasileira de logística e transporte ferroviário. É a atual concessionária que opera a chamada Malha Regional Sudeste da Rede Ferroviária Federal S/A, sendo especializada no transporte de cargas como minérios, produtos siderúrgicos acabados, cimento, bauxita, produtos agrícolas e containers, entre outros. Constituindo o principal enfoque desse trabalho a otimização do transporte de minério de ferro. ("MRS", 2014).

A análise de elementos finitos é um método para resolver equações diferenciais, que consiste em "discretizar o sistema sob análise em vários elementos". Os elementos possuem nós que se deslocam com a aplicação de carregamento e podem fornecer respostas sobre o fenômeno que está se estudando. Nessa perspectiva sendo utilizado para entender o efeito da vibração na estrutura e no desprendimento do recheio de minério.

Partindo desses conceitos, pode-se definir a pergunta problema, como:

Estudo de parâmetros que determinam viabilidade da implementação de estruturas metálicas de frequência natural sintonizadas à frequência de vibração do virador de vagões na resolução do problema de *sticking*?

1.2 Justificativa

Segundo o PROPEQ (2021), os efeitos das incrustações podem provocar o aparecimento de trincas e vazamentos nos equipamentos. Isso ocorre devido ao aumento da resistência de transferência de calor das incrustações que pode gerar um superaquecimento localizado na parede do metal de revestimento. Dessa forma, verifica-se que os equipamentos podem ter rupturas em suas estruturas, o que contribui para aumentar o risco de acidentes nas ferrovias.

Assim, os danos nos vagões podem acarretar a redução do tempo de vida útil deles. Além de provocar paradas indevidas na operação para realizar manutenções e em casos extremos o desequilíbrio da carga levando ao descarrilamento. Tais fatores resultam na queda da eficiência do equipamento e, consequentemente, da indústria e também no aumento dos gastos e tempo para realizar os reparos. Como pode ser visualizado na Figura 1 e 2.



Figura 1: Caracterização do problema. Fonte: MRS, 2022.



Figura 2: Tempo de operação para movimentar o rechego de minério. Fonte: MRS 2022.

Conforme apresentado nas figuras 1 e 2, os impactos da incrustação são muito danosos à operação, outro dado fornecido pela MRS (2016), é que cada vagão em média tem 1,77t de minério aderido, cada locomotiva leva acoplada 136 vagões, tendo um ganho médio de 204,72t nos portos, representando um ganho na taxa de atendimento.

Logo, é possível concluir que o *sticking* caracteriza um problema com grande possibilidade de ganhos em produção, segurança de operação e produtividade. Pontos relevantes como garantir mais segurança para os colaboradores que trabalham na atividade de rechego e para as comunidades em torno da ferrovia, diminuindo os riscos de descarrilamentos. Além de uma diminuição de custos, tendo em vista a diminuição do peso dos vagões, o que diminui o consumo de diesel e dos gastos com manutenções. Além de maior produtividade, já que os vagões permanecem ativos por mais tempo; tirando o tempo de ações corretivas, bem como o maior volume de material transportado.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Desenvolver um estudo numérico utilizando o MEF para analisar os impactos do uso de estruturas metálicas auxiliares que possam vibrar de maneira sintonizada e evitar o acúmulo de material em vagões, para constatar o desempenho e aplicabilidade da ressonância na resolução do fenômeno de *sticking*.

1.3.2 Específicos

- Realizar a revisão bibliográfica de conceitos fundamentais como vibração, fenômeno de incrustação e método de elementos finitos;
- Determinar a metodologia a ser utilizada, para analisar a proposta de solução;
- Determinar o modelo CAD do sistema, vagão;
- Definir as propriedades do material e construção;
- Fazer a malha do modelo de elementos finitos;
- Definir as cargas e condições de restrição;
- Analisar os resultados;
- Estudar a viabilidade do projeto, bem como a estrutura do Trabalho.

1.4 Estrutura do trabalho

Além disso, na introdução deste trabalho, tem-se a formulação do problema, a justificativa para tal, assim como onde deseja-se chegar com os objetivos gerais e específicos.

No capítulo dois pretende-se analisar a fundamentação teórica do fenômeno da ressonância, com a modelagem de sistemas mecânicos.

Em seguida, o terceiro capítulo apresenta a metodologia e as ferramentas.

No capítulo 4 é apresenta resultados adquiridos pelo desenvolvimento do sistema de ressonância para controle da quantidade de minério incrustado.

No quinto e último capítulo, o presente trabalho procura demonstrar as conclusões sobre os benefícios da ressonância para resolução do fenômeno *sticking*, assim como sugestões para futuros projetos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Vibração

Segundo Graham (2017, p. 145), as vibrações podem ser consideradas:

Oscilações de um sistema mecânico ou estrutural em torno de uma posição de equilíbrio". As vibrações são iniciadas quando um elemento de inércia é deslocado da posição de equilíbrio em decorrência de energia inserida no sistema por meio de uma fonte externa, o que se denomina trabalho. Uma força restitutiva, ou uma força conservativa desempenhada por um elemento de energia potencial, puxa o elemento de volta ao equilíbrio.

Para Fernandes (2000), de modo geral, as vibrações classificam-se em segundo:

- Sinusoidais ou Periódicas Produzem-se quando os pontos de um corpo oscilante passam por posições regularmente dispostas (frequência e deslocamento de amplitude constante).
- Aleatórios ou Não Periódicas Sem ritmo de oscilações determinadas, denominam- se livres quando um corpo elástico é colocado fora da sua posição de equilíbrio e se deixam cessar completamente os movimentos oscilatórios (só podem ser definidas em termos estatísticos) - Análise de amplitude e densidade espectral.

A amplitude da vibração, que caracteriza e descreve a severidade da vibração, pode ser classificada de várias formas segundo Brady (2002):

Classificações	Analises	Utilização
Os valores de pico	Indicam os valores máximos, sem a duração ou tempo de movimento.	Níveis de impacto de curta duração
Os valores médios	Indicam apenas a média da exposição sem qualquer relação com a realidade do movimento	Releva um valor da quantidade física da amplitude em um determinado tempo
O valor da raiz média quadrática (RMS – Root Mean Square) ou valor eficaz	É a raiz quadrada dos valores quadrados médios dos movimentos e mostra a média da energia contida no movimento vibratório	-
O fator de forma e o fator de crista	Permitem conhecer a homogeneidade do fenômeno em estudo ao longo do período. Grandes valores para o fator de crista indicam a presença de fenômenos repetitivos a intervalos regulares;	-
O valor pico a pico	Indica a máxima amplitude da onda.	-

Tabela 1: Classificação das vibrações.

Fonte: Brady (2002).

2.1.1 Frequência Natural

Segundo Shigley (1969) frequência natural é um fenômeno que ocorre se um sistema, após um distúrbio inicial, é deixado para vibrar por si próprio, a frequência com a qual ele oscila sem a presença de forças externas é conhecida como sua frequência natural. Um sistema vibratório com "n" graus de liberdade terá, em geral, "n" frequências naturais distintas.

2.1.2 Ressonância

Conforme Rafael Helerbrock (2022), existem diversos tipos de ressonância como:

- Ressonância mecânica: aplicação de forças em um balanço oscilatório, fazendo-o oscilar com amplitudes cada vez maiores.
- Ressonância sonora: produção de harmônicos por instrumentos musicais. Ressonância elétrica: circuitos elétricos usados em televisões, rádios e celulares utilizam capacitores e indutores que podem ser ajustados para entrar em ressonância com as frequências das ondas de rádio. Dessa forma, é possível captar e aumentar a amplitude dessas ondas, reproduzindo as informações contidas nelas.
- Ressonância magnética: esse tipo de ressonância surge quando se aplica um campo magnético estático e de alta intensidade aos núcleos atômicos. Em seguida, um campo magnético oscilatório faz com que os campos magnéticos dos prótons entrem em ressonância, emitindo uma radiação capaz de produzir imagens nítidas de diferentes tipos de tecidos.
- Ressonância óptica: surge em cavidades refletoras e pode ser utilizada para aumentar a amplitude da luz, produzindo feixes luminosos de alta intensidade, como o laser.

Sendo o principal enfoque desse trabalho o estudo das vibrações mecânicas, que de acordo com RAO (2008), interpreta-se como ressonância mecânica a tendência do sistema físico em oscilar na sua máxima amplitude. Esta tendência depende da aproximação da frequência de excitação das frequências naturais do sistema. Estas frequências, mesmo as de pequena amplitude de excitação, conseguem produzir elevadas amplitudes de vibração no sistema, sendo possível até levar ao seu colapso.

Para Borobia (2012), a presença de grandes deslocamentos é um fenômeno indesejável, uma vez que provoca a aparição de tensões e deformações igualmente grandes que podem acarretar falha do sistema. Mas nem sempre a ressonância é um problema, pois, controlando as amplitudes com o amortecimento estas podem ser utilizadas para fins úteis.

Sendo que um dos fatos mais importantes ocorridos sobre o assunto foi a queda da ponte pênsil de Tacoma, na cidade americana, às margens do pacífico, que foi explicado por Andrade, Silvio (2019). Durante o século XIX, em todo mundo, caíram pelo menos dez pontes pênseis. O acidente ocorreu em 1940, com a ponte de Tacoma, três meses após a sua inauguração. Essa ponte tinha 2.800 metros de comprimento. Devido ao fenômeno da ressonância, a força do vento teria aumentado a oscilação natural da estrutura até que um valor máximo suportável pelo material foi atingido. Após esse limite, a estrutura entrou em colapso.

2.1.3 Sistema com N Graus de Liberdade

Segundo Borobia (2012), graus de liberdade ou coordenadas generalizadas de um sistema mecânico são os parâmetros independentes que definem a posição e a configuração deformada de tal sistema.

De acordo com Alves Filho (2013), nas estruturas reais, o analista estrutural se vê diante de um modelo representativo da estrutura formado por muitos elementos e, consequentemente, de muitos componentes de deslocamentos a determinar. A partir da aplicação da 2ª Lei de Newton serão geradas milhares de equações que traduzem o comportamento dinâmico dos graus de liberdade da estrutura e o meio mais eficaz de armazenar essas equações e processá-las é por intermédio de matrizes.

E ainda, em consenso com Alves Filho (2013), têm-se muitos componentes de deslocamentos nodais, velocidades nodais, acelerações nodais e forças nodais. A resolução desta questão pode ser representada pela Equação (1) na sua forma matricial, ou seja, para todos os graus de liberdade da estrutura.

$$[M] \times \{\ddot{U}\} + [C] \times \{U\} + [K] \times \{U\} = \{F_{(t)}\}$$
(1)

Onde:

[M] – Matriz de massa da estrutura

 $\{\dot{U}\}$ – Matriz das acelerações nodais

[C] – Matriz de amortecimento da estrutura

{U} – Matriz das velocidades nodais

[K] – Matriz de rigidez da estrutura

{U} – Matriz dos deslocamentos nodais

{F(t)} – Matriz das forças nodais variáveis com o tempo

Segundo Alves Filho (2013), o sistema de "n" graus de liberdade pode ser representado

pela:

Rigidez e massa associada a cada GDL, cada GDL apresenta um movimento de vibração livre que se processa harmonicamente, ou seja, cada GDL da estrutura durante uma vibração livre executa um Movimento Harmônico Simples (MHS). As massas associadas aos diversos GDL oscilam de modo

que atingem seus deslocamentos máximos simultaneamente e passam em seus pontos de equilíbrio do MHS também simultaneamente. Este estado de movimento que ocorre nas vibrações naturais é chamado de modo normal ou modo principal de vibração. Assim, todos os pontos nodais do modelo em elementos finitos vibram com a mesma frequência e harmonicamente, mas cada modo de vibrar tem o perfil e frequência próprios.

Portanto, para vibrações livres, a equação de movimento (1) reduz-se à Equação (2).

$$[\mathbf{M}] \times \{\ddot{\mathbf{U}}\} + [\mathbf{K}] \times \{\mathbf{U}\} = 0 \tag{2}$$

Para calcular os modos e frequências naturais da estrutura, aplica-se a equação de equilíbrio dinâmico do sistema vibrando harmonicamente (Equação 3).

$$([K] - \omega^2[M] \times \{U_o\}) = 0$$
(3)

Onde:

[K] – Matriz de rigidez da estrutura

 Ω – Frequência natural

[M] – Matriz de massa da estrutura

U_o-Matriz ou vetor de perfil associado ao modo de vibrar da estrutura

Conforme Alves Filho (2013), ao se calcular as frequências naturais e os modos de vibrar de uma estrutura utilizando um *software* de análise por elementos finitos, este considera nulo o amortecimento. Ainda, conforme Alves Filho (2013), mesmo pequeno, o amortecimento presente tem forte influência na resposta forçada da estrutura sob ação do carregamento dinâmico, como mostra a Figura 3.

Consoante com Alves Filho (2013), pode-se observar que as frequências de ressonância, correspondentes aos picos dos gráficos, praticamente não se alteram em função do amortecimento, quando ele é pequeno. Todas ocorrem em torno da relação de frequências igual a 1. O método de superposição modal consiste na transformação de coordenadas passando de geométricas para modais. Essa transformação admite trocar o sistema de "n" equações de movimento de um sistema acoplado para um sistema de equações independentes. Sendo assim, este método permite avaliar a resposta de qualquer estrutura elástica linear cujos deslocamentos são obtidos em função de um conjunto finito de "n" graus de liberdade onde são amortecidos e podem ser expressos por meio de relações de amortecimentos modais.



Figura 3: Esquema da vibração na zona de ressonância. Fonte: Alves Filho, 2013.

2.1.4 Controle das Frequências Naturais

Em concordância com Borobia (2012), a frequência de excitação coincide com uma das frequências naturais do sistema, ocorre um fenômeno de ressonância, a característica mais importante da ressonância é que dá lugar a grandes deslocamentos, amplificando de maneira importante as vibrações do sistema.

Para um sistema de um grau de liberdade, a frequência natural, ω_n , é dada pela equação

4.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{4}$$

A frequência natural pode ser alterada variando tanto a massa (m) como a rigidez (k) do mesmo. Ainda que a definição tenha sido estabelecida para um sistema de 1GDL, a conclusão obtida é, em geral, igualmente aplicável a sistemas de N graus de liberdade de acordo com Borobia (2012).

Em muitas situações, na prática, contudo, a massa não é fácil de mudar, já que seu valor costuma vir determinado pelos requerimentos funcionais do sistema, por exemplo, a massa do volante de inércia de um eixo vem determinada pelo valor da energia que se quer armazenar num ciclo. Assim, a rigidez do sistema é o parâmetro que se modifica de forma mais habitual na hora de alterar as frequências naturais de um sistema mecânico.

2.1.5 Sistemas Contínuos

Segundo Borobia (2012), em um meio contínuo, é impossível especificar sua posição ou sua configuração deformada com um número finito de graus de liberdade. Neste caso, são possíveis infinitos modos independentes de se deformar e para uma configuração deformada ficar definida há que se especificar a posição de cada ponto, exigindo infinitos parâmetros independentes.

De acordo com o RAO (2007), para um sistema de "n" grau de liberdade, haverá, no máximo, "n" distintas frequências naturais de vibração com uma forma correspondente a cada frequência natural. Um sistema contínuo, por outro lado, terá um número infinito de frequências naturais, com uma forma correspondente a cada frequência natural. Conforme exemplificado na Figura 4.



Figura 4: Sistema cantiléver. Fonte: Rao (2007).

2.2 Método de Elemento Finitos MEF

O desenvolvimento do MEF teve suas origens no final do século XVIII, quando Gauss propôs a utilização de funções de aproximação para a solução de problemas matemáticos (Oliveira, 2000). Durante mais de um século, diversos matemáticos desenvolveram teorias e técnicas analíticas para a solução de problemas, entretanto, pouco se evoluiu devido à dificuldade e à limitação existente no processamento de equações algébricas (Oliveira, 2000). O desenvolvimento prático desta análise ocorreu somente muito mais tarde em consequência dos avanços tecnológicos, por volta de 1950, com o advento da computação. Isto permitiu a elaboração e a resolução de sistemas de equações complexas (GALLAGHER, 1975).

Segundo Gallagher (1975), o MEF é uma análise matemática que consiste na discretização de um meio contínuo em pequenos elementos, mantendo as propriedades do meio original. Esses elementos são descritos por equações diferenciais e resolvidos por modelos matemáticos, para serem obtidos os resultados desejados.

A análise por MEF é realizada por meio de *softwares* como SolidWorks, ANSYS e PROCAL3D (sendo o ANSYS a ferramenta utilizada neste trabalho).

No *software*, o sólido inserido e que tem "infinitos" pontos acaba se tornando uma geometria que é "quebrada" em outras geometrias conhecidas e menores (como triângulos, hexaedros, tetraedros). Essa "quebra" facilita os cálculos para prever comportamentos dos materiais sólidos em diferentes condições, segundo Alves Filho (2013).

Imagine que o comportamento do sólido que está na Figura 5 à esquerda, precisa ser entendido sob determinadas condições. Ao inseri-lo em um desses *softwares* e aplicar o *Método dos Elementos Finitos* (MEF), ele será quebrado em geometrias menores e conhecidas (Figura 5 à direita).

Os elementos finitos são conectados entre si por pontos, conforme ilustrado na figura 6, os quais são denominados de nós ou pontos nodais. Ao conjunto de todos esses itens – elementos e nós – dá-se o nome de malha. Em função dessas subdivisões da geometria, as equações matemáticas que regem os comportamentos físicos não serão resolvidas de maneira exata, mas aproximadamente por este método numérico. A precisão do MEF depende da quantidade de nós e elementos, do tamanho e dos tipos de elementos da malha. Ou seja, quanto menor for o tamanho e maior for o número deles em uma determinada malha, maior a precisão nos resultados da análise.



Figura 5: Exemplo da discretização de uma peça por elementos quadriculados. Fonte: KOT Engenharia, 2022.



contorno original

Figura 6: Nós e elementos presentes em uma malha. Fonte: KOT Engenharia (2022).

O *software* calcula o comportamento de cada elemento/geometria individualmente, depois une tudo em uma "malha" para que se tenha o resultado do comportamento do sólido total, como foi mostrado na figura 6.

Em harmonia com Alves Filho (2013), a qualidade dos resultados de uma análise feita com o método de elementos finitos em simulador depende muito também da assertividade nas condições de contorno estabelecidas. Logo, o conhecimento teórico de quem está simulando é extremamente importante.

A figura 7 mostra como o método pode ser aplicado na resolução e diagnóstico de problemas de análise estrutural por meio da obtenção de deslocamentos, deformações e tensões, também permite representar diversos cenários e avaliar o desempenho de produtos com a

aplicação de critérios de resistência, rigidez ou fadiga. Além disso, variações do MEF viabilizam a análise térmica, acústica, dinâmica, eletromagnética e de fluidos para casos mais simples de comportamento linear ou outros não lineares, como quando há grandes deslocamentos ou contato entre partes de uma montagem.



Figura 7: Simulação de esforços no ANSY. Fonte: KOT Engenharia, 2018.



Figura 8: Processo de modelagem. Fonte: Alves Filho, 2013.

Com as tecnologias atuais realizar integrações com os *softwares* utilizados no desenvolvimento de representação geométrica – conhecidos como CAD (*Computer Aided Design*) – com os sistemas baseados no MEF – denominados de CAE, *Computer-Aided Engineerig*.

Segundo Alves Filho (2013), CAD é um *software* utilizado para auxiliar o trabalho de um projetista ou desenhista a partir de:

- Criação de projetos;
- Organização de documentos;
- Bancos de dados.

A tecnologia CAD é usada em diversas áreas. Desde a concepção de sistemas eletrônicos, em projetos mecânicos, indústria, arquitetura, engenharia, topografia e outros.

2.3 Vagões

Segundo a MRS (2022), vagões gôndola "GD" são os que transportam produtos que não necessitam de proteção contra as intempéries. É o mais comum no Brasil por ser o tipo mais utilizado no transporte de minérios, carvão mineral e coque, um modelo é apresentado nas Figuras 9,10 e 11.



Figura 9: Vista lateral de um vagão gôndola. Fonte: MRS (2022).



Figura 10: Vista superior de um vagão gôndola. Fonte: MRS (2022).



Figura 11: Vista frontal de um vagão gôndola. Fonte: MRS, 2022.

Os vagões são descarregados pelo virador ou *Rotary Car-Dumper*, que segundo o site Brasil Ferroviário (2022), é a denominação do equipamento que promove o giro de vagões GD com objetivo de descarregá-lo. Lembramos que os vagões GD são os do tipo gôndola, com descarregamento em virador. O giro obedece a um padrão de 180.º e a carga se descola do vagão pelo efeito da gravidade. A carga mais comum para esse tipo de descarregamento é o minério de ferro.

Os vagões, foco de estudo desse trabalho, são virados a cada 2 vagões GD, apresentando duas juntas moveis na extremidade, que permitem o giro de 180.°, e um conector fixo que confere rigidez ao sistema. Esses conectores podem ser identificados nas Figuras 7, 8 e 9.



Figura 12: Virador de vagões. Fonte: Metso construirá virador de vagões - Revista In The Mine (2022).

2.4 Sticking

2.4.1 Efeitos microscópicos da umidade em materiais particulados

A presença de umidade em um material particulado tem efeitos macro e microscópicos que influenciam em seu comportamento na totalidade. Isto pode ser explicado pelas interações químicas, elétricas e de interface entre o fluido e as partículas. Pode-se classificar o sistema sólido-líquido em quatro estados diferentes, como exemplificados na Figura 13.



Figura 13: Características das ligações em particulados úmidos. Fonte: GRAÇA, *et al.*, 2015.

Estes estados dependem do teor de umidade, isto é, da quantidade de água presente no sistema sólido líquido, portanto quanto maior o teor de umidade, mais fortes serão as interações, conferindo diferentes propriedades para cada estado descrito acima.

Este estado, também é função da morfologia do material, pois, a irregularidade intrínseca das partículas é função da sua origem, composição, arranjo cristalino e do processo de cominuição aplicado (GRAÇA, et al., 2015). Estes parâmetros afetam a superfície das

partículas e isto tem influência direta no comportamento do material em relação à umidade, isto é, para o mesmo teor de umidade o material pode se comportar como polpa ou como sólido. Estes são efeitos explicados pela adesão.

2.4.2 Adesão

Pode-se explicar a adesão como a atração entre dois corpos sólidos em contato. Ela é produzida pela existência de forças atrativas intermoleculares de ação a curta distância. Os principais componentes da força de adesão são as forças Eletrostática, Capilar e de Van der Waals (RUMPF, 1977), sendo a última a mais importante. os componentes da força de aderência, em teoria, são afetadas pelo material, pela aspereza da superfície, pela forma, pela duração do contato, pelo tamanho da partícula e pela velocidade inicial do contato (FELICETTI, 2004).

Estas forças influenciam na resistência à tração teórica σ do aglomerado, que pode ser expressa pela Equação 5 (KENDALL, et al., 1986):

$$\sigma = \frac{3 \times \pi \times W}{8D} \tag{5}$$

Onde W é o trabalho realizado pela força de adesão e D é o diâmetro da partícula. Vale notar que nesta equação, a força de resistência a tração aumenta com a diminuição do tamanho da partícula. O que resulta no fenômeno do *sticking*, mostrado na figura 14.



Figura 14: Sticking. Fonte: MRS, 2022

3 METODOLOGIA

Nesta seção são apresentados os meios para obter os objetivos da pesquisa. O conteúdo deste capítulo contém o tipo de pesquisa, os materiais e métodos utilizados, variáveis e indicadores, instrumentos de coleta de dados, tabulação dos dados e as considerações finais.

3.1 Tipos de pesquisa

Para Prodanov e Freitas (2013, p. 42), pesquisa científica é definida como "realização de um estudo planejado, sendo o método de abordagem do problema caracterizando o aspecto científico da investigação". De acordo com Gil (2002) o objetivo da pesquisa é procurar respostas aos problemas propostos. Para isso desenvolve-se em um processo com diversas fases desde a formulação do problema até a apresentação dos resultados.

A pesquisa pode ser classificada quanto à natureza, quanto aos objetivos e quanto aos procedimentos. Para a classificação devido à natureza, segundo Prodanov e Freitas (2013) pode ser pesquisa quantitativa quando se traduz em números, opiniões e informações para o posterior tratamento desses dados em que requer o uso de técnicas estatísticas. Ou, como pesquisa qualitativa, no qual, os dados coletados são descritivos e o ambiente, por sua vez é a fonte direta dos dados, dessa maneira, a preocupação é maior com o processo do que com o produto.

Do ponto de vista dos objetivos é dividido em três tipos, exploratória, descritiva e experimental. A exploratória cogita tornar o problema mais familiar, deixando-o mais claro ou construindo novas hipóteses para pesquisas futuras (GIL, 2002). Descritivas segundo Prodanov e Freitas (2013) é quando apenas registra e descreve características dos fatos observados sem interferência. Já a pesquisa experimental busca a relação entre causa e efeito pela manipulação das variáveis do objeto de estudo, normalmente realizada em laboratório (MARCONI; LAKATOS, 2003).

Para classificação, segundo os procedimentos: são levantados os dados, podendo ser, principalmente, por meio de questionários, entrevistas, observação, documental e bibliográfica. Esta última, segundo Marconi e Lakatos (2003) a pesquisa bibliográfica parte de todo material que se tornou público buscando a abordagem de um tema sob uma nova abordagem para chegar em conclusões inovadoras.

Contudo, o presente trabalho pode ser classificado como pesquisa bibliográfica, já que é fundamentada em artigos, livros, dissertações e teses publicadas com caráter exploratório e descritivo. Por isso, objetiva-se aprofundar o conhecimento a respeito do uso do fenômeno da ressonância na incrustação de minério nos vagões gôndola, bem como descrevê-lo quantitativa, já que se traduz em numerosas opiniões e informações para o posterior tratamento desses dados que neste caso, exige o uso de técnicas estatísticas.

3.2 Matérias e Métodos

Método é a "forma de pensar para chegarmos à natureza de determinado problema, quer seja para estudá-lo ou explicá-lo" Prodanov, (p.126, 2013). Este trabalho foi realizado conforme fluxograma da Figura 15.



Figura 15: fluxograma das atividades desenvolvidas no presente estudo. Fonte: Autor, 2023.

3.2.1 Construção da Geometria

Conforme apresentado na figura 15, o primeiro passo para o estudo foi a revisão bibliográfica. A partir dela foi possível a obtenção do conhecimento necessário para o desenvolvimento das etapas seguintes.

Em seguida, a segunda etapa consistiu no desenvolvimento da geometria do vagão a partir do *software* SolidWorks. A figura 16 apresenta a modelagem do vagão.



Figura 16 – Modelagem CAD do vagão. Fonte: Autor, 2023.

Após concluída a segunda etapa, desenvolveram-se os modelos numéricos em elementos finitos. Para isto, realizou-se a malha do mesmo a partir do *software* Ansys.

3.2.2 Construção do Estudo

Realizou-se um sequenciamento para ser possível determinar as frequências e resposta da estrutura composta pelo modelo do vagão e chapa, composto por 3 etapas, como pode ser observado na figura 17.

-	_	A				-	В			-	-	С		100
1	222	Static Structural				1	Modal			1	~	Harmonic Response		
2		Engineering Data	~	-		2	Engineering Data	~		- 2		Engineering Data	~	-
3	${f P}$	Geometry	~			3	Geometry	~	4	- 3	P	Geometry	~	
4		Model	~	-	-	4	Model	1	a	- 4		Model	~	
5		Setup	~		-	5	Setup	~		- 5		Setup	~	
5		Solution	~	-	-	6 6	Solution	~	-	6		Solution	1	
7	1	Results	~			7 6	Results	~	-	7		Results	1	-
3	(p.)	Parameters				8 🕻	Parameters			> 8	Cp.	Parameters		
		Static Structural					Modal					Harmonic Response		

Figura 17 – Montagem do estudo. Fonte: Autor, 2023.

A primeira consiste em uma análise estática que é um modelo de simulação que não possui histórico interno de valores de saída e entrada que foram aplicados anteriormente. Também representa um modelo em que o tempo não é um fator. O modelo de simulação estática é executado definindo os parâmetros das equações como as condições de engaste, seguido pela adição dos valores das entradas necessárias tal como o carregamento que a estrutura está sofrendo. A próxima etapa é avaliar os dados que produzirão um conjunto de resultados. Esses resultados são vistos como um 'instantâneo' de uma resposta do sistema se as condições de entrada especificadas forem aplicadas.

A segunda análise realizada é a modal que consiste na determinação dos efeitos das vibrações. Esse tipo de análise usa a massa e a rigidez de uma estrutura para encontrar os pontos de ressonância natural de um componente.

E por último a análise harmônica para obter a solução para a resposta de pico em estado estável no intervalo de frequência operacional desejado. Após a execução do estudo, você pode visualizar amplitudes de pico de parâmetros de resposta (tensões, deslocamentos, acelerações, velocidades), bem como os gráficos de resposta de ângulos de fase dos parâmetros da resposta durante o intervalo de frequências operacionais, determinados na análise modal.

3.2.3 Estudo do Modelo

Realizado o estudo da estrutura da figura 16, foram encontradas as 10 primeiras frequências naturais em que são mostradas na tabela 2.

	Frequências Naturais da Estrutura									
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10									10	
722,84	853,74	919,14	957,06	1273,65	1387,99	1405,19	1560,78	1574,39	1794,91	
Hz	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz	
T (A (2022									

Tabela 2 – Frequências Naturais da Estrutura.

Fonte: Autor, 2023.

Após análise, tornou -se possível averiguar que em frequências acima de 1.400 Hz, parte da estrutura da linha de freio começa a sofrer deformações. Isto é um resultado insatisfatório, devido a danos a componentes vitais, como atuadores pneumáticos e a redução da capacidade de frenagem, como é apresentado na figura 18.



Figura 18 – Deslocamento do Modelo. Fonte: Autor, 2023.

Com esses dados foi possível estabelecer uma faixa de frequências a serem estudadas que vai de 0 Hz a 1.400 Hz.

As propriedades do material, o aço *ASTM 242 A*, caracterizado por ter aplicação estrutural, como em chapa, barra, etc. É um aço de baixa liga e alta resistência, com especial resistência a corrosão atmosférica. Esse aço é utilizado na confecção dos vagões, bem como é utilizado nas chapas, dado que já e validado e possui o conjunto de características ideias.

Tabela 3: Caracterização do material.							
	ASTM 242 A						
	Densidade de massa	7,9 g/cm ³					
Geral	Resistência a escoamento	350 Mpa					
	Resistência máxima à tração	480 Mpa					
	Módulo de Young	200 Gpa					
Tensão	Coeficiente de Poisson	0,287 s_m					
	Módulo cortante	77,7001 Gpa					

Fonte: Autor, 2023.

3.2.4 Chapas

Considerando a hipótese de adição de um conjunto de chapas que excitadas a uma determinada frequência vibrará retirando as incrustações da parede do vagão, foi possível criar parâmetro essências para tornar a aplicação dessas estruturas viáveis, como o custo, condições operacionais e uma geometria que conseguisse ser sintonizada a faixa de frequência desejada.

Determinou-se o modelo de chapa com a geometria apesentada na figura 19, tendo em vista o melhoramento econômico e ajuste com o projeto, sendo de conhecimento que as paredes laterais do vagão possuem 3,18 mm ou 1/8 pol.

Criou-se um modelo de 500 mm por 500 mm tendo, 8.665 mm, a parede lateral tem 3,18 mm ou 1/8 pol. e o assoalho tem 4,76 mm ou 3/16 pol., com raio interno de 300 mm. As traves laterais possuem uma seção de 60 mm por 50 mm com espaçamento de 664,25 mm. O modelo de chapa é apresentado na figura 19, e o da malha na figura 20.



0,250

0,375

0,500 (m)



3.2.5 Condições de Contorno

Aplicou-se a todos os modelos a mesma carga estática de 50 kN na chapa, e para análise da frequência harmônica duas cargas de 5 kN nas traves laterais, a fim de garantir a aproximação com a realidade, conforme mostrado nas figuras 21 e 22.

0,125

0.000



Figura 21: Carga estática de 50 kN. Fonte: Autor, 2023.



Figura 22: Força de 5 kN nas traves laterais. Fonte: Autor, 2023.

3.3 Variáveis e Indicadores

Segundo Gil (2008), as variáveis são definidas por diferentes aspectos e valores, dependendo da situação e do caso particular. Para o presente trabalho, a Tabela 4 apresenta a variável utilizada e seus respectivos indicadores.

Sendo que, os indicadores são métodos de representação quantitativos, que fornecem as características de um produto ou processo (TAKASHINA, 1997).

Variáveis	Indicadores
Modelagem	Tipo de matérias Especificações técnicas
Simulação	Módulos de vibração Frequência natural Deslocamento Movimentação das chapas
Resultados	Eficiência Ganhos

Tabela 4: Variáveis e indicadores.

Fonte: Autor, 2023.

3.4 Instrumento de Coleta de Dados

De acordo com Gil (2002), uma coleta de dados pode ser realizada de várias maneiras, como, por exemplo, partir da observação, questionários, entrevistas, entre outros. Sendo assim, a coleta de dados realizada no presente estudo foi feita a partir da utilização dos *softwares* SolidWorks e Ansys.

3.5 Tabulação dos dados

Para a tabulação dos dados utilizou-se o *software* Excel para a elaboração de tabelas e gráficos a partir dos dados obtidos das simulações. Além disto, o Word também foi utilizado para descrever e explicar os resultados obtidos e documentar todas as conclusões obtidas nas simulações.

3.6 Considerações Finais do Capítulo

Neste capítulo abordou-se os tipos de pesquisa utilizados para a execução do estudo, assim como a metodologia utilizada para o desenvolvimento do mesmo. Além disto, foram abordados também os *softwares* empregues para o desenvolvimento da pesquisa. A seguir, no próximo capítulo, são apresentados os resultados obtidos nas simulações, bem como a comparação entre esses testes.

4 RESULTADOS

O trabalho, leva em consideração a frequência de 60 Hz, como possivelmente a faixa mais comum de trabalho para motores que exijam grandes torques, sendo os de 8 polos e velocidade de operação de 900 RPM. Sendo assim todas as análises levam em consideração a otimização do resultado nessa faixa de resposta.

4.1 Análises Modal e Harmônica dos Sistemas

Realizou-se a modelagem de 4 sistemas diferentes, variando a posição e a configuração de engaste na chapa lateral. Variou-se primeiramente a localização das chapas, sendo duas configurações, uma com a estrutura localizada na parte superior da curvatura do vagão como é apresentado na figura 23 e 24, e outra no meio da curvatura figura 25 e 26. E posteriormente foi variada o engaste da armação, onde a figura 24 e 26 a mesma se encontra ligada na mesma posição dos reforçadores laterais, e na figura 23 e 25 está conectada entre as traves laterais.



Figura 23: Modelo 1: Chapas na borda superior da curvatura, entre os reforços. Fonte: Pesquisa direta, 2023.



Figura 24: Modelo 2: Chapas na borda superior da curvatura, nos reforços. Fonte: Pesquisa direta, 2023.



Figura 25: Modelo 3: Chapas na curvatura, entre os reforços Fonte: Pesquisa direta, 2023.



Figura 26: Modelo 4: Chapas na curvatura, nos reforços. Fonte: Pesquisa direta, 2023.

As análises modais serviram para identificar as cinquenta primeiras frequências naturais do sistema. A figura 27 apresenta as frequências encontradas para as quatro modelagens simuladas.



Figura 27: Gráfico de Frequências Naturais. Fonte: Pesquisa direta, 2023.

Observou-se que todos os modelos apresentam uma faixa de frequência no limite estabelecido, posteriormente é analisado o modulo de vibração dos modelos. É mostrada a resposta da frequência natural na figura 28.



Figura 28: Resultado da frequência natural de um modelo Fonte: Pesquisa direta, 2023.

4.1.1 Análise de Tensão

Considerou-se que, a tensão de escoamento é a menor tensão. Ela pode ser aplicada e, se removida, o material retrocede a sua geometria inicial. A análise dos gráficos fornece essa tensão para cada frequência.

- Figura 29: Mostra as tensões do modelo 1, que é caracterizado pelas chapas posicionadas na parte superior da curvatura, engastada entre os reforçadores laterais, como foi estipulado a frequência de 60 Hz, o valor máximo de tensão encontrado nessa faixa foi de 188,05 Pa.
- Figura 30: Mostra as tensões do modelo 2, que é caracterizado pelas chapas posicionadas na parte superior da curvatura, engastada nos reforçadores laterais, o valor máximo de tensão encontrado é de 13.529 Pa.
- Figura 31: Mostra as tensões do modelo 3, que é caracterizado pelas chapas posicionadas no meio da curvatura, engastada entre os reforçadores laterais, o valor máximo de tensão encontrado é de 408,43 Pa.
- Figura 32: Mostra as tensões do modelo 4, que é caracterizado pelas chapas posicionadas na parte superior da curvatura, engastada nos reforçadores laterais, o valor máximo de tensão encontrado é de 540,5 Pa.

Dessa forma, inferiu-se que quanto menor esse valor, melhor é a resposta do sistema, já que apresentará uma vida útil maior, o que ajuda a preservar sua forma e por consequência, a sua eficiência. Tendo em vista esses fatores, observa-se que o modelo que merece atenção nesse comportamento, é o modelo 1, pois apresenta uma boa resposta em valores de frequências mais baixas.



Figura 29 – Tensão encontrada no modelo 1. Fonte: Pesquisa direta, 2023.



Figura 30: Tensão encontrada no modelo 2. Fonte: Pesquisa direta, 2023.



Figura 31: Tensão encontrada no modelo 3. Fonte: Pesquisa direta, 2023.



Figura 32: Tensão encontrada no modelo 4. Fonte: Pesquisa direta, 2023.

Posterior a avaliação de todos os gráficos, foi adotado a um esquema para facilitar a avaliação de todas as informações que é mostrado na figura 33.



Figura 33: Gráfico comparativo de tensão entre os modelos. Fonte: Autor, 2023.

4.1.2 Análise de Alongamento

O alongamento, é o acréscimo percentual em comprimento da parte útil do corpo de prova ensaiado.

- Figura 33: Mostra o alongamento do modelo 1, de forma análoga a análise de tensões, esse protótipo apresenta um prolongamento máximo de 1,2542e-9 m/m.
- Figura 34: Mostra o alongamento do modelo 2, que apresenta um prolongamento máximo de 4,9214e-8 m/m.
- Figura 35: Mostra o alongamento do modelo 3, que apresenta um prolongamento máximo de 1,2828e-9 m/m.
- Figura 36: Mostra o alongamento do modelo 4, que apresenta um prolongamento máximo de 3,0874e-9 m/m.

Após a análise, determinou-se que, quanto maior o alongamento, melhor seria o resultado, já que o material teria uma ductilidade maior, sendo é a faixa de resposta na fase elástica - determina que um corpo pode retornar ao seu estado inicial após a aplicação de uma força, sem o rompimento, então o modelo 4, foi o que obteve o melhor desempenho.



Figura 34: Alongamento encontrada no modelo 1. Fonte: Pesquisa direta, 2023.



Figura 35: Alongamento encontrado no modelo 2. Fonte: Pesquisa direta, 2023.



Figura 36: Alongamento encontrado no modelo 3. Fonte: Pesquisa direta, 2023.



Figura 37: Alongamento encontrado no modelo 4. Fonte: Pesquisa direta, 2023.

Posterior a avaliação de todos os gráficos, foi adotado a um esquema para facilitar a avaliação de todas as informações que é mostrado na figura 38.



Gráfico Comparativo de Alongamento

Figura 38: Gráfico comparativo de alongamento entre os modelos. Fonte: Autor, 2023.

4.1.3 Análises de Deformação

Para a maioria dos materiais, a deformação elástica ocorre até valores próximos a 0,005 segundo a literatura. Ao passar desse valor a tensão aplicada no material não é mais proporcional, ocorrendo então uma deformação permanente não recuperável, ou, deformação plástica. Observou-se que os modelos permanecem na margem de deformação recuperável.

- Figura 37: Mostra a deformação do modelo 1, adotando os mesmos critérios das análises anteriores, esse padrão de chapa apresenta uma variação máxima de 1,6955e-11 m.
- Figura 38: Mostra a deformação do modelo 2, que apresenta um valor máximo de 3,3053e-10 m.
- Figura 38: Mostra a deformação do modelo 3, que apresenta um valor máximo de 3,6224e-11 m.
- Figura 38: Mostra a deformação do modelo 3, que apresenta um valor máximo de 2,0933e-10 m.

Outro ponto ressaltado, é que para criar o efeito de: quebrar as placas de minério. Seria esperado uma maior deformação, atingida pelo modelo 2,



Figura 39: Deformação encontrada no modelo 1. Fonte: Pesquisa direta, 2023.



Figura 40: Deformação encontrada no modelo 2. Fonte: Pesquisa direta, 2023.



Figura 41: Deformação encontrada no modelo 3. Fonte: Pesquisa direta, 2023.



Figura 42: Deformação encontrada no modelo 4. Fonte: Pesquisa direta, 2023.

Posterior a avaliação de todos os gráficos, foi adotado a um esquema para facilitar a avaliação de todas as informações que é mostrado na figura 43.



Figura 43: Gráfico comparativo de deformação entre os modelos. Fonte: Autor, 2023.

Na figura 44 é possível observar o comportamento da chapa a uma excitação harmônica, onde a mesma apresenta uma deformação na faixa de frequência de 54 Hz, ficando dentro do esperado.



Figura 44: Resposta Harmônica do Modelo 3. Fonte: Autor, 2023.

4.1.4 Tensão de Von Mises

O estudo da tensão de Von Mises permite saber quando um material dúctil começa a escoar em um local onde essa tensão torna-se igual ao limite de tensão. Para analisar todas as frequências, afim dê-se determinar o ponto onde essa tensão seria máxima, assim garantindo que toda estrutura teria o comportamento esperado e não escoasse. Com isso foi feita a tabela 05.

	Frequência (Hz)	Maior Tensão (MPa)	Tensão de Escoamento do Material (MPa)	% da Tensão
Modelo 1	324	22,496	350	6%
Modelo 2	170	574,95	350	164%
Modelo 3	288	13,003	350	4%
Modelo 4	297,5	76,714	350	22%

Tabela 5: Comparativo da tensão de Von Mises.

Fonte: Autor, 2023.

Onde observou-se que o modelo 2, escoaria na frequência de 170 Hz, o tornando inadequado para a aplicação. Vale ressaltar que isso pode ser um erro da malha, devido à tensão ser muito elevada em apenas um elemento. Todos os outros modelos se mostraram dentro do esperado, onde a maior tensão encontrada representa apenas 22% do limite de escoamento. O melhor modelo foi o 3, com um valor máximo de 4%.

4.2 Avaliação de resultados

Foi possível observar que a cada analise, um modelo apresentou características superiores aos outros, foi necessário realizar uma ponderação, sendo apresentado uma tabela comparativa.

	Tabela 6: Quadro comparativo											
	QUADRO COMPARATIVO											
	Tensão (Pa)	Alongamento (m/m)	Deformação (m)	Tensão de Von Mises (Mpa)								
Modelo 1	188,05	1.2542E-09	1.6955E-11	22,496								
Modelo 2	13529	4.9214E-08	3.3053E-10	574,95								
Modelo 3	408,43	1.2828E-09	3.6224E-11	13,003								
Modelo 4	540,5	3.0874E-09	2.0933E-10	76,714								

Fonte: Autor (2023).

Foram criados critérios para escolher o melhor modelo, que são apresentados em sequência, vale ressaltar que cada ponto tem uma faixa de frequência que é avaliada, afim de se garantir a aplicabilidade dos modelos bem como a resposta otimizada, o 1° critério leva em consideração todo o espectro de frequência, afim de garantir sua utilização em todas as faixas e os demais são calculados em torno de 60 Hz para garantir uma resposta na faixa operacional do motor.

- Respeitar o critério de Tensão de Von Mises: Sendo o modelo 2 descartado, e todos os outros ficando dentro do resultado esperado.
- Ter a maior deformação possível: Nesse aspecto o modelo 4 teve o melhor resultado.
- 3. Menor tensão: O modelo 1 obteve um resultado superior aos outros.
- 4. Maior alongamento: O modelo 4 foi proeminente.

Após a ponderação de todos os resultados, foi possível observar que o modelo 4, que é caracterizado pelas chapas posicionadas na parte superior da curvatura, engastada nos reforçadores laterais, seria mais adequado para a aplicação, embora tenha uma tensão maior que o modelo 1, ela ainda está dentro dos parâmetros aceitáveis, sendo reforçado pelo critério de Von Mises, onde foi obtido apenas 22% da resistência total do material.

5 CONCLUSÃO

5.1 Conclusões

O objetivo deste trabalho consiste em realizar o estudo de uma série de estruturas metálicas auxiliares com frequências naturas sintonizada a estrutura inserida via MEF. Com isso, foi possível realizar simulações computacionais e gerar uma série de dados a partir da vibração mecânica das modelagens. Em seguida, foi possível determinar a frequência natural de cada modelo, bem como a resposta harmônica, após aplicação de uma carga estática e uma força na estrutura.

A partir dos resultados, foi observado uma diferença entre os valores de tensão de Von Mises entre os métodos, assim como na tensão, alongamento e deslocamento. Quando comparados em pares, constatou-se que o modelo 4 apresenta um desempenho superior em relação aos outros. Isso indica que uma forma de modificação da posição e ancoragem é mais eficiente do que a outra, e podem estar ligadas aos maiores valores de deslocamento.

Dessa forma conclui-se experimentalmente que o uso de chapas pode ser uma solução viável para o problema de incrustação de minério nos vagões. Vale ressaltar a necessidade de validação de forma empírica esse modelo, de forma a validar as análises.

5.2 Trabalhos Futuros

Como propostas para trabalhos futuros tem-se:

- Estudo a respeito dos viradores de vagões, afim de se determinas a verdadeira faixa de vibração dessas estruturas;

- Investigação de uma metodologia, tal como o uso de marteletes pneumáticos acoplados a estrutura de viragem dos vagões;

- Realizar um estudo sobre modelos numéricos de incrustação;

- Realizar avaliações experimentais para validar os modelos.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALVES FILHO, A. Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE. Érica, São Paulo, 2000.

_____, A. Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE – Análise Dinâmica. Érica, São Paulo, 2013.

ALL, S. **Virador de Vagões (Rotary Car-Dumper)**. Disponível em: https://www.brasilferroviario.com.br/virador-de-vagões-car-dumping/. Acesso em: 24 ago. 2022.

_____. **Virador de Vagões (Rotary Car-Dumper)**. Disponível em: https://www.brasilferroviario.com.br/virador-de-vagões-car-dumping/. Acesso em: 24 ago. 2022.

BOROBIA, J. P. Elemento de Máquinas y Vibraciones. 3 Ed. Argentina: McGraw-Hill, 2012.

ENGENHARIA, K. **Método dos Elementos Finitos (MEF): você sabe o que é?** Disponível em: https://kotengenharia.com.br/para-leigos-entenda-o-metodo-dos-elementos-finitos/. Acesso em: 25 set. 2022.

FELICETTI, M. A. Determinação da força de adesão entre partículas e uma superfície aplicando a técnica centrífuga. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 2004

GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. São Paulo, v. 5, n. 61, p. 16–17, 2002. 18

GRAÇA, L. M. et al. Effect of the Morphological Types in Grinding of Iron-Ore Products. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review**, p. 324-331, 2015.

HELERBROCK, R. **Ressonância**. Disponível em: https://brasilescola.uol.com.br/física/ressonância.htm. Acesso em: 31 ago. 2022.

KENDALL, K, ALFORD, M. & BIRCHALL, J.D. **The strength of green bodies**, Br Ceram. Proc, v.37, p. 255-265, 1986.

MARCONI, M. d. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. [S.l.]: 5. ed.-São Paulo: Atlas, 2003. 18, 30

MIRLISENNA, G. O que é o Método dos Elementos Finitos e como ele é usado na simulação. Disponível em: https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>. Acesso em: 25 set. 2022.

MRS. **QUEM SOMOS**. Uma ferrovia de padrão internacional. Disponível em: https://www.mrs.com.br/empresa/quem-somos/. Acesso em março de 2023.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. de. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**-2.ª Edição. [S.l.]: Editora Feevale, 2013. 18, 19

RAO, S. S. **Vibrações Mecânicas 4**. Ed. São Paulo: Pearson Prentice-Hall, 2008. SHIGLEY, J. E. Dinâmica das máquinas; trad. Mauro Ormeu C. Amorelli. - São Paulo: Edgard Blücher, 1969.

RUMPF, H., Particle Adhesion, em: Sastra, K.V.S. (Ed.) agglomeration 77, American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, New York, p. 97-129, 1977.

SHIGLEY, J. E. **Cinemática dos mecanismos**; tradutores Mauro Ormeu Cardoso Amorelli, Omar Moore de Madureira. - São Paulo : E. Blucher : Ed. da Universidade de São Paulo, c1965.

Setor ferroviário brasileiro: Qual é a sua importância! Disponível em: https://massa.ind.br/setor-ferroviário-brasileiro/. Acesso em: 24 ago. 2022.

Simulação de CAE. Disponível em: https://www.plm.automation.siemens.com/global/pt/products/simulation-test/caesimulation.html. Acesso em: 25 set. 2022.

WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. **Vibração**. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Vibra%C3%A7%C3%A3o&oldid=62264262.