

LUCAS EDUARDO DA SILVA ROCHA

**Análise estrutural de monovia para carregamento de
minério utilizando elementos finitos**

Lucas Eduardo da Silva Rocha

**Análise estrutural de monovia para carregamento de
minério utilizando elementos finitos**

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. Fernando de Azevedo Silva

R672a	<p>Rocha, Lucas Eduardo da Silva</p> <p>Análise estrutural de monovia para carregamento de minério utilizando elementos finitos / Lucas Eduardo da Silva Rocha – Guaratinguetá, 2019. 48 f : il. Bibliografia: f. 48</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2019. Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva</p> <p>1. Análise estrutural (Engenharia) 2. Análise de elementos finitos. 3. Indústria mineral. I. Título.</p> <p>CDU 624.04</p>
-------	--

Luciana Máximo

Bibliotecária CRB-8/3595

LUCAS EDUARDO DA SILVA ROCHA

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

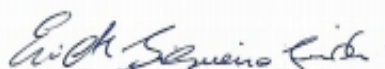
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins
Coordenador

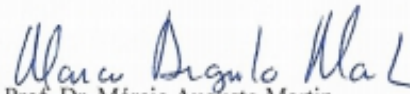
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva
Orientador/UNESP-FEG



Prof. Dr. Erick Siqueira Galdi
UNESP-FEG



Prof. Dr. Márcio Augusto Martin
UNESP-FEG

Dezembro de 2019

DADOS CURRICULARES

LUCAS EDUARDO DA SILVA ROCHA

NASCIMENTO 28.03.1994 – São José dos Campos/ SP

FILIAÇÃO Samuel Corrêa da Rocha
Sirlei da Silva Rocha

2014/2019 Graduação em Engenharia Mecânica
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá
Universidade Estadual Paulista

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me concedido saúde e me dado condições para chegar até aqui.

Aos meus pais Samuel e Sirlei por me darem o apoio e incentivos necessários para concluir meu curso.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva, pelo apoio, ensino de qualidade e comprometimento.

Aos meus amigos da República Sinagoga pelo companheirismo e por momentos alegres que passamos juntos.

Aos professores e funcionários da FEG, que com dedicação se dispuseram a participar da minha formação. Todos contribuíram para que eu chegasse até aqui.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo realizar a análise estrutural de uma monovia utilizada na indústria mineradora para carregamento de minério. Primeiramente é feita a avaliação da monovia utilizada em campo, considerando-se as tensões e os autovalores de flambagem. Após essa avaliação, é realizada uma proposta de reforço estrutural, para que as tensões fiquem abaixo do admissível, por norma. Após a proposta de reforço, é feita uma nova avaliação para considerar as novas tensões e os novos autovalores de flambagem, para que assim a estrutura seja aprovada.

PALAVRAS-CHAVE: Elementos finitos. Análise estrutural. Monovia. Mineração.

ABSTRACT

This work aims to perform the structural analysis of a beam used in the mining industry for ore loading. First, the evaluation of the beam used in the field is made, considering the stresses and buckling eigenvalues. Following this assessment, a structural reinforcement proposal is made so that the stresses are below the permissible standard. After the reinforcement proposal, a new evaluation is made to consider the new stresses and the new buckling eigenvalues, so that the structure is approved.

KEYWORDS: Finite elements. Structural analysis. Beam. Mining.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Malha de um chute de descarga em elementos finitos.....	14
Figura 2 - Etapas da solução de um problema utilizando o método de elementos finitos.....	15
Figura 3 - Malha de elementos finitos de estrutura de chassi de caminhão.....	16
Figura 4 - Malha de elementos finitos de um transportador (indústria mineradora).....	17
Figura 5 - Malha de elementos finitos de uma panela de aciaria (indústria siderúrgica).....	18
Figura 6 - Viga em perfil I.....	19
Figura 7 - Viga em perfil U.....	19
Figura 8 - Estrutura da monovia para carregamento de minério.....	20
Figura 9 - Estrutura da monovia - Coluna de apoio presa ao chão e perfil I entre coluna e monovia.....	21
Figura 10 - Estrutura da monovia - Coluna tubular presa ao teto.....	21
Figura 11 - Estrutura da monovia - Talha elétrica.....	22
Figura 12 - Modelo de elementos finitos - vista isométrica.....	24
Figura 13 - Modelo de elementos finitos - Tubo sobre viga.....	24
Figura 14 - Modelo de elementos finitos - Viga I entre monovia e coluna de apoio.....	25
Figura 15 - Modelo de elementos finitos - Condições de contorno.....	26
Figura 16 - Coeficiente dinâmico recomendado pela norma NBR 8400.....	27
Figura 17 - Carregamento 2 (LC2) – Talha carregada no centro da monovia.....	29
Figura 18 - Tensões (von Mises) [Pa] – LC51 (Carga de içamento no centro).....	31
Figura 19 - Tensões (von Mises) [Pa] – LC54 (Carga admissível de içamento no centro).....	31
Figura 20 - Tensões (von Mises) [Pa] – LC53 (Carga lado apoio).....	32
Figura 21 - Deslocamento resultante [m] – Configuração deformada em escala LC51.....	33
Figura 22 - Deslocamentos máximos recomendados segundo norma NBR 8800.....	33
Figura 23 - Tensões (von Mises) [Pa] – LC51 (Carga admissível de içamento no centro) - Plotagem limitada no admissível.....	34
Figura 24 - Modo de flambagem ($\lambda = 3,39$) LC51 – Configuração deformada.....	36
Figura 25 - Modo de flambagem ($\lambda = 15,52$) LC53 – Configuração deformada.....	36
Figura 26 - Seção transversal da monovia reforçada.....	38
Figura 27 - Modelo reforçado da monovia.....	38
Figura 28 - Comprimento das chapas de reforço.....	38
Figura 29 - Tensões (von Mises) [Pa] – LC51 (Carga de içamento no centro).....	40
Figura 30 - Tensões (von Mises) [Pa] – LC52 (Carga de içamento em balanço).....	40

Figura 31 - Tensões (von Mises) [Pa] – LC53 (Carga lado apoio).....	41
Figura 32 - Deslocamento resultante [m] – Configuração deformada em escala LC51.....	42
Figura 33 - Modo de flambagem ($\lambda = 3,63$) LC51 – Configuração deformada.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características do equipamento.....	22
Tabela 2 – Características do material empregado - Aço ASTM A36.....	22
Tabela 3 – Espessuras do equipamento [mm].....	23
Tabela 4 – LC1 - Peso próprio.....	27
Tabela 5 – LC2 - Carga de içamento no centro.....	28
Tabela 6 – LC3 - Carga de içamento em balanço.....	28
Tabela 7 – LC4 - Carga de içamento próximo ao apoio.....	28
Tabela 8 – LC5 - Carga admissível de içamento no centro.....	28
Tabela 9 – Tensões máximas (von Mises).....	30
Tabela 10 – Coeficiente de carga crítica de flambagem.....	35
Tabela 11 – Autovalores de flambagem.....	35
Tabela 12 – Tensões máximas (von Mises) - Reforçado.....	39
Tabela 13 – Autovalores de flambagem - Reforçado.....	42

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	11
1.2	OBJETIVOS.....	11
1.3	MOTIVAÇÃO.....	11
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1	TEORIA.....	13
2.2	APLICAÇÕES.....	16
2.2.1	Indústria automobilística	16
2.2.2	Indústria mineradora	16
2.3	VIGAS.....	18
3	OBJETO DE ESTUDO	20
3.1	MODELO.....	23
3.2	CONDIÇÕES DE CONTORNO.....	25
3.3	CARREGAMENTOS.....	26
4	RESULTADOS	30
4.1	ANÁLISE ESTÁTICA.....	30
4.2	FLAMBAGEM.....	34
4.3	REFORÇO ESTRUTURAL.....	37
4.4	RESULTADOS FINAIS.....	39
4.4.1	Análise Estática	39
4.4.2	Flambagem	42
5	CONCLUSÕES	44
	REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O método de elementos finitos é uma ferramenta utilizada na solução de problemas reais de engenharia. Essa ferramenta tem aplicações em diversas áreas, como indústrias aeronáutica, automobilística, mineradora e construção de pontes.

Obviamente, o engenheiro deve estar ciente dos conceitos aprendidos na graduação e desenvolvidos ao longo da experiência de trabalho, visto que um software, por exemplo, que utiliza elementos finitos, apenas fará com que o analista chegue a um resultado coerente de forma mais rápida, cabendo a ele a interpretação crítica dos fenômenos envolvidos.

A indústria mineradora é uma forte responsável pelo crescimento econômico nacional. Segundo divulgação do Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM) de 2015, a produção mineral brasileira, em 2014, foi de 40 bilhões de dólares, correspondendo a 5% do PIB nacional e o setor extrativo mineral gera mais de 200 mil empregos diretos. Trata-se, portanto, de uma indústria importante para o desenvolvimento econômico do país.

Com isso, este trabalho procura unir conceitos aprendidos na graduação, utilizando o método de elementos finitos na solução de um problema real de engenharia de uma indústria relevante.

1.2 OBJETIVOS

A proposta deste trabalho é a análise estrutural de uma monovia utilizada para carregamento de minério através do método de elementos finitos.

O objetivo primário deste trabalho é avaliar as tensões e modos de flambagem da monovia em seu estado original. Após isso, como segundo objetivo, são propostos reforços para melhorar a condição de operação.

Finalmente, o terceiro objetivo do trabalho é avaliar as novas tensões e novos modos de flambagem, após a proposta de reforço.

1.3 MOTIVAÇÃO

O fator mais importante que motiva o autor deste trabalho é a possibilidade de poder encontrar um problema real de engenharia em uma indústria relevante para o país e buscar a solução deste problema.

Outro fator relevante é a importância de se trabalhar com segurança na indústria mineradora, visto que muitas vidas estão envolvidas nas operações das máquinas e equipamentos. Através desse trabalho é possível a operação das máquinas envolvidas com maior segurança para os operadores.

Além da segurança, o ganho de produtividade é importante, sendo assim, motiva o autor a resolver um problema que implicará em um ganho para a empresa.

Um outro fator de motivação para o autor do trabalho é também poder trabalhar em equipe, subsidiando o engenheiro para a tomada de decisão.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é composto por 6 capítulos. A seção atual é referente ao capítulo 1, destinado a uma breve introdução ao trabalho, objetivos e motivações.

O capítulo 2 é a fundamentação teórica básica do método de elementos finitos e algumas aplicações, definição de viga, bem como a diferença entre elementos estruturais e não estruturais.

O capítulo 3 é destinado ao objeto de estudo, ou seja, a monovia para carregamento de minério.

O capítulo 4 apresenta os resultados do projeto, tanto os iniciais, a proposta de reforço e os resultados finais.

O capítulo 5 destina-se a apresentar as conclusões do trabalho.

Finalmente, o capítulo 6 agrupa as bibliografias necessárias para a elaboração deste trabalho.

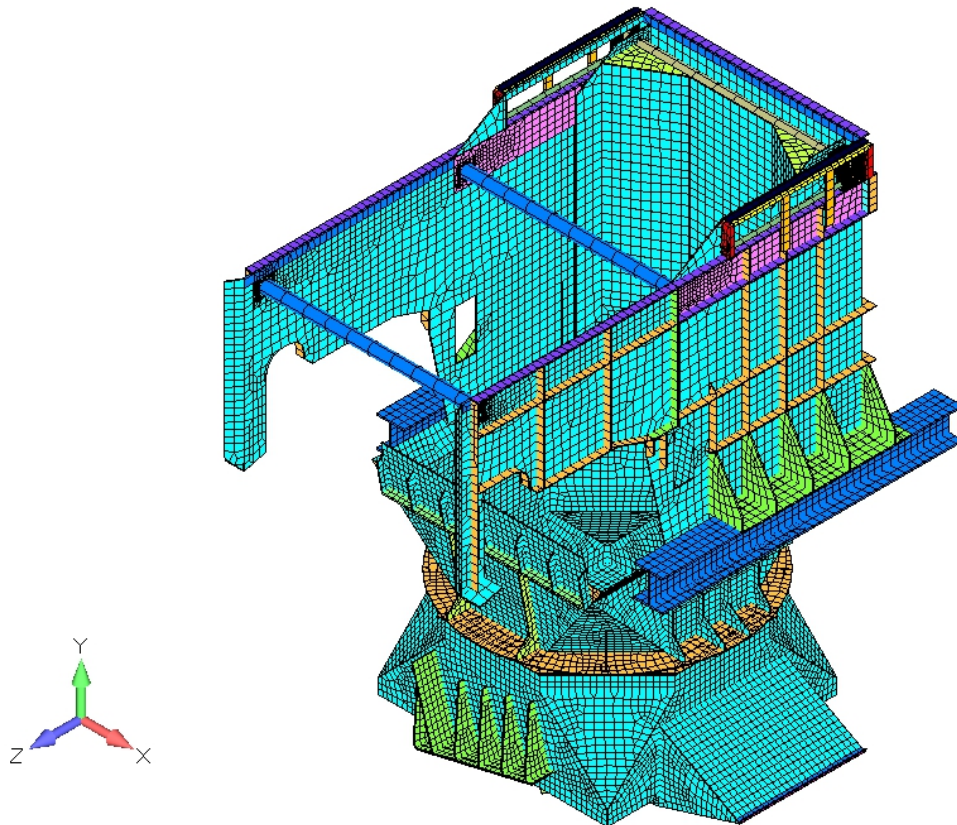
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 TEORIA

O método de elementos finitos é uma ferramenta, e como tal, deve ser usada com base em conhecimentos técnicos e pré-estabelecidos para que seja eficiente. Segundo Alves Filho (2000), muitos profissionais que trabalham com elementos finitos têm dificuldades, visto que o aprendizado do uso dos softwares é feito sem base conceitual, confundindo-se o aprendizado de manuseio do programa com o conhecimento do método de elementos finitos.

Resolver um problema pelo método de elementos finitos, segundo Filho (2000), é subdividir o corpo contínuo, uma estrutura, em um certo número finito de elementos, que são conectados apenas pelos nós, ou seja, é a representação aproximada de um corpo contínuo, visto que na realidade os trechos do corpo não estão conectados apenas por alguns pontos. Essa subdivisão da estrutura em elementos é chamada de malha de elementos finitos. A Figura 1 representa a malha de elementos finitos de uma estrutura mecânica usada na mineração.

Figura 1 - Malha de um chute de descarga em elementos finitos.



Fonte: Produção do próprio autor.

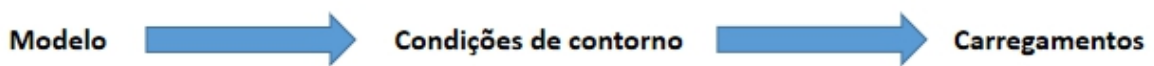
Vale ressaltar que a disposição dos nós e elementos em uma malha são importantes para a análise dos resultados, então é importante que se tenha um bom manuseio do software para que a malha seja boa, coerente e represente resultados confiáveis.

Todo problema de engenharia que pode ser solucionado utilizando o método de elementos finitos deve ser resolvido utilizando-se três passos fundamentais: modelo, que é uma representação da realidade, seja de uma estrutura simples ou complexa; condições de contorno do problema e carregamentos. Esses três passos devem estar claros para quem irá utilizar essa ferramenta. A Figura 2 esquematiza esses passos.

Os conhecimentos adquiridos ao longo da graduação de engenharia também são muito importantes, como resistência dos materiais e elementos de máquinas. Não adianta o modelamento estar correto se o engenheiro ou analista não souber interpretar os resultados. Dessa maneira, o engenheiro ou analista deve estar ciente do que esperar da solução do problema, em outras palavras, eles devem ter uma noção, mesmo que simplificada, dos resultados.

Não se trata só de resultados numéricos, mas de comportamento estrutural. Por exemplo, um problema envolvendo uma viga horizontal carregada verticalmente irá fletir. Se a solução do problema não indicar um resultado nesse sentido, algo está errado, seja as condições de contorno ou os carregamentos, por exemplo.

Figura 2 - Etapas da solução de um problema utilizando o método de elementos finitos.



Fonte: Produção do próprio autor.

O método de elementos finitos envolve um cálculo matricial avançado. Não é objetivo desse trabalho expor esses cálculos, visto que seu foco está na resolução de um problema real através de um software e na análise dos resultados. No entanto, é necessário fazer algumas considerações a respeito da matriz de rigidez do elemento e da estrutura e dos graus de liberdade dos nós.

O objetivo da análise estrutural é determinar a relação entre as cargas que atuam nos nós da estrutura e os deslocamentos da estrutura inteira. A rigidez da estrutura inteira depende da rigidez de cada um de seus elementos. A matriz de rigidez nada mais é que a relação entre a força e o deslocamento. A relação entre a força e o deslocamento no âmbito de um elemento é definida pela matriz de rigidez do elemento e essa relação no âmbito da estrutura é expressa pela matriz de rigidez da estrutura.

Os componentes de deslocamentos associados aos nós são chamados de graus de liberdade. Por exemplo, uma viga no espaço admite em um mesmo nó seis componentes de deslocamentos nodais, três translações e três rotações, tendo, portanto, seis graus de liberdade. Dessa forma, percebe-se que o resultado de uma análise estrutural depende do tipo de elemento e do número de nós. Ter esse conhecimento é necessário para que o modelo representado no software seja o mais adequado, ou seja, represente melhor a realidade.

Uma estrutura apresenta partes estruturais e, às vezes, partes não estruturais. As partes estruturais são imprescindíveis no modelamento, já as não estruturais podem ser consideradas através da aplicação de forças ou calibrando-se a massa desses componentes nas partes estruturais do modelo. Considera-se, por exemplo, um equipamento mecânico que possui um motor elétrico. Obviamente, esse motor não será considerado no modelamento de forma

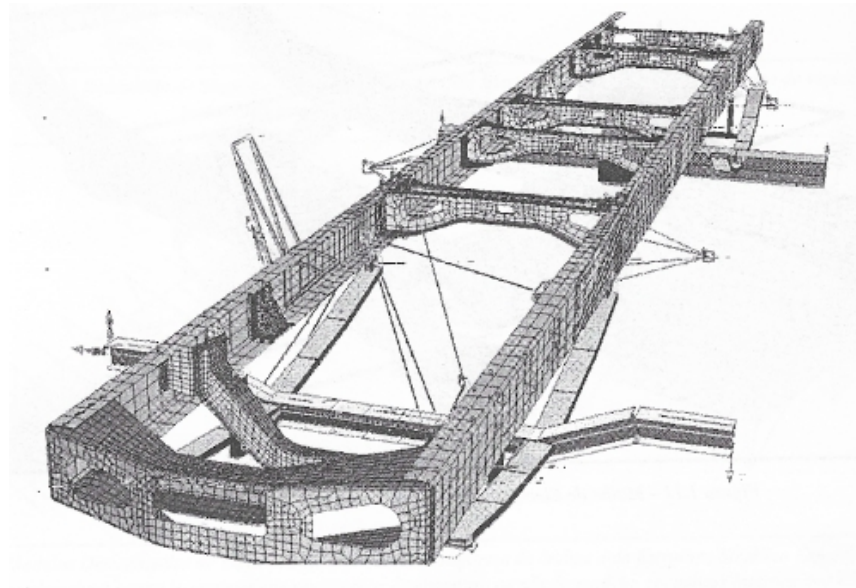
estrutural, ou seja, ele não será modelado em seus detalhes. No entanto, é possível e provável que sua massa seja considerada para que o modelo seja coerente, visto que esse motor representa uma massa relevante na estrutura como um todo.

2.2 APLICAÇÕES

2.2.1 Indústria automobilística

A indústria automobilística é rica em componentes mecânicos. Um carro, por exemplo, apresenta diversas estruturas que podem ser analisadas individualmente. O chassi, a carroceria, o sistema de freios, suspensão, cada componente desses pode ser objeto de uma análise estrutural. A Figura 3 ilustra a malha de elementos finitos de uma estrutura de chassi de caminhão.

Figura 3 - Malha de elementos finitos de estrutura de chassi de caminhão.



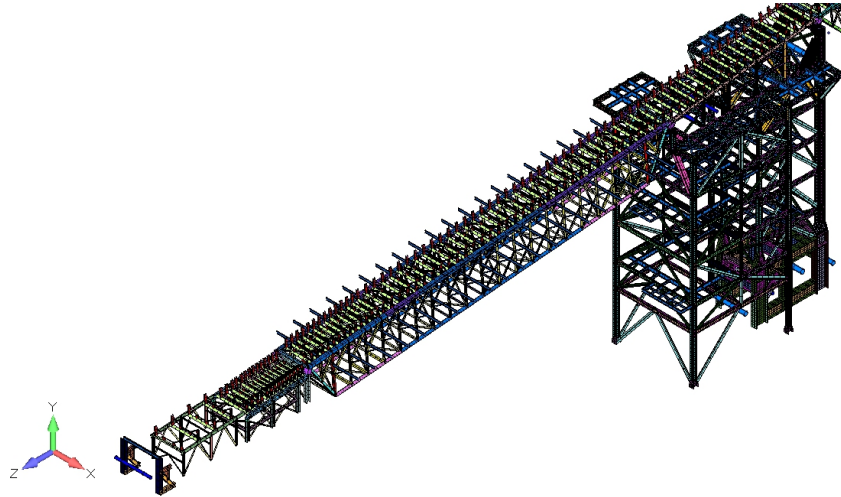
Fonte: Filho (2000).

2.2.2 Indústria mineradora

O método de elementos finitos tem diversas aplicações na indústria mineradora. São vários os equipamentos que podem ser analisados, como por exemplo transportadores, empilhadeiras, recuperadoras, carregadores de navio, viradores de vagões etc. Às vezes a

estrutura é tão grande que deve ser analisada por partes. A Figura 4 ilustra a malha de elementos finitos de parte de um transportador usado na indústria mineradora.

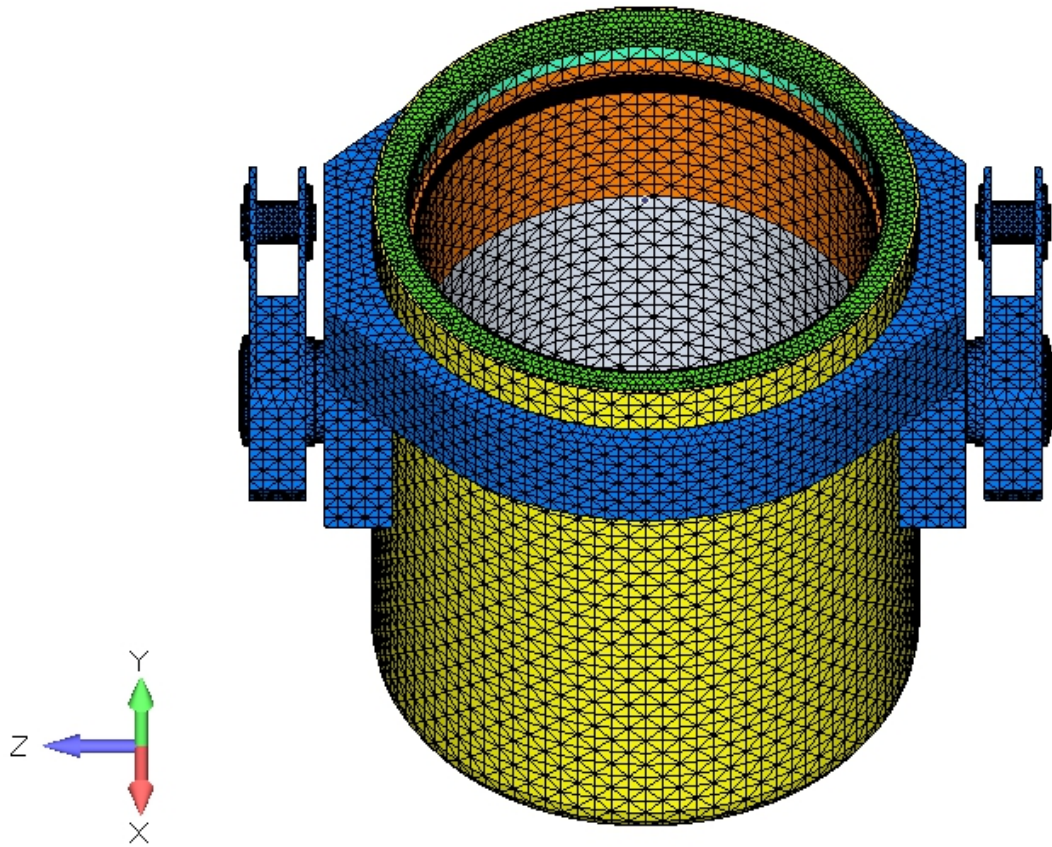
Figura 4 - Malha de elementos finitos de um transportador (indústria mineradora).



Fonte: Produção do próprio autor.

Além dessas duas indústrias, há diversas outras, como a indústria siderúrgica e indústria química, envolvendo além de análises estruturais, análises térmicas também, indústria aeronáutica, que foi uma das primeiras a utilizar o método de elementos finitos na análise estrutural de seus equipamentos e máquinas, bem como a indústria civil, na construção de pontes. A Figura 5 ilustra a malha de elementos finitos de uma panela de aciaria, utilizada na indústria siderúrgica.

Figura 5 - Malha de elementos finitos de uma panela de aciaria (indústria siderúrgica).

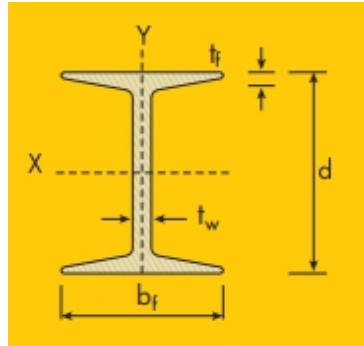


Fonte: Produção do próprio autor.

2.3 VIGAS

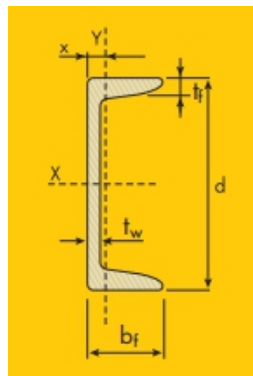
“As vigas são elementos estruturais projetados para suportar cargas aplicadas perpendicularmente a seus eixos longitudinais.” (Hibbeler, 2010, p.401). Devido a essa carga, a viga apresenta tensões por cisalhamento e flexão. Dependendo da seção transversal da viga, por exemplo vigas em I ou em U, ela apresentará um comportamento estrutural diferente, ou seja, será mais ou menos resistente ao cisalhamento e à flexão. A Figura 6 e a Figura 7 ilustram a seção transversal de uma viga em I e uma viga em U, respectivamente.

Figura 6 - Viga em perfil I.



Fonte: Catálogo de perfis fornecido pela Gerdau (2011).

Figura 7 - Viga em perfil U.



Fonte: Catálogo de perfis fornecido pela Gerdau (2011).

A monovia que é objeto de estudo desse trabalho é uma viga em perfil I. Dessa maneira é importante se analisar quais propriedades da viga irão influenciar principalmente na resistência à flexão, visto que em muitas aplicações, o cisalhamento não será um problema. Nota-se que o momento de inércia é relevante para o cálculo da flexão, conforme o cálculo do módulo de resistência à flexão da viga, mostrada na Equação (2.3.1).

$$\sigma = Mc / I \quad (2.3.1)$$

Ou seja, quanto maior o momento de inércia, menor será a tensão por flexão na viga. Sabe-se que a área da seção transversal da viga está relacionada ao seu momento de inércia, de forma que quanto maior a área da seção, maior será o momento de inércia. Dessa forma, nota-se que comparando-se dois perfis I, por exemplo, aquele que tiver seção transversal de maior área apresentará uma tensão por flexão menor caso seja submetido a um carregamento.

3 OBJETO DE ESTUDO

O objeto de estudo desse trabalho é uma monovia usada para carregar o minério em uma indústria mineradora. Essa monovia é um perfil I e em sua aba inferior é presa uma talha elétrica, que é o equipamento que iça o minério propriamente dito através de um gancho. O trole da talha elétrica tem 4 rodas. Essa monovia é ligada, em suas extremidades, por duas colunas tubulares, uma presa ao chão e a outra presa a um perfil do teto do galpão onde o equipamento está inserido. Uma outra viga I, menor, liga o tubo da extremidade presa ao chão à monovia. A Figura 8 ilustra a monovia para carregamento do minério, a Figura 9 ilustra a coluna de apoio presa ao chão, bem como o perfil I entre a coluna e a monovia, a Figura 10 ilustra a coluna tubular presa ao teto e a Figura 11, a talha elétrica.

Figura 8 - Estrutura da monovia para carregamento de minério.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 9 - Estrutura da monovia - Coluna de apoio presa ao chão e perfil I entre coluna e monovia.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 10 - Estrutura da monovia - Coluna tubular presa ao teto.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 11 - Estrutura da monovia - Talha elétrica.



Fonte: Produção do próprio autor.

A Tabela 1 indica as principais características do equipamento.

Tabela 1 – Características do equipamento.

Capacidade de projeto [Kg]	Massa [Kg]	Comprimento [m]	Içamento [m/min]	Massa da talha e acessórios [Kg]
1000	397	6,8	7,0	300

Fonte: Produção do próprio autor.

A Tabela 2 indica as características do material empregado.

Tabela 2 – Características do material empregado - Aço ASTM A36.

Módulo de elasticidade [GPa]	Tensão de escoamento [MPa]	Tensão de ruptura [MPa]	Densidade [Kg/m³]	Coefficiente de Poisson
200	250	415	7850	0,3

Fonte: Produção do próprio autor.

A Tabela 3 indica as espessuras das chapas utilizadas no equipamento.

Tabela 3 – Espessuras do equipamento [mm].

Aba / Alma da monovia	Aba / alma da viga I entre monovia e coluna de apoio	Coluna de apoio presa ao chão	Coluna tubular presa ao teto
7,0	6,0	10,0	10,0

Fonte: Produção do próprio autor.

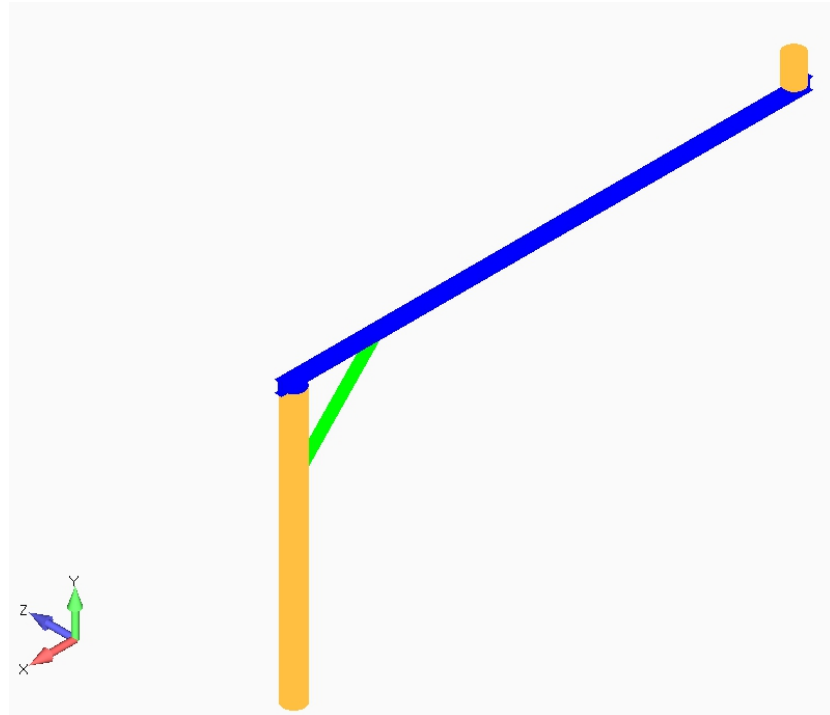
3.1 MODELO

O modelo em elementos finitos dessa estrutura é relativamente simples, visto que sua geometria é simples. Primeiramente, é modelada a geometria dos componentes estruturais, ou seja, o perfil I da monovia e as colunas de sustentação em suas extremidades, bem como o perfil I entre a monovia e a coluna de sustentação e depois de modelada a geometria, é feita a malha com os elementos.

A malha com os elementos finitos é feita utilizando elementos de casca quadrilaterais, ou seja, com quatro nós, e alguns poucos elementos triangulares, com três nós. Esses elementos são malhados em cima da geometria, sendo que o total de elementos é de 13.556 e o total de nós é de 13.917. Vale ressaltar que a densidade de malha é critério do analista que modela a estrutura, porém, um bom analista encontra o ponto ideal para uma boa representação, que tenha o número suficiente de elementos, mas não em excesso para que o modelo não seja sobrecarregado e sua análise computacional demore demasiadamente.

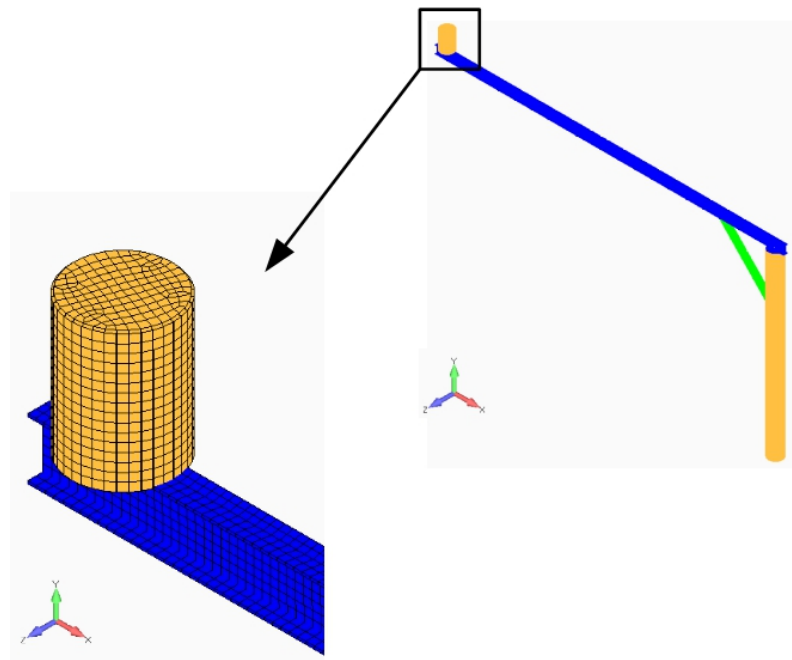
A Figura 12 ilustra a vista isométrica do modelo de elementos finitos, a Figura 13 ilustra o tubo sobre a viga e a Figura 14 ilustra a viga I entre a monovia e a coluna de apoio.

Figura 12 - Modelo de elementos finitos - vista isométrica.



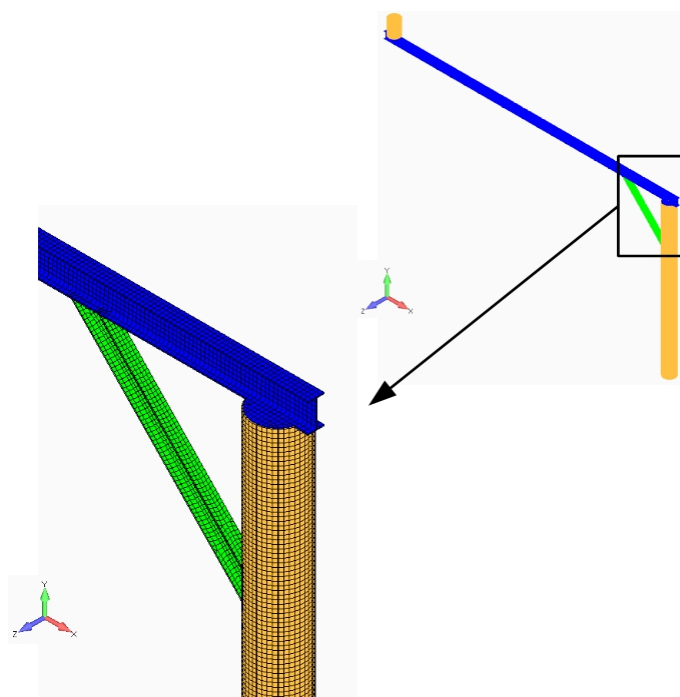
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 13 - Modelo de elementos finitos - Tubo sobre viga.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 14 - Modelo de elementos finitos - Viga I entre monovia e coluna de apoio.

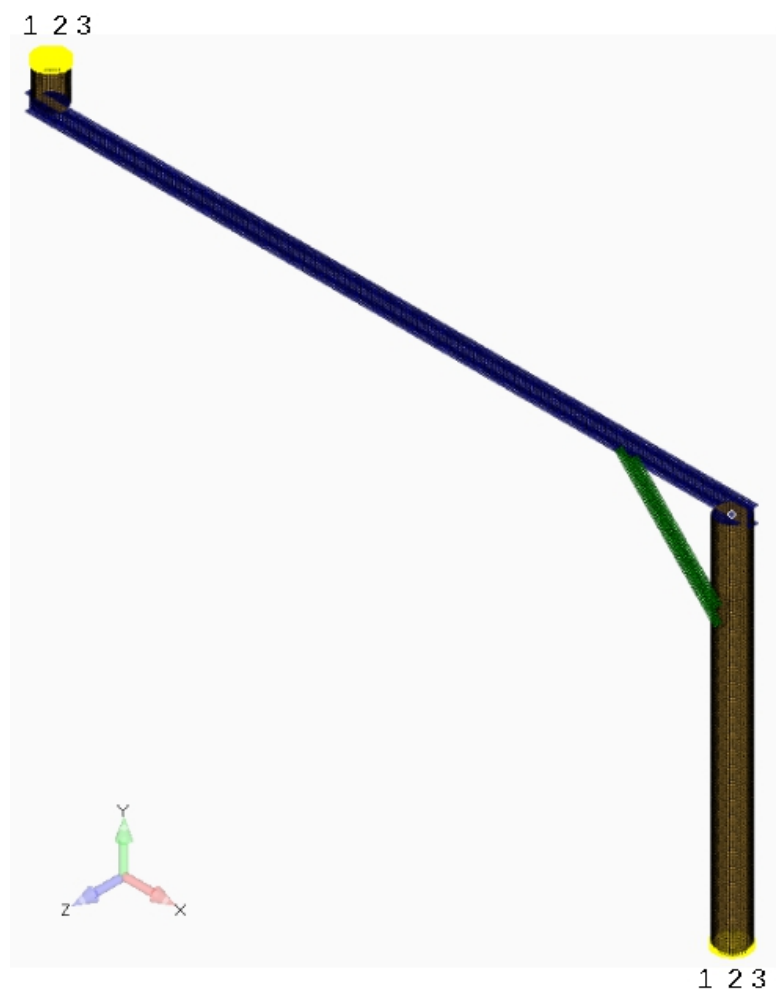


Fonte: Produção do próprio autor.

3.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO

São consideradas restrições translacionais nas três direções X (1), Y (2) e Z (3) nos pontos de contato dos tubos com o chão e com a estrutura do galpão, conforme Figura 15, visto que a estrutura está presa nesses pontos.

Figura 15 - Modelo de elementos finitos - Condições de contorno.



Fonte: Produção do próprio autor.

3.3 CARREGAMENTOS

Os carregamentos considerados, ou *Load Cases* (LC), são apresentados nas tabelas a seguir. Vale ressaltar que para obtermos um carregamento em newtons, basta multiplicarmos a massa, em quilogramas, por 9,81, que é a aceleração da gravidade.

A Tabela 4 mostra o LC1, que é o peso próprio da estrutura, tendo como referência o modelo de elementos finitos para obtenção da massa.

Tabela 4 – LC1 - Peso próprio.

Massa total	Peso próprio total
[Kg]	[N]
397,0	3894,6

Fonte: Produção do próprio autor.

Os próximos carregamentos consideram a carga de içamento, mudando-se apenas a posição do içamento, ou seja, um carregamento considera o içamento no centro (LC2), outro considera o içamento em balanço (LC3) e o outro o içamento próximo ao apoio (LC4), porém o módulo é o mesmo. Cabe ressaltar que, de acordo com a NBR8400, um coeficiente dinâmico de 1,15 é multiplicado pela capacidade da talha (1000 kg), visto que a velocidade de içamento da talha é de 0,12 m/s. A Figura 16 mostra a norma. Dessa forma, tem-se que a carga total de içamento é a capacidade da talha multiplicada pelo fator dinâmico, somando-se a massa da talha e acessórios e multiplicando-se todo esse fator pela aceleração da gravidade. Como o trole apresenta 4 rodas, divide-se a carga total por 4 e aplica-se a carga em 4 nós no modelo, representando as 4 rodas do trole.

O carregamento LC2, que é aquele que representa a carga de içamento no centro da monovia é mostrado na Tabela 5, o LC3, que representa a carga em balanço, na Tabela 6 e o LC4, que representa a carga próximo ao apoio, na Tabela 7.

Figura 16 - Coeficiente dinâmico recomendado pela norma NBR 8400.

Equipamento	Coeficiente dinâmico ψ	Faixa de velocidade de elevação da carga (m/s)
Pontes ou pórticos rolantes	1,15	$0 < v_L \leq 0,25$
	$1 + 0,6 v_L$	$0,25 < v_L < 1$
	1,60	$v_L \geq 1$
Guindaste com lanças	1,15	$0 < v_L \leq 0,5$
	$1 + 0,3 v_L$	$0,5 < v_L < 1$
	1,3	$v_L \geq 1$

Nota: O coeficiente dinâmico é menor quando o esforço de levantamento se faz sobre um elemento de estrutura mais flexível, como no caso de guindaste com lanças.

Fonte: NBR 8400 (1984).

Tabela 5 – LC2 - Carga de içamento no centro.

Capacidade da talha [Kg]	Fator multiplicativo	Massa da talha e acessórios [Kg]	Carga total [N]	Carga por roda [N]
1000	1,15	300	14224,50	3556,13

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 6 – LC3 - Carga de içamento em balanço.

Capacidade da talha [Kg]	Fator multiplicativo	Massa da talha e acessórios [Kg]	Carga total [N]	Carga por roda [N]
1000	1,15	300	14224,50	3556,13

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 7 – LC4 - Carga de içamento próximo ao apoio.

Capacidade da talha [Kg]	Fator multiplicativo	Massa da talha e acessórios [Kg]	Carga total [N]	Carga por roda [N]
1000	1,15	300	14224,50	3556,13

Fonte: Produção do próprio autor.

Devido as tensões obtidas nas análises utilizando as cargas máximas (limitadas na capacidade da talha) serem superiores ao admissível (conforme é mostrado na seção 4 de Resultados), são realizados novos carregamentos limitando as cargas de operação. Sendo assim, o carregamento LC5, que é aquele que representa a carga admissível de içamento no centro é feito e mostrado na Tabela 8.

Tabela 8 – LC5 - Carga admissível de içamento no centro.

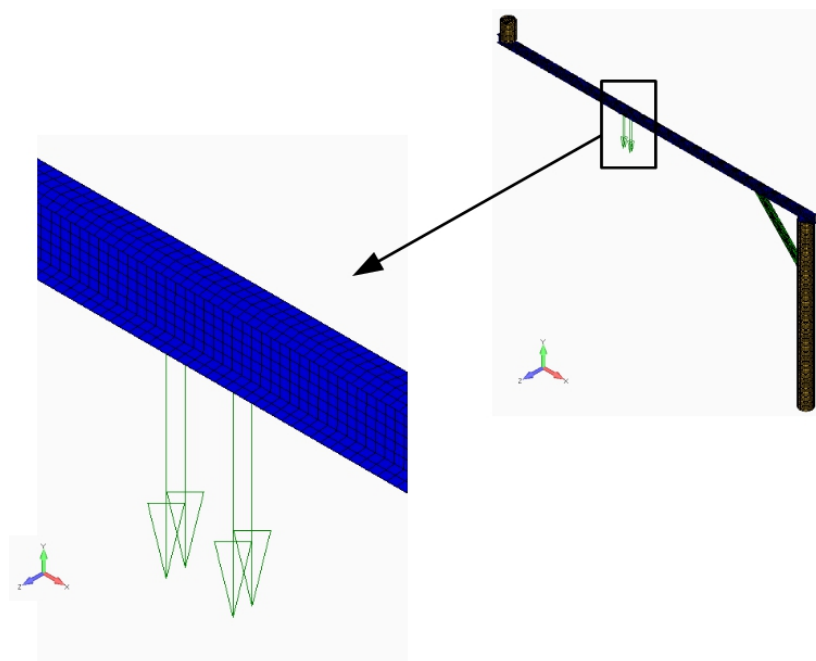
Capacidade admissível da talha [Kg]	Fator multiplicativo	Massa da talha e acessórios [Kg]	Carga total [N]	Carga por roda [N]
525	1,15	300	8865,79	2216,45

Fonte: Produção do próprio autor.

Dessa forma, percebe-se que a capacidade real da talha é de 525 Kg, ou seja, a monovia resiste a pouco mais da metade de sua carga nominal.

A Figura 17 ilustra o carregamento LC2, a talha carregada no centro da monovia.

Figura 17 - Carregamento 2 (LC2) – Talha carregada no centro da monovia.



Fonte: Produção do próprio autor.

Ressalta-se que os carregamentos são aplicados em 4 nós visto que o trole apresenta 4 rodas, de forma que cada nó representa uma roda do trole.

Para obtenção dos resultados é necessário fazer a combinação dos casos de carga de içamento com o peso próprio da estrutura, visto que caso fosse feita a análise apenas dos casos de içamento, sem a consideração do peso próprio, é como se não houvesse a gravidade atuando, o que implicaria em resultados equivocados. Dessa forma, mostra-se no Quadro 1 a combinação dos casos de carga.

Quadro 1 – Casos de carga combinados.

Casos de carga combinados	Casos individuais
LC51	LC1 + LC2
LC52	LC1 + LC3
LC53	LC1 + LC4
LC54	LC1 + LC5

Fonte: Produção do próprio autor.

4 RESULTADOS

4.1 ANÁLISE ESTÁTICA

Os principais resultados da análise estática podem ser visualizados na Tabela 9. As tensões admissíveis têm como referência a norma AISC e são comparadas com as tensões máximas obtidas no modelo de elementos finitos pelo critério de von Mises. O cálculo da margem de segurança é feito através da subtração entre a tensão admissível e a tensão máxima encontrada no modelo, dividindo-se esse fator pela tensão admissível e então multiplicando o resultado por 100, conforme Equação (4.1.1).

$$M.S. = ((\sigma_{adm} - \sigma_{modelo}) / (\sigma_{adm})) \times 100 \quad [\%] \quad (4.1.1)$$

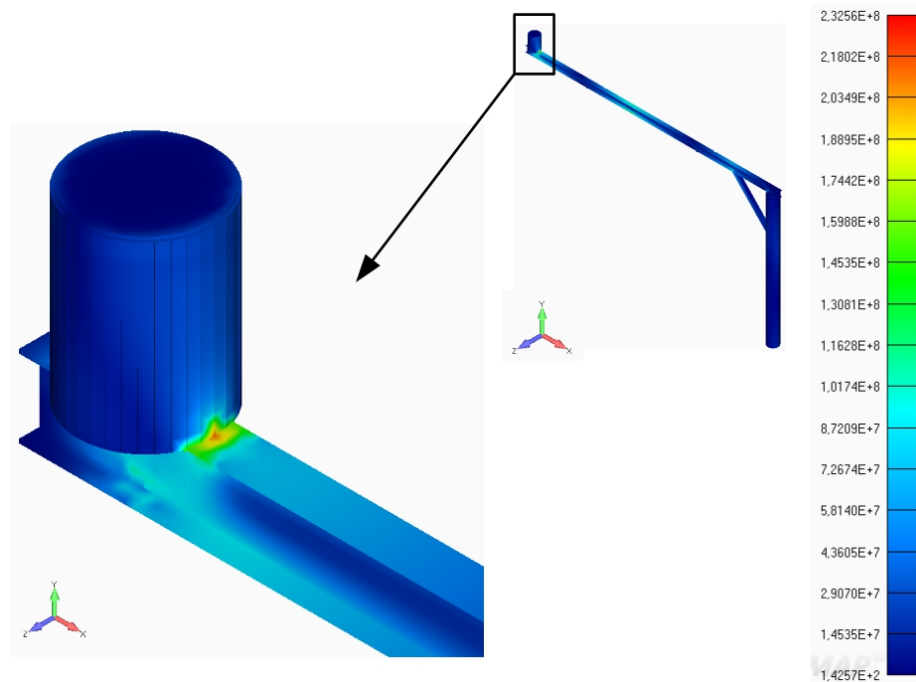
Tabela 9 – Tensões máximas (von Mises).

LC	Região	Tensão de escoamento [MPa]	Tensão admissível [MPa]	Tensões máx. (von Mises) [MPa]	Margem de segurança [%]
1	Monovia	250	150	10	93,3
1	Bases	250	150	9,4	93,7
51	Monovia	250	150	232,6	-
51	Bases	250	150	220,4	-
52	Monovia	250	150	90,2	39,9
52	Bases	250	150	50,8	66,1
53	Monovia	250	150	65,9	56,1
53	Bases	250	150	91,5	39
54	Monovia	250	150	148,7	0,9
54	Bases	250	150	140,9	6,1

Fonte: Produção do próprio autor.

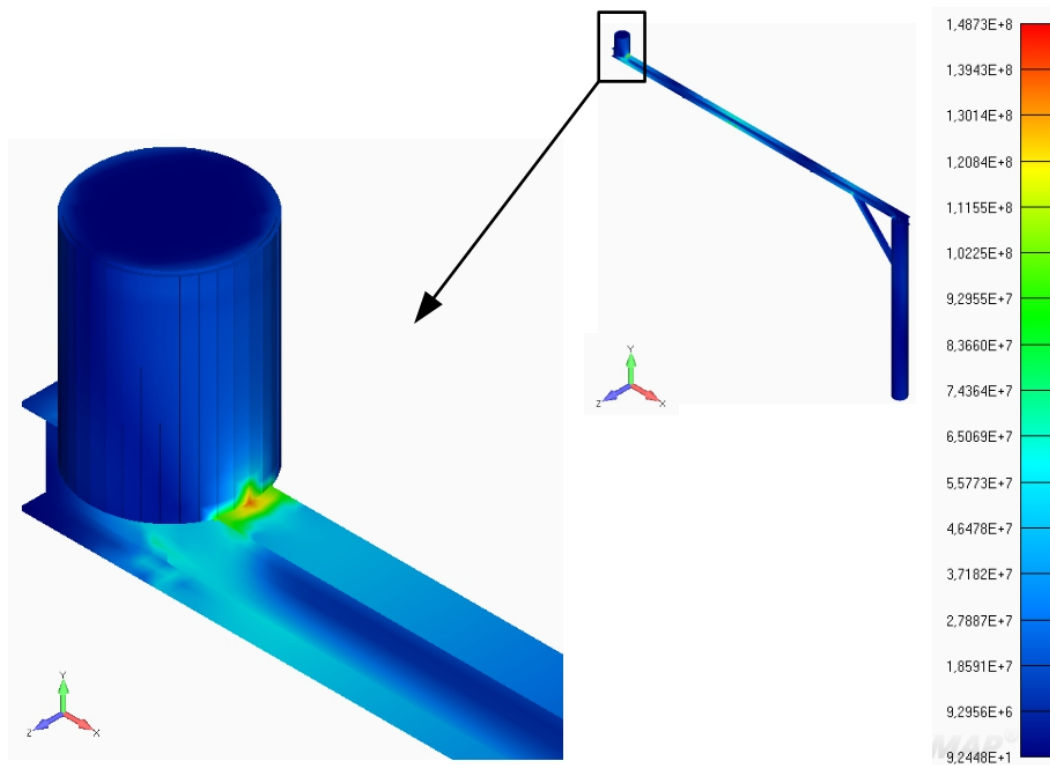
A Figura 18 ilustra o resultado do LC51, a Figura 19 do LC54 e a Figura 20 do LC53.

Figura 18 - Tensões (von Mises) [Pa] – LC51 (Carga de içamento no centro).



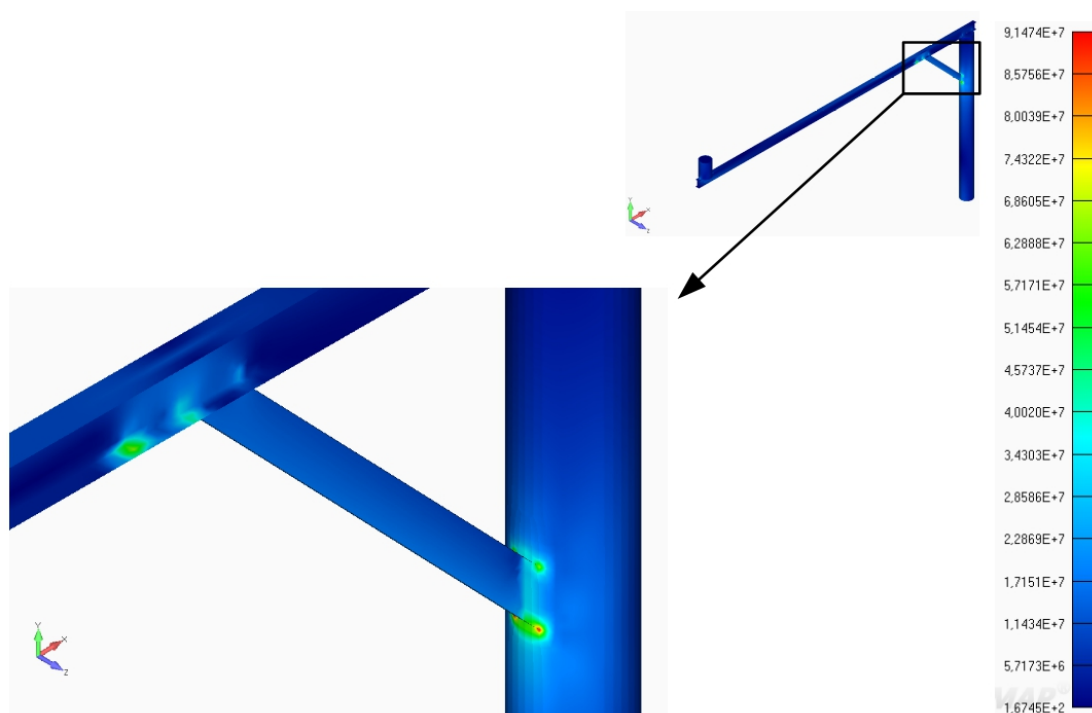
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 19 - Tensões (von Mises) [Pa] – LC54 (Carga admissível de içamento no centro).



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 20 - Tensões (von Mises) [Pa] – LC53 (Carga lado apoio).



Fonte: Produção do próprio autor.

Observa-se que para o caso de carga mais crítico (LC51 - carga de içamento no centro), as tensões no modelo são superiores ao admissível, apesar de não atingirem o escoamento. Dessa forma, a estrutura fica reprovada segundo o critério da norma AISC. Vale ressaltar que o modelo, feito com elementos de casca, apresenta boa densidade de malha e sua geometria, seu modelamento, suas condições de contorno e seus carregamentos estão corretos. Dessa maneira os resultados são confiáveis.

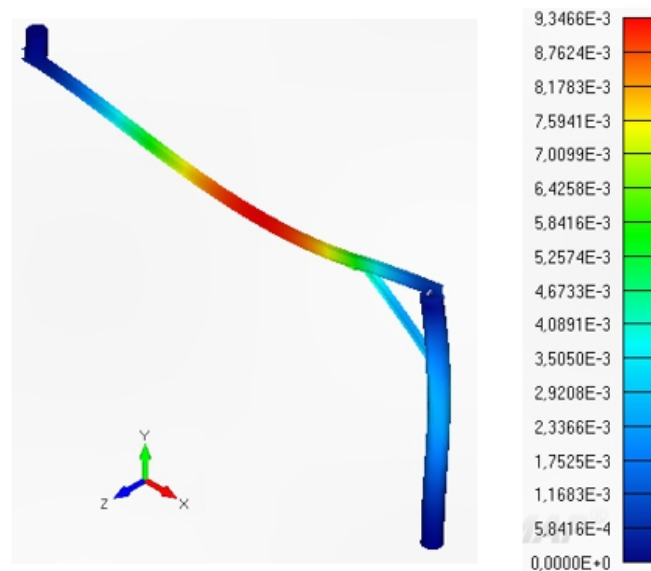
Ressalta-se também que o modelo não representou a solda entre a monovia e o tubo, visto que para este trabalho não foi feita a avaliação da mesma. Além do mais, na prática essa solda não foi feita criteriosamente pelo soldador, visto que essa estrutura é, de certa forma, improvisada. A tensão concentrada entre a monovia e o tubo não é devido a não representação da solda, pois é possível e provável que a representação da solda implicasse, nesse caso, em tensões inexistentes, devido ao modelo ter sido feito em elementos de casca, dificultando a representação de uma solda. Sendo assim, mesmo que a solda não seja representada, o modelo é condizente com a realidade, pois a solda nesse caso não é capaz de amenizar as tensões devido à flexão da monovia.

A tensão concentrada é resultado da flexão que a monovia sofre devido ao carregamento. A Figura 21 ilustra o deslocamento resultante e a configuração deformada da monovia, que

está dentro do admissível segundo norma NBR8800, que é de $L/600$, conforme Figura 22, em que L é o comprimento da viga. Essa restrição ao deslocamento, imposta pela norma, é importante pois um deslocamento excessivo pode levar à ocorrência de deformações plásticas na estrutura, sendo, portanto, considerado um estado-limite irreversível.

Caso houvesse problema de malha ou algum outro problema que resultasse em tensões equivocadas, a tensão seria mais concentrada, provavelmente em 1 elemento apenas. No entanto, observa-se pela Figura 23 que quando é limitada a plotagem na tensão admissível de 150 MPa, existe um gradiente de cores, representando o aumento da tensão quanto mais se aproxima da intersecção entre a monovia e o tubo.

Figura 21 - Deslocamento resultante [m] – Configuração deformada em escala LC51.



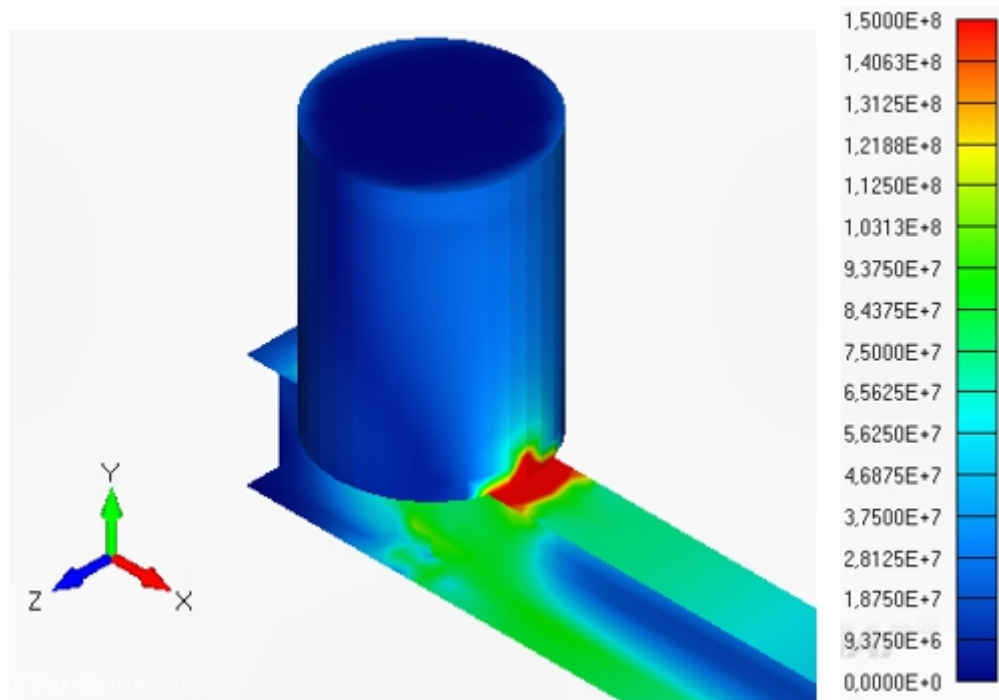
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 22 - Deslocamentos máximos recomendados segundo norma NBR 8800.

Vigas de rolamento:			
- Deslocamento vertical para pontes rolantes com capacidade característica inferior a 200kN	-	$L/600$	$F_{Q3}^{8)}$
- Deslocamento vertical para pontes rolantes com capacidade característica igual ou superior a 200kN	-	$L/800$	$F_{Q3}^{8)}$
- Deslocamento horizontal devido às ações transversais da ponte	-	$L/600$	F_{Q3}
Galpões em geral e edifícios de um pavimento:			
- Deslocamento horizontal do topo em relação à base ⁶⁾	-	$H/300$	$F_{Q1} + 0,3F_{Q2} + 0,4F_{Q3}$ $F_{Q3} + 0,2F_{Q1} + 0,3F_{Q2}$
Edifícios de dois ou mais pavimentos:			
- Deslocamento horizontal do topo em relação à base ⁶⁾	-	$H/400$	$F_{Q1} + \psi_1 F_{Q2}^{7)}$
- Deslocamento horizontal relativo entre dois pisos consecutivos	-	$h/300$	$F_{Q1} + \psi_1 F_{Q2}^{7)}$

Fonte: NBR 8800 (2008).

Figura 23 - Tensões (von Mises) [Pa] – LC51 (Carga admissível de içamento no centro) -
Plotagem limitada no admissível.



Fonte: Produção do próprio autor.

4.2 FLAMBAGEM

O termo “flambagem” é utilizado pela norma NBR 8800:2008 e é um termo válido, aceito e tem sua correspondência e coerência com a teoria e a prática, visto que é uma norma respeitada. Posto isso, é válido ressaltar que para este trabalho, por se tratar de um caso particular de uma estrutura em que não existe nessa norma um caso idêntico para se ter como padrão, um nome também adequado seria estabilidade estrutural, ou seja, nesse trabalho a flambagem representa a estabilidade estrutural do equipamento e é uma aproximação e uma interpretação do que a norma chama de flambagem.

Essa aproximação é válida e também útil pois é coerente com a norma e coerente com o software utilizado, já que este utiliza exatamente o nome “flambagem” para configurar uma análise de estabilidade estrutural, que é a análise feita nessa seção do trabalho.

A análise de flambagem é elaborada considerando todos os casos de carga combinados (51 a 54) descritos neste trabalho. Para a avaliação da flambagem, é necessário calcular o coeficiente de carga crítica de flambagem, ou seja, o autovalor admissível de flambagem. Para

a determinação desse coeficiente são utilizados fatores de segurança correspondentes aos fatores recomendados pela norma NBR 8800:2008.

Em suma, de acordo com essa norma, existem 3 coeficientes (C_1 , C_2 e C_3) e o autovalor admissível é encontrado multiplicando-se os 3 e somando-se C_1 . A Tabela 10 mostra esses coeficientes, bem como o autovalor admissível.

Tabela 10 – Coeficiente de carga crítica de flambagem.

C_1	C_2	C_3	λ_{adm}
1,0	1,1	1,25	2,38

Fonte: Produção do próprio autor.

O cálculo da margem de segurança é feito subtraindo-se o autovalor admissível do autovalor obtido no modelo, dividindo-se pelo autovalor admissível e multiplicando-se por 100, conforme Equação (4.2.1).

$$M.S. = (\lambda_{m\acute{a}x} - \lambda_{adm}) / (\lambda_{adm}) \times 100 \quad (4.2.1)$$

A Tabela 11 mostra os resultados dos autovalores de flambagem para os carregamentos considerados.

Tabela 11 – Autovalores de flambagem.

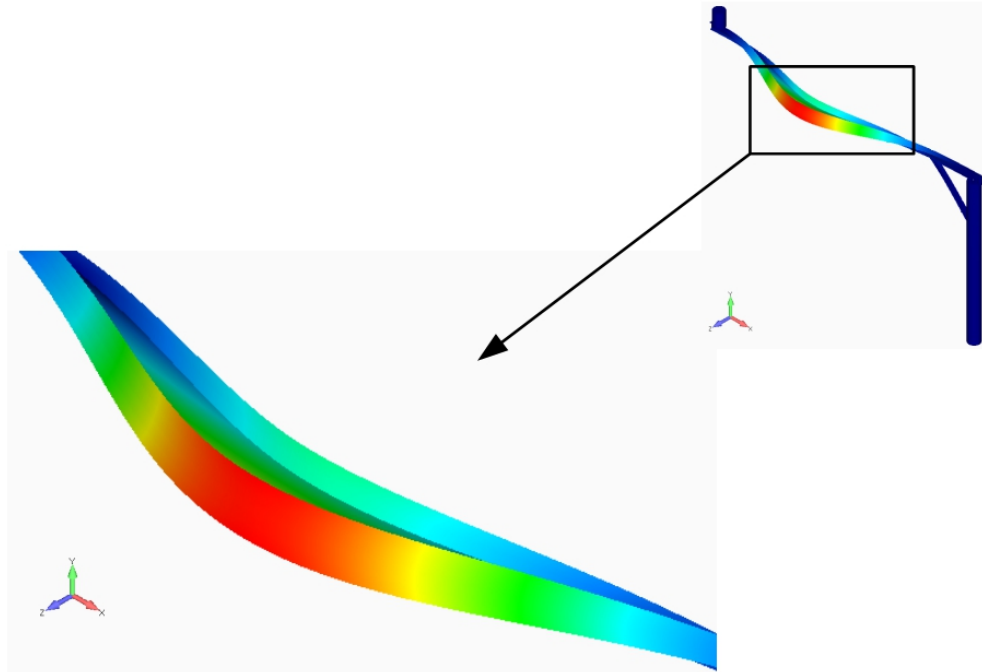
LC	Modo	Local do modo de flambagem	Autovalor ($\lambda_{m\acute{a}x}$)	Autovalor admissível (λ_{adm})	M.S. [%]
51	1	Monovia	3,39	2,38	42,4
52	1	Monovia	83,49	2,38	M.S.E.
53	1	Monovia	15,52	2,38	M.S.E.
54	1	Monovia	5,3	2,38	122,7

Fonte: Produção do próprio autor.

*M.S.E. quando $M.S. > 150$.

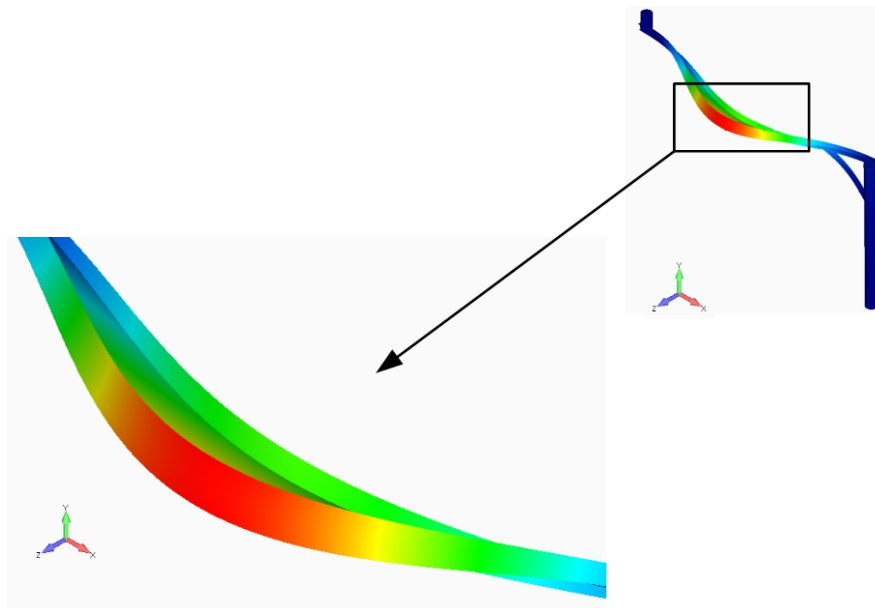
As Figuras 24 e 25 ilustram os resultados dos modos de flambagem para os casos de carga LC51 e LC53, respectivamente.

Figura 24 - Modo de flambagem ($\lambda = 3,39$) LC51 – Configuração deformada.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 25 - Modo de flambagem ($\lambda = 15,52$) LC53 – Configuração deformada.



Fonte: Produção do próprio autor.

Os autovalores de flambagem indicam o coeficiente de carga limite para ocorrência de flambagem a multiplicar pela carga aplicada. Nota-se, dessa forma, que os autovalores resultantes são superiores ao admissível e não são esperados problemas de estabilidade estrutural.

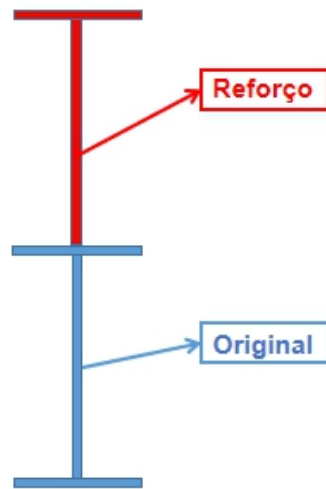
4.3 REFORÇO ESTRUTURAL

O reforço estrutural apresentado nesse trabalho é uma das possíveis soluções para diminuir a tensão entre a monovia e o tubo preso ao teto. Sabendo-se que essa tensão é resultado da flexão existente na monovia devido ao içamento, a solução proposta nesse trabalho visa diminuir essa flexão e conseqüentemente a tensão, para que ela não seja superior a tensão admissível.

Um bom reforço é aquele que envolve uma solução simples e barata, como é o caso da solução proposta nesse trabalho. Para diminuir a flexão da monovia, basta soldar duas chapas acima da mesma e de mesma espessura, em forma de T, conforme Figuras 26, 27 e 28, que ilustram a seção transversal da monovia reforçada, o modelo reforçado da monovia e o comprimento das chapas de reforço, respectivamente.

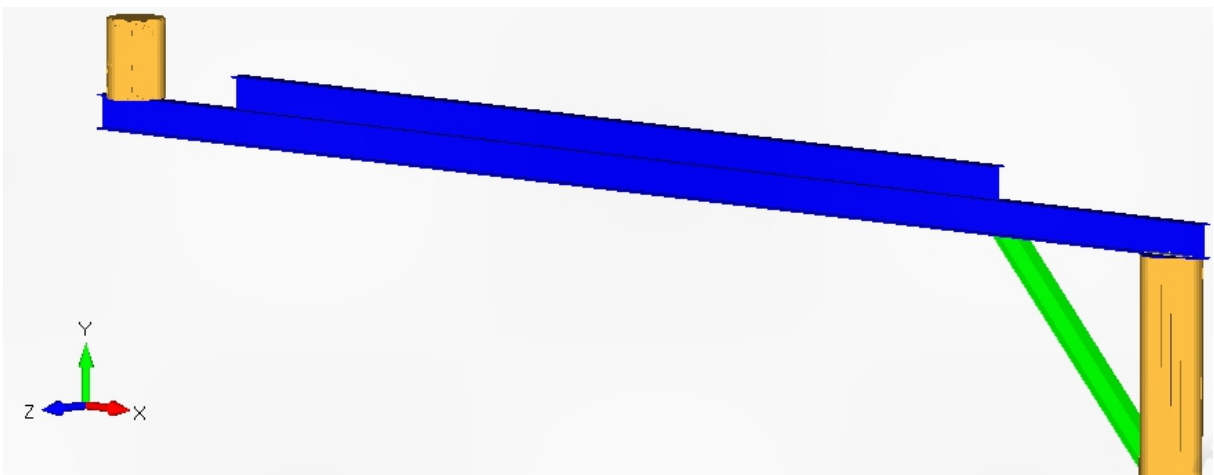
As condições de contorno e os carregamentos no modelo reforçado ficam inalterados com relação ao modelo original, exceto que o carregamento LC1 torna-se maior, visto que as chapas de reforço foram inseridas e o carregamento LC5 e sua combinação com o peso próprio, LC54, não existe para o modelo reforçado, pois a carga admissível passa a ser a própria carga nominal da monovia, de 1000 Kg. A nova massa estrutural do modelo é de 459 Kg, ou seja, as chapas de reforço pesam em torno de 62 Kg, o que não representa problemas, conforme mostra a seção 4.4 de Resultados Finais.

Figura 26 - Seção transversal da monovia reforçada.



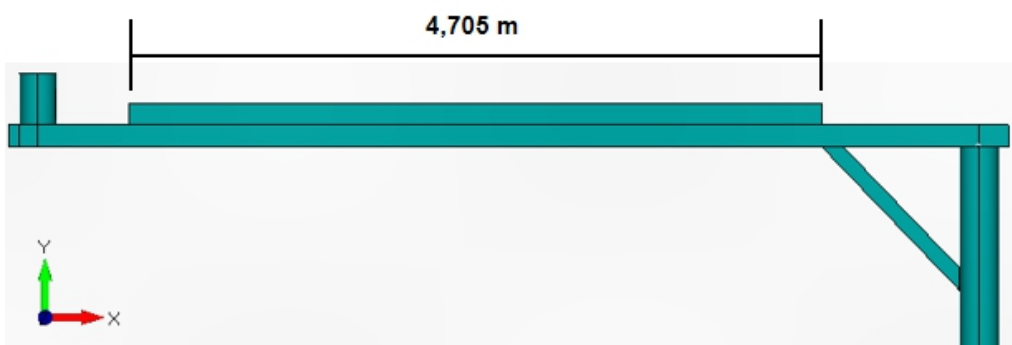
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 27 - Modelo reforçado da monovia.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 28 - Comprimento das chapas de reforço.



Fonte: Produção do próprio autor.

4.4 RESULTADOS FINAIS

4.4.1 Análise Estática

Os principais resultados da análise estática para o modelo reforçado podem ser visualizados na Tabela 12. As tensões admissíveis têm como referência a norma AISC e são comparadas com as tensões máximas obtidas no modelo de elementos finitos pelo critério de von Mises, da mesma forma que a estrutura original. Igualmente, a margem de segurança é calculada conforme Equação (4.1.1).

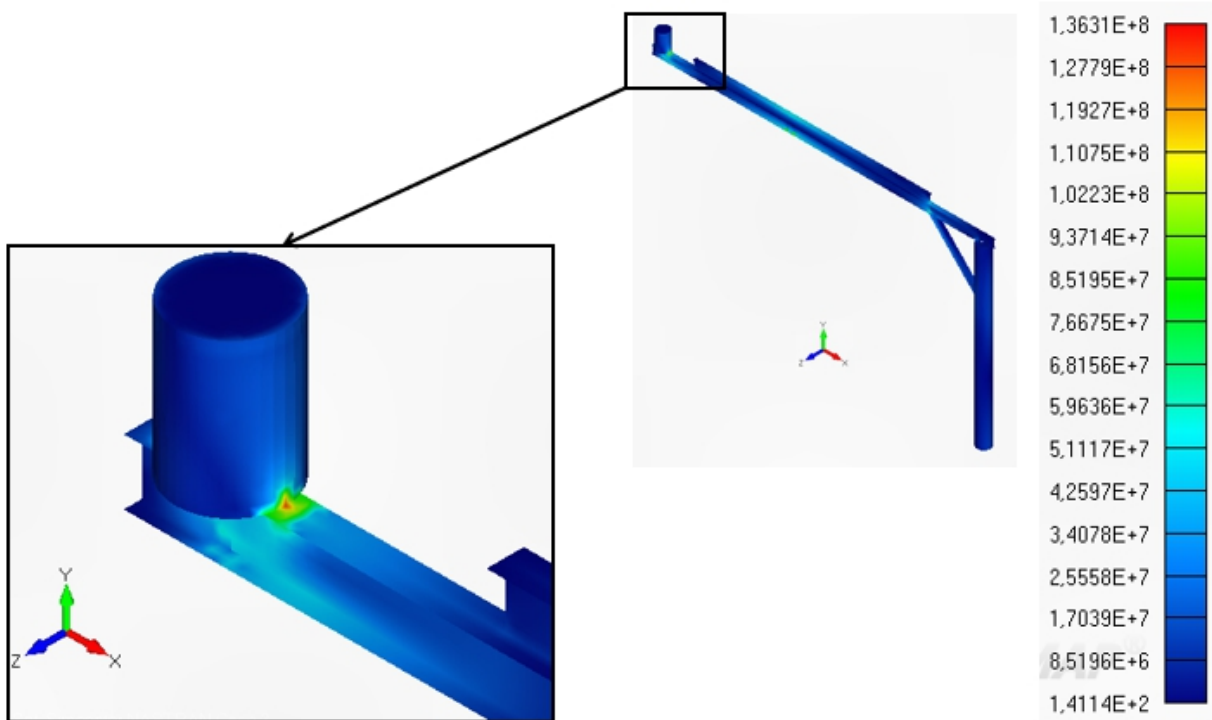
Tabela 12 – Tensões máximas (von Mises) - Reforçado.

LC	Região	Tensão de escoamento [MPa]	Tensão admissível [MPa]	Tensões máx. (von Mises) [MPa]	Margem de segurança [%]
1	Monovia	250	150	10,4	93,1
1	Bases	250	150	9,9	93,4
51	Monovia	250	150	136,3	9,1
51	Bases	250	150	130,4	13,1
52	Monovia	250	150	90,2	39,9
52	Bases	250	150	43,4	71,1
53	Monovia	250	150	67,7	54,9
53	Bases	250	150	86,5	42,3

Fonte: Produção do próprio autor.

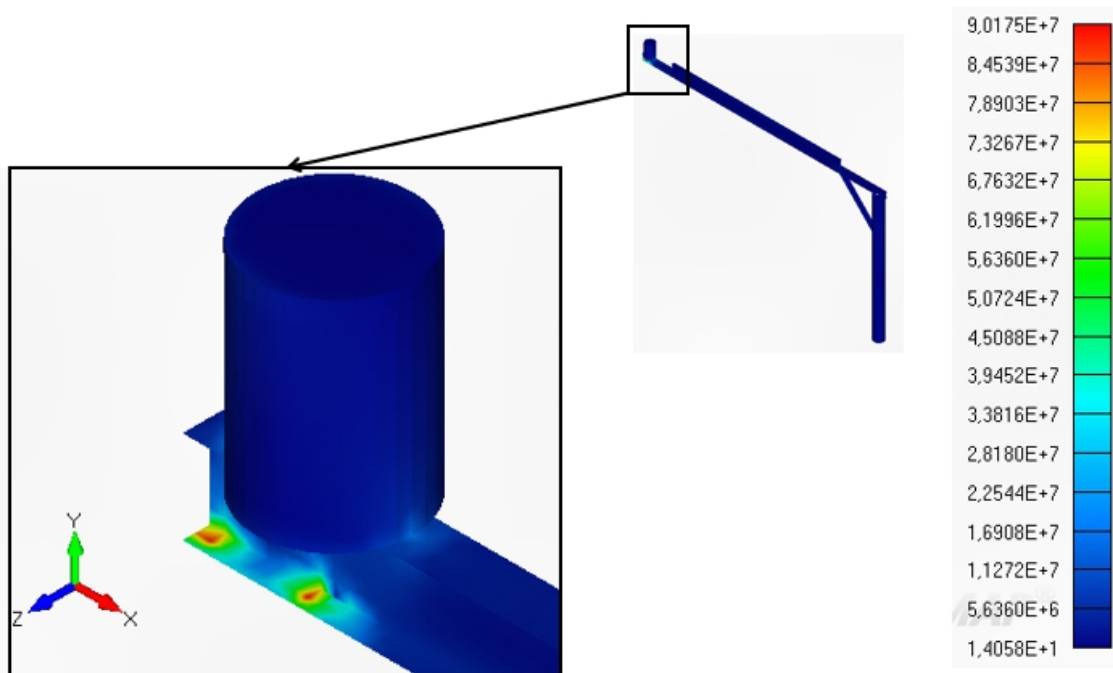
As Figuras de 29 a 31 ilustram os resultados para os casos de carga LC51, LC52 e LC53, respectivamente.

Figura 29 - Tensões (von Mises) [Pa] – LC51 (Carga de içamento no centro).



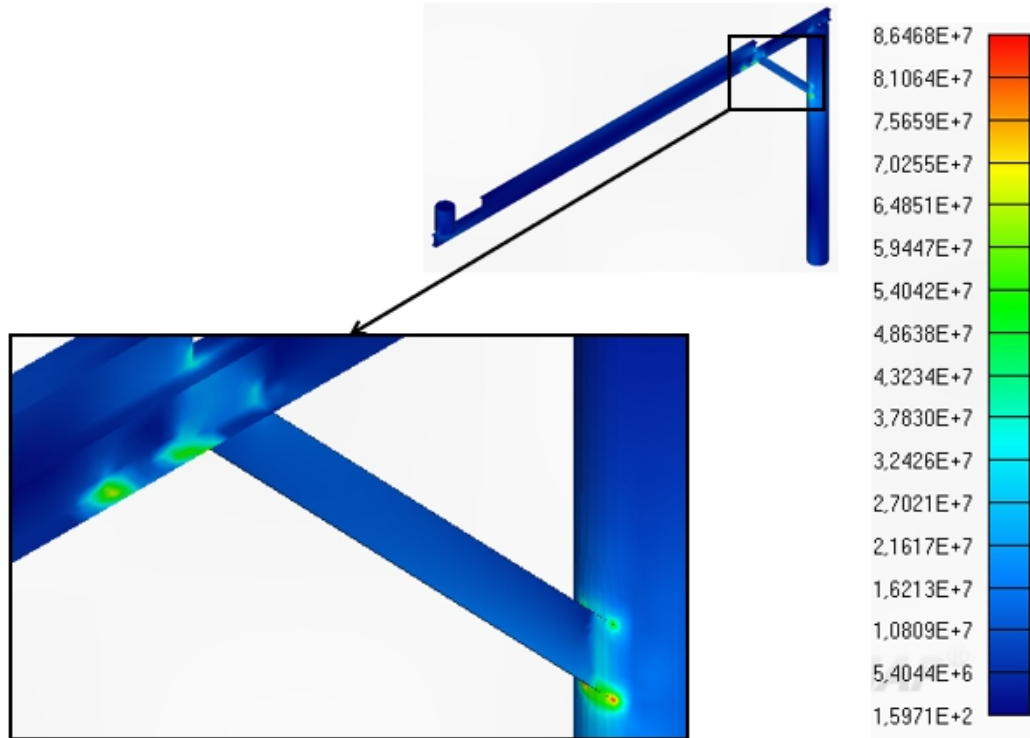
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 30 - Tensões (von Mises) [Pa] – LC52 (Carga de içamento em balanço).



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 31 - Tensões (von Mises) [Pa] – LC53 (Carga lado apoio).

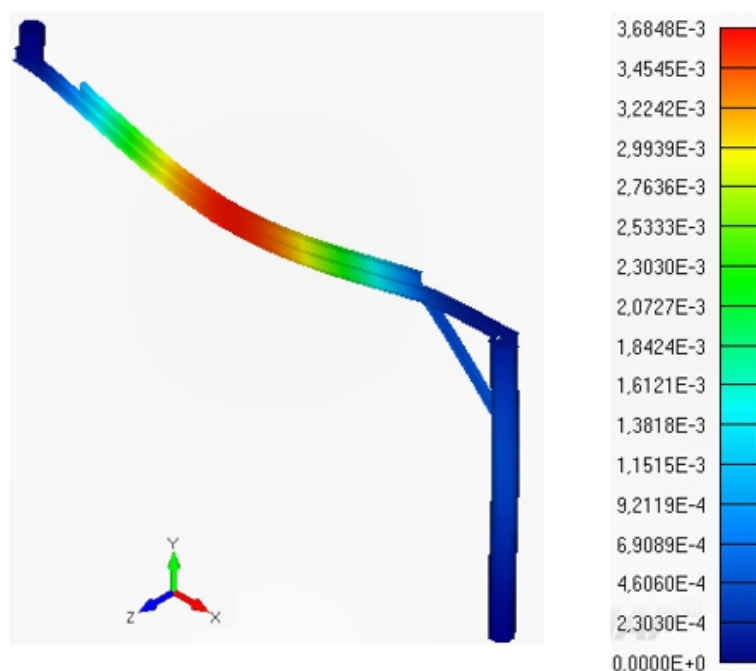


Fonte: Produção do próprio autor.

Observa-se que para o caso de carga mais crítico (LC51 - carga de içamento no centro), as tensões no modelo reforçado são inferiores ao admissível, ou seja, o reforço é eficiente. Dessa forma, a estrutura fica aprovada segundo o critério da norma AISC.

A Figura 32 ilustra o deslocamento resultante e a configuração deformada do caso de carga LC51, estando o deslocamento dentro do admissível também, segundo NBR8800.

Figura 32 - Deslocamento resultante [m] – Configuração deformada em escala LC51



Fonte: Produção do próprio autor.

4.4.2 Flambagem

A análise de flambagem foi elaborada considerando todos os casos de carga combinados, exceto o caso de carga LC54, visto que a carga admissível de içamento é a própria carga nominal de 1000 Kg. Os cálculos do autovalor admissível e da margem de segurança são feitos da mesma forma que a estrutura original. A Tabela 13 mostra os autovalores de flambagem para o modelo reforçado.

Tabela 13 – Autovalores de flambagem - Reforçado.

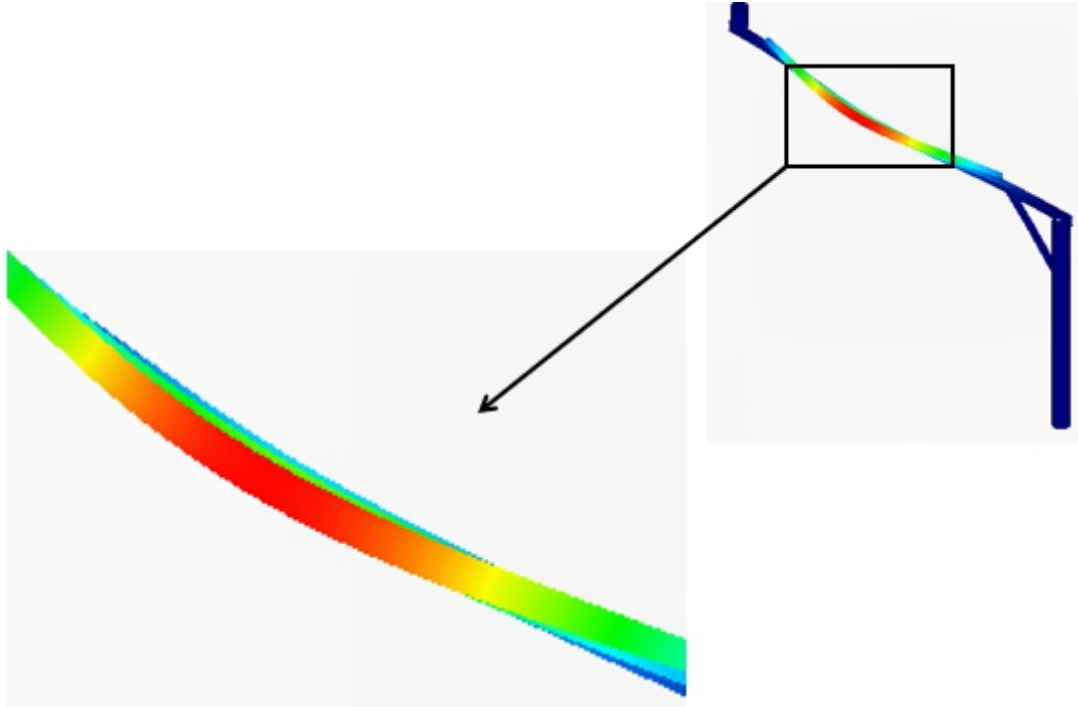
LC	Modo	Local do modo de flambagem	Autovalor ($\lambda_{\text{máx}}$)	Autovalor admissível (λ_{adm})	M.S. [%]
51	1	Monovia	3,63	2,38	52,5
52	1	Monovia	41,29	2,38	M.S.E
53	1	Monovia	12	2,38	M.S.E

Fonte: Produção do próprio autor.

*M.S.E quando M.S. > 150.

A Figura 33 ilustra o resultado mais crítico, que é o caso de carga LC51.

Figura 33 - Modo de flambagem ($\lambda = 3,63$) LC51 – Configuração deformada.



Fonte: Produção do próprio autor.

A configuração deformada dos outros modos de flambagem para os outros carregamentos foram semelhantes ao caso de carga LC51.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho mostra como é feita a análise estrutural de um componente mecânico usado na indústria mineradora, considerando principalmente dois fatores: as tensões von Mises e os modos de flambagem. Essa análise é feita com o uso de um software de elementos finitos e o pensamento crítico de um analista, pois um não exclui o outro, mas se complementam.

O software precisa ser usado com conhecimentos inerentes à utilização das ferramentas e dos dispositivos do programa, mas também com conhecimentos técnicos que são aprendidos na graduação de engenharia mecânica. Como uma ferramenta, o software só gera resultados coerentes caso o analista impute coerentemente os dados.

A análise estrutural da monovia para carregamento de minério indica que, apesar dos autovalores de flambagem serem superiores ao admissível, não sendo esperados, portanto, problemas de estabilidade estrutural, bem como o deslocamento resultante estar de acordo com a NBR8800, as tensões von Mises foram superiores ao admissível. Mesmo não sendo superiores a tensão de escoamento do material, a estrutura fica reprovada por critérios de segurança da norma AISC.

Além da análise estrutural de um componente já existente e em uso, é feita a análise de uma alternativa de reforço estrutural. Dessa forma, novos resultados são gerados e novamente é feita a apuração e interpretação desses resultados pelo analista mecânico. Após isso, conclui-se a aprovação da estrutura reforçada, visto que as tensões von Mises são inferiores ao admissível e os autovalores de flambagem são superiores ao admissível.

Este trabalho, além de fazer a análise estrutural propriamente dita, mostra de forma didática e simples os critérios e conceitos que podem ser aplicados a outras análises e outras estruturas. Sendo assim, pode servir como base para agregar conhecimentos a engenheiros, analistas mecânicos, estudantes de engenharia e outros interessados no assunto.

REFERÊNCIAS

ALVES FILHO, A. **Elementos finitos**: a base da tecnologia CAE. Recife: Erica, 2000.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. **AISC**: specification for structural steel buildings. Chicago: AISC, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8400**: cálculo de equipamento para levantamento e movimentação de cargas. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifício. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.