



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
ENGENHARIA MECÂNICA**

**AVALIAÇÃO DE SISTEMA MONOVIA PARA IÇAMENTO DE CARGA
ATRAVÉS DA FERRAMENTA CYPE 3D**

JOSEAN SILVA LIMA

**São Luís
2023**



JOSEAN SILVA LIMA

**AVALIAÇÃO DE SISTEMA MONOVIA PARA IÇAMENTO DE CARGA ATRAVÉS DA
FERRAMENTA CYPE 3D**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à coordenação do curso de Engenharia Mecânica como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador:

Prof. Dr. Dalmo Inacio Galdêz Costa.

**São Luís
2023**

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Lima, Josean.

AVALIAÇÃO DE SISTEMA MONOVIA PARA IÇAMENTO DE CARGA
ATRAVÉS DA FERRAMENTA CYPE 3D / Josean Lima. - 2023.
51 f.

Orientador(a): Dalmo Inacio.

Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica,
Universidade Federal do Maranhão, Coordenação do curso de
engenharia mecânica - UFMA, 2023.

1. Elementos finitos. 2. Içamento de carga. 3.
Monovia. I. Inacio, Dalmo. II. Título.

JOSEAN SILVA LIMA

**AVALIAÇÃO DE SISTEMA MONOVIA PARA IÇAMENTO DE CARGA ATRAVÉS DA
FERRAMENTA CYPE 3D**

Trabalho aprovado. São Luís, 20 de julho de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Dalmo Inacio Galdêz Costa - UFMA/Orientador

Prof. Dr. Vilson Souza Pereira - UFMA/Engenharia Mecânica

Prof. Dr. Edilson Dantas Nobrega - UFMA/Engenharia Mecânica

RESUMO

Sistemas de transporte de cargas elevadas desempenham um papel crucial na indústria, sendo a monovia uma opção amplamente utilizada. No entanto, é essencial avaliar e analisar esses sistemas para identificar possíveis falhas nos projetos, dimensionamentos e folgas das ligações. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar um sistema de monovia para o içamento de cargas, utilizando a ferramenta *Cype 3D*. A análise foi realizada considerando diferentes configurações de monovias, incluindo opções retilíneas e curvilíneas. Foram investigados os pontos críticos do arranjo estrutural, o tipo de perfil aplicado e as condições de carregamento e contorno. Utilizando o método dos elementos finitos, foi possível obter informações sobre o comportamento estático da monovia e realizar a aplicação de geometrias alternativas para os perfis de vigas selecionados. Os resultados indicaram que a carga aplicada causa deslocamentos que excedem os limites estabelecidos pela norma, ressaltando a importância dessa avaliação para garantir a segurança e integridade da estrutura. A utilização do método dos elementos finitos em conjunto com a ferramenta *Cype 3D* permitiu uma análise detalhada do sistema, fornecendo informações essenciais para aprimorar o projeto e o dimensionamento da monovia. Em suma, este estudo demonstrou a importância da avaliação criteriosa de sistemas de monovia para o içamento de cargas. A utilização do método dos elementos finitos aliado à ferramenta *Cype 3D* permitiu identificar pontos críticos e fornecer análises valiosas para aprimorar a segurança e eficiência da estrutura.

Palavras-chave: Monovia; Içamento de carga; Elementos finitos.

ABSTRACT

High load conveying systems play a crucial role in the industry, being the monorail is a widely used option. However, it is essential to evaluate and analyze these systems to identify possible flaws in the projects, sizing and gaps in the connections. In this context, the present work aims to evaluate a monorail system for the lifting loads, using the tool Cype 3D. The analysis was carried out considering different configurations of monorails, including straight and curved options. The critical points of the structural arrangement were investigated, the type of profile applied and the loading and boundary conditions. Using the method of finite elements, it was possible to obtain information about the static behavior of the monorail and carry out the application of alternative geometries for the selected beam profiles. The results indicated that the applied load causes displacements that exceed the limits established by standard, emphasizing the importance of this assessment to ensure the safety and integrity of the structure. The use of the finite element method in conjunction with the Cype 3D tool allowed a detailed analysis of the system, providing essential information to improve the design and sizing of the monorail. In short, this study demonstrated the importance of careful evaluation of monorail systems for lifting loads. The use of the method of finite elements combined with the Cype 3D tool allowed identifying critical points and providing valuable analytics to improve structure safety and efficiency.

Keywords: Monorail; Load lifting; Finite element method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo de perfil e talha.	7
Figura 2 – Calandragem.	11
Figura 3 – Tipos de perfis metálicos.	12
Figura 4 – Exemplo ilustrativo da seção transversal de perfil I.	12
Figura 5 – Malha de elementos finitos - Viga I entre monovia e coluna de apoio.	14
Figura 6 – Etapas da solução de um problema utilizando o método de elementos finitos.	14
Figura 7 – Classificação de máquinas de levantamento.	15
Figura 8 – Sistema de transporte de carga de minério.	16
Figura 9 – Ilustração de pórticos reticulados.	17
Figura 10 – Ilustração da monovia.	18
Figura 11 – Pórtico de sustentação.	20
Figura 12 – Perfil do caminho monovia.	21
Figura 13 – Modelo de monovia a ser avaliado.	21
Figura 14 – Monovia <i>Cype 3D</i> [®] a) Vista isométrica esquerda e b) Vista isométrica esquerda traseira.	22
Figura 15 – Classificação geral.	23
Figura 16 – Vista ampliada do pórtico.	24
Figura 17 – Aplicação da carga nos elementos.	25
Figura 18 – Definição da carga aplica.	26
Figura 19 – Deslocamento - caso 01.	27
Figura 20 – Deslocamentos: a) Caso 02 e b) Caso 03.	28
Figura 21 – Deslocamento - caso 04.	29
Figura 22 – Deslocamento - caso 05.	30
Figura 23 – Monovia: a) Aplicação de carga e b) Deslocamento - caso 06.	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores mínimos de Q	17
Tabela 2 – Propriedades mecânicas do ASTM A36.	20
Tabela 3 – Medidas do perfil "I" do caminho da monovia.	21
Tabela 4 – Aproveitamentos obtidos do Apêndice C.	32

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	6
2	JUSTIFICATIVA	8
3	OBJETIVOS	9
3.1	OBJETIVO GERAL	9
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
4.1	ESTRUTURAS METÁLICA	10
4.1.1	Propriedades geométricas dos perfis metálicos	12
4.1.2	Análise por Elementos Finitos (AEF)	12
4.2	SISTEMA DE TRANSPORTE DE CARGA	14
4.2.1	Pórticos e Monovia	17
5	METODOLOGIA	20
5.1	OBJETO DE ESTUDO	20
5.2	FERRAMENTAS DE ESTUDO	22
5.3	MODELO DA SIMULAÇÃO EM <i>CYPE 3D</i>	23
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
6.1	DESLOCAMENTO	26
6.1.1	Primeiro Caso	27
6.1.2	Segundo e Terceiro caso	27
6.1.3	Quarto caso	29
6.1.4	Quinto caso	29
6.1.5	Último caso	30
6.2	APROVEITAMENTO DA RESISTÊNCIA	32
7	CONCLUSÃO	34
7.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	34
	REFERÊNCIAS	36

APÊNDICE A – PARÂMETROS DIMENSIONAIS	38
APÊNDICE B – RESISTÊNCIA	41
APÊNDICE C – APROVEITAMENTO	42

1 INTRODUÇÃO

Durante a operação e produção de equipamentos e estruturas de pequeno, médio e grande porte, faz-se necessário o uso de elementos que efetuem o içamento e movimento de cargas sem obstruir a passagem do piso (FERREIRA, 2008). Tais sistemas de transporte de carga são as pontes rolantes e monovias, pois estes, podem ser dimensionados e adaptados conforme as condições do meio (SOARES, 2011).

Um sistema de monovia, pode ser definido como dispositivo de transporte de carga ou ponte rolante suspensa para aumento da produtividade do meio, similar as pontes rolantes que transportam cargas através de vigas horizontais que circulam em uma via móvel (CAMPOS, 2018).

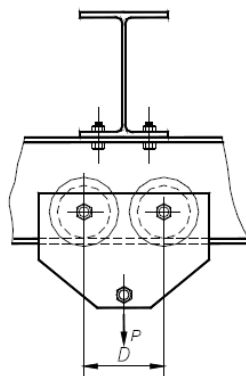
Segundo Rocha (2019), para analisar a monovia, deve-se verificar todas as propriedades do perfil selecionado, pois estas podem afetar parâmetros como resistência à flexão. Sendo assim, durante sua operação é essencial realizar uma avaliação cuidadosa da estrutura envolvida. Isso inclui verificar se as propriedades do perfil estrutural selecionado são adequadas para suportar as cargas esperadas (SANTOS, 2018).

A resistência à flexão é um dos parâmetros críticos a serem considerados, uma vez que tal propriedade pode comprometer a integridade estrutural da monovia. Além da resistência à flexão, é fundamental analisar a base metálica do sistema de monovia, onde podem estar presentes cordões de solda. Falhas nesses cordões, como trincas, podem levar a falhas estruturais graves. Portanto, é necessário realizar uma inspeção detalhada e avaliação desses elementos soldados, garantindo que estejam em perfeitas condições de resistir às tensões impostas durante o transporte e movimentação da carga (SOUZA, 2018).

As falhas estruturais em um sistema de monovia podem ocorrer devido a diversos fatores, incluindo o desgaste e envelhecimento dos componentes, a sobrecarga excessiva ou inadequada, a falta de manutenção adequada e até mesmo erros de projeto (SORDI, 2016). É fundamental que a avaliação da estrutura leve em consideração todos esses aspectos, a fim de identificar possíveis pontos de falha e tomar medidas corretivas antes que ocorram acidentes graves.

A Figura 1 mostra o elemento estrutural que compõe o caminho de rolamento, que pode variar em vigas metálicas ou de concreto cuja movimentação é realizada por uma talha manual, elétrica ou pneumática (FERREGUETTI, 2018). As grandezas indicadas por "*D*" e "*P*" são as distâncias entre os centros das rodas e a força peso que a carga exerce no dispositivo, respectivamente.

Figura 1 – Modelo de perfil e talha.



Fonte: (FEREGUETTI, 2018).

Em conformidade com norma ABNT 8400:1984 as monovias possuem diversas configurações, como em curvas, retas, apoiadas por colunas e suspensa por colunas, permitindo sua variação de perfil estrutural, o que influencia em diversos comportamentos estruturais durante o içamento da carga, além do efeito da movimentação da mesma em seu caminho, gerando pontos críticos.

Os pontos críticos implicam em falhas estruturais durante a operação, então, a análise por métodos matemáticos ou numéricos permitem identificar esses pontos críticos de tal maneira a criar estratégias para eliminá-los (FERREIRA, 2008).

O método dos elementos finitos é uma ferramenta de análise estrutural amplamente utilizada para avaliar a resistência e o comportamento de sistemas de monovia. Esse método permite modelar a estrutura de forma detalhada, dividindo-a em elementos menores para calcular as tensões e deformações em cada região (COOK et al., 2007). Dessa forma, é possível identificar áreas de alta concentração de tensões que podem indicar possíveis falhas estruturais.

Soares (2011) destaca que no transporte de carga pode ocorrer falhas estruturais principalmente na base metálica, caso haja cordões de solda que estejam danificados. Sendo assim, é necessário avaliar o efeito que a carga pode exercer no sistema da monovia, isto é, seu caminho e perfil selecionado, pois há o risco de falha estrutural, podendo gerar acidentes durante o içamento e movimentação da carga.

A ferramenta *CYPE 3D* é um *software* de engenharia que auxilia no projeto e análise de estruturas metálicas. Ela oferece recursos avançados para modelagem, dimensionamento e verificação de elementos estruturais, incluindo monovias (SILVA, 2017). Através do dela, é possível realizar análises precisas do comportamento da estrutura, considerando as cargas aplicadas, as características dos materiais e as condições de projeto específicas.

2 JUSTIFICATIVA

As monovias possuem grande abrangência quanto a sua aplicação, devido a facilidade de movimentação de cargas elevadas. Seus elementos estruturais e equipamentos de içamento e movimentação, possuem diversas configurações, o que permite a montagem em ambientes de difícil acesso exigindo adaptações, que quando mal adotadas podem apresentar fatores de risco tanto para movimentação da carga quanto para o seu arranjo estrutural.

Devido as problemáticas de falhas estruturais que podem ocorrer tanto na sua vida útil, quanto em seu içamento, avaliar este sistema, torna-se fundamental para segurança dos operadores e para otimização de aplicação. Além disso, a seleção de perfil de viga para montagem do caminho que a talha percorre é de fundamental relevância devido aos esforços dinâmicos gerados da carga em movimento podendo ocasionar uma vida útil reduzida.

Outra causa comum de falhas estruturais em sistemas de monovia é a inadequação do projeto e dimensionamento. A escolha inadequada de materiais, perfis de vigas ou conexões pode comprometer a resistência e estabilidade da estrutura, levando a colapsos e acidentes (SANTOS; SOUZA, 2018).

Também, destaca-se a montagem dos pórticos de sustentação, onde o elemento estrutura de viga de suporte pode falhar na elaboração de projetos, dimensionamento e folga nas ligações.

Há diversos estudos sobre dimensionamento de monovias, porém quando se trata de avaliação da estrutura do efeito de deslocamento que a carga exerce, o aproveitamento da resistência do material, teste de perfis, elementos de viga soldados da mesma, tem-se pouca abrangência, e quando não verificado, torna-se um fator passível de acidentes.

Apesar de já existirem estudos quanto ao dimensionamento de sistemas de monovia, ainda há poucos trabalhos que sistematizam a utilização de ferramentas como o método dos elementos finitos combinado com as normas de projetos. Portanto, é bastante relevante desenvolver um trabalho que preencha essa lacuna.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Realizar uma análise estrutural de um sistema de monovia sob a ação de cargas em sua trajetória através da ferramenta *software Cype 3D*[®], que utiliza o método dos elementos finitos, com a finalidade de verificar os deslocamentos que esta sofre para determinar pontos críticos na estrutura.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Avaliar e selecionar perfis típicos utilizados em monovia;
2. Analisar se os carregamentos e condições de contorno estão de acordo com as normas ABNT:NBR:8400:1984 e ABNT:NBR:8800:2008;
3. Realizar a análise estrutural com auxílio do software *software Cype 3D*[®]
4. Identificar pontos críticos do arranjo estrutural suscetíveis a falhas;
5. Analisar efeito de deslocamento que a carga exerce.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 ESTRUTURAS METÁLICA

O aço pode ser definido conforme sua composição química podendo variar em aço-carbono e aço-liga (PFEIL, 2009). Segundo Sáles (2019), para seleção de aços estruturais, deve-se considerar propriedades como:

- Ductilidade;
- Homogeneidade;
- Soldabilidade;
- Resistência a tração;
- Resistência ao escoamento;
- Tensão de ruptura;
- Resistência à corrosão.

Assim, um exemplo de material são os aços-carbono, como ASTM A-36, que atende essas demandas. Consoante a norma ABNT 8800:2008 para determinação de diversos parâmetros de um material como aço-carbono, deve-se considerar a resistência de cálculo que pode ser obtida pela Equação (1).

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_m} \quad (1)$$

f_d → Resistência de cálculo;

f_k → Resistência característica;

γ_m → Coeficiente de ponderação da resistência.

Onde

$$\gamma_m = \gamma_{m1} \gamma_{m2} \gamma_{m3}$$

γ_{m1} → Considera a variabilidade da resistência dos materiais;

γ_{m2} → Considera a diferença entre a resistência do material no corpo de prova e na estrutura;

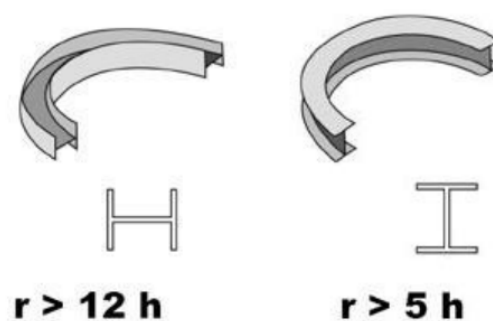
γ_{m3} → Considera os desvios gerados na construção e as aproximações feitas em projeto do ponto de vista das resistências.

Tais fatores atuam quando se avalia a proporcionalidade entre as ações e seus efeitos, que decorre das relações de tensão e deformação ou por conta de sua geometria (PFEIL, 2009). Dessa forma, o desempenho de uma estrutura metálica depende do comportamento durante sua vida útil, quando submetida a solicitações, a qual deve operar sem perda de estabilidade e deslocamentos excessivos (SÁLES et al., 2019). De acordo com Silva (2017), para atingir o desempenho esperado de uma estrutura metálica, deve-se levar em consideração material, perfis, vigas, pilares e ligações.

Para Pinheiro (2005), estruturas metálicas possuem boa precisão milimétrica o que propicia um alto controle de qualidade, além de possibilitar a entrega do produto acabado mais rápido e com pouca geração de resíduos quando comparado à métodos convencionais como em projetos estruturais com alvenaria.

Quanto a forma dos materiais aplicados, destaca-se o uso de perfis, barras e cantoneiras para confecção de elementos estruturais como telhados, pontes, guindastes, escadas e mezaninos (PINHEIRO, 2005). Estes, apresentam elementos com curvaturas para montagem dos elementos estruturais. Dessa forma, a Figura 2 apresenta um elemento de viga calandrado com h variando entre 100 à 500 mm de uma viga com perfil H com seu respectivo raio de curvatura. Para obter tal elemento de viga curvado é aplicado a calandragem, processo de transformação em que a chapa é passada entre dois ou mais rolos pressionando o objeto até achatá-lo, e, logo após, passa pelo processo de soldagem formando uma viga soldada (NARDIN, 2008; PFEIL, 2009).

Figura 2 – Calandragem.



Fonte: (NARDIN, 2008).

4.1.1 Propriedades geométricas dos perfis metálicos

Há diversos tipos de perfis metálicos como H, I, L, U e T com diferentes resistências e diversas aplicações. A Figura 3 mostra alguns dos citados como o perfil I, H e T.

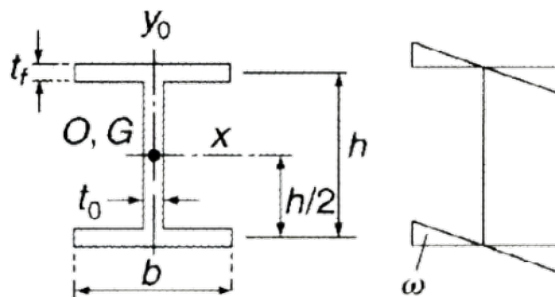
Figura 3 – Tipos de perfis metálicos.



Fonte: (NARDIN, 2008).

Segundo Nardin (2008) as propriedades geométricas que englobam os tipos de perfis da Figura 3 são dadas pela constante de empenamento (C_ω), momento de inércia à torção pura (J), momentos de inércia de área, área da seção transversal, raio de giração e centróide. Para determinar essas propriedades de momento de inércia a torção pura e a constante de empenamento, utiliza-se as Equações (2) e (3), respectivamente, cujas componentes estão expostas na Figura 4, que mostra a seção transversal do perfil I.

Figura 4 – Exemplo ilustrativo da seção transversal de perfil I.



Fonte: (GUANABARA, 2010) adaptado.

$$J = \frac{1}{3}(2bt_f^3 + ht_0^3) \quad (2)$$

$$C_\omega = I_f \frac{h^2}{2} = \frac{t_f b^3 h^2}{24} = \frac{h^2 I_y}{4} \quad (3)$$

4.1.2 Análise por Elementos Finitos (AEF)

O método dos elementos finitos (MEF) possui grande aplicação nos ramos da engenharia pela abordagem matemática através de modelagem e resolução de forma numérica de problema

complexos (COOK et al., 2007; TRIVEDI, 2014).

Consoante a Bhavikatti (2005), um modelo de elementos finitos é composto por um conjunto de pontos denominados nós conectados de maneira a formar o elemento finito (EF), a união destes elementos formam aquilo que é conhecido como malha. A análise estrutural através do método dos elementos finitos para um elemento particular resulta em um sistema de equações mostrado na Equação (4), onde $[k]$ é a matriz de rigidez do elemento, $[\delta]$ vetor de deslocamento nodal do elemento e $[F]$ vetor força nodal (AZEVEDO, 2003; COOK et al., 2007).

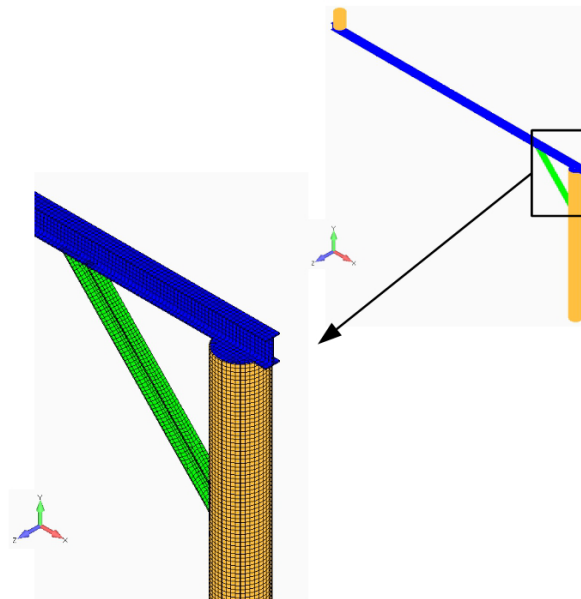
$$[k]_e [\delta]_e = [F]_e \quad (4)$$

As propriedades do elemento são usadas para montar a matriz de rigidez global composta pelas equações do sistema, onde suas restrições são feitas através das condições de contorno do problema (AZEVEDO, 2003; COOK et al., 2007). Dessa forma, Bhavikatti (2005) define etapas para análise de elementos finitos como:

1. Selecionar variáveis de campo adequadas e os elementos;
2. Descrever os elementos contínuos;
3. Selecionar as funções de interpolação;
4. Calcular matrizes e vetores dos elementos;
5. Montar matriz de rigidez global;
6. Aplicar as condições de contorno do problema;
7. Resolver as equações do sistema para obter as incógnitas nodais.

A Figura 5 mostra a malha de elementos finitos de uma viga "I" entre a monovia e a coluna de apoio, mostrando os elementos formados com base na sua discretização e as regiões com maiores esforços para análise dos elementos finitos.

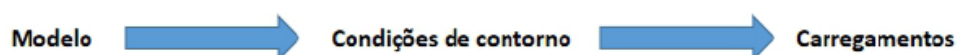
Figura 5 – Malha de elementos finitos - Viga I entre monovia e coluna de apoio.



Fonte: (ROCHA, 2019).

Rocha (2019) define que as etapas da solução de um problema que utiliza o método dos elementos finitos são divididas conforme a Figura 6. Em síntese, para aplicação do método, considera-se as restrições translacionais nas três direções (x, y, z) , localizados na região de contato do chão ou em outros elementos da estrutura. Após isso, os carregamentos nas regiões que sofreram mais esforços.

Figura 6 – Etapas da solução de um problema utilizando o método de elementos finitos.

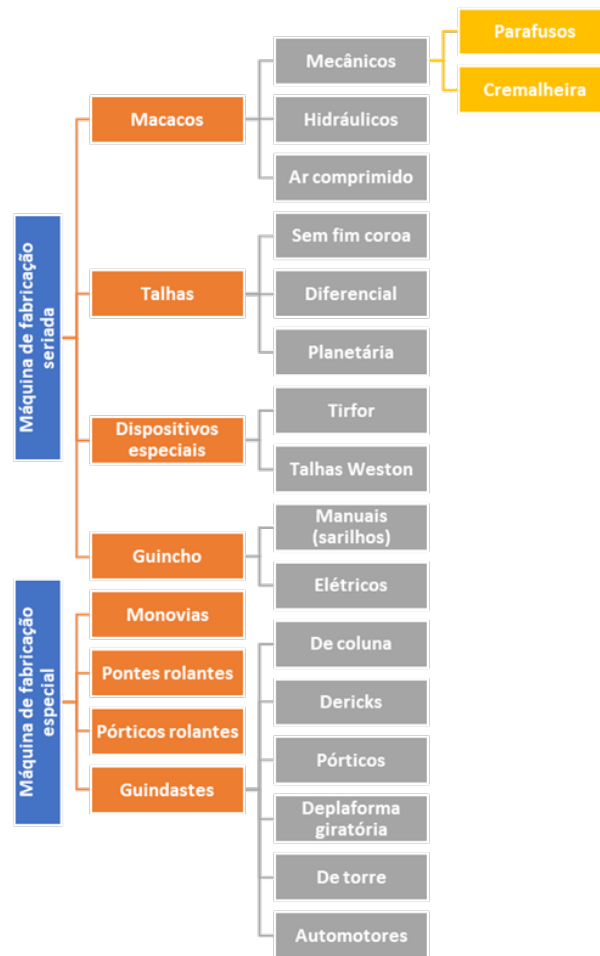


Fonte: (ROCHA, 2019) .

4.2 SISTEMA DE TRANSPORTE DE CARGA

Há diversos tipos de máquinas de elevação e transporte, que são classificados conforme seu fim, ramo industrial, sendo elas do tipo monovia, pontes rolantes, pórticos e guindastes ou em fabricação seriada, em mesmo produto em grandes quantidades, com uso de macacos, talhas, dispositivos especiais e guincho (Figura 7) (MICHELS, 2012).

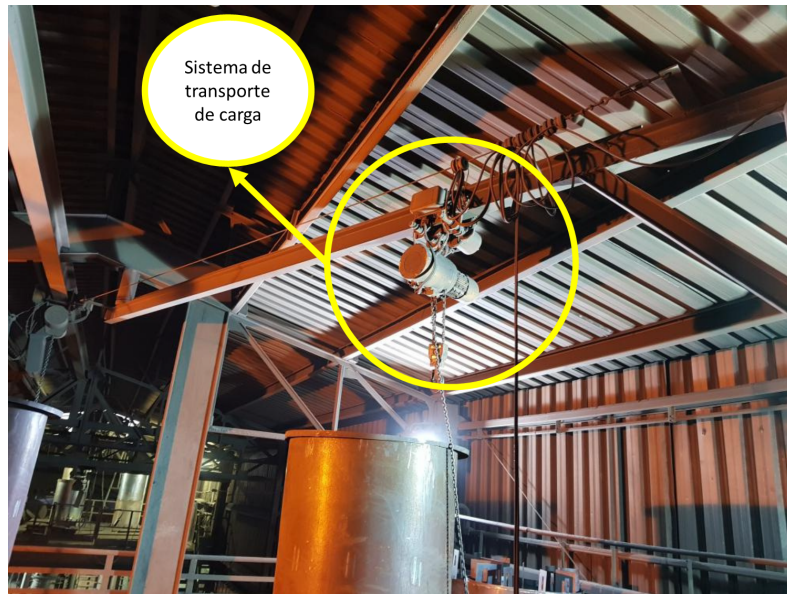
Figura 7 – Classificação de máquinas de levantamento.



Fonte: (MICHELS, 2012) editado.

Para o transporte de carga em monovias, deve-se aplicar um sistema de cabo de aço, polia e tambor, fixados em uma talha a partir de um caminho, guia estrutural que traça o limite de movimentação da talha, que pode se movimentar, considerando um eixo cartesiano da abscissa, no sentido positivo ou negativo conforme exposto na Figura 8, onde se destaca em amarelo o sistema de transporte de carga.

Figura 8 – Sistema de transporte de carga de minério.



Fonte: (ROCHA, 2019) adaptado.

Destaca-se, então, a seleção do tipo de cabo de aço, devido aos esforços de tração existente. Uma forma de determinação é realizado através da Equação (5) para obtenção do seu diâmetro mínimo.

$$D_c = Q \sqrt{T} \quad (5)$$

Q – Coeficiente de classificação do mecanismo e tipo de cabo;

T – Tração máxima que atua no cabo.

Para obter o valor de Q , utiliza-se a Tabela 1 que contém os valores mínimos conforme o tipo de cabo (ABNT, 1984).

Tabela 1 – Valores mínimos de Q .

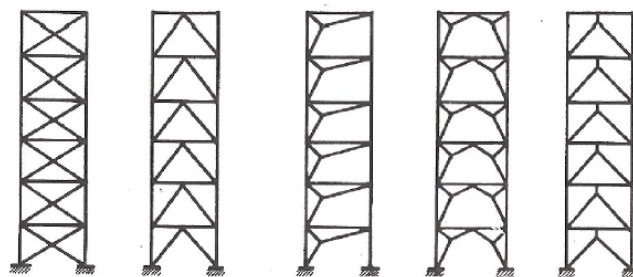
Grupo de mecanismos	Valores mínimos de Q	
	Cabo normal	Cabo não rotativo
1A m	0,265	0,280
1B m	0,280	0,300
2 m	0,300	0,335
3 m	0,335	0,375
4 m	0,375	0,425
5 m	0,425	0,475

Fonte: (ABNT, 1984) adaptado.

4.2.1 Pórticos e Monovia

Quando se trabalha com elevação e movimentação de carga, é necessário o uso de estruturas que sirvam de base para os sistemas de transporte e união da estrutura. Estes são denominados pórticos que são equipamentos constituídos por uma ou duas vigas podendo ser rolantes ou fixos com elementos verticais e horizontais (CHAVES, 2009).

A Figura 9 apresenta um modelo de pórtico do tipo reticulado cuja resistência aos esforços laterais se dá por elementos na diagonal que formam treliças verticais. Para análise de um pórtico 3D se aplica seis graus de deslocamentos generalizados em relação à cada ponto nodal de sua estrutura, visto que o mesmo vale para grelhas e vigas contínuas (COOK et al., 2007).

Figura 9 – Ilustração de pórticos reticulados.

Fonte: (CHAVES, 2009).

Michels (2012) estabelece que uma monovia é um sistema de translação formado por talhas que se deslocam sobre aba inferior de uma viga com perfil "I" que pode ser motorizada ou manual, podendo ser do tipo apoiada em colunas ou suspensas por colunas.

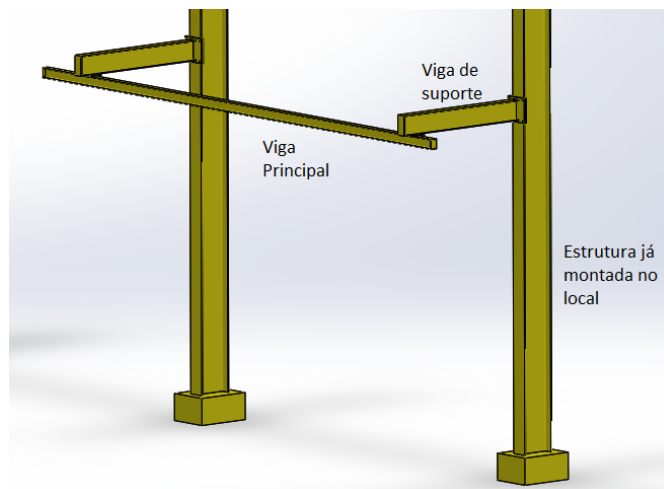
Para Santos (2018) as monovias são estruturas metálicas que podem ser retilíneas ou curvilíneas composta por um perfil de viga onde ocorre o deslocamento de equipamentos

denominados talhas que podem ser elétricas ou manuais com trajetória pré-definida (SANTOS, 2018). Já, Farinha (2022) apresenta a monovia como uma espécie de via suspensa ligada em dois pontos predeterminados para deslocamento de materiais com elevada carga.

A Figura 10 apresenta a ilustração da monovia com seus respectivos elementos estruturais, caracterizando a viga na qual se movimenta a talha sendo a viga principal, e os pórticos de sustentação dos demais conjuntos.

- Viga de suporte;
- Viga principal.

Figura 10 – Ilustração da monovia.



Fonte: (SANTOS, 2018).

Azevedo 2003 diz que as etapas requeridas para análise de um pórtico *3D* como da Figura 10, considerando uma solução pelo método dos deslocamentos para cada barra são dados por:

1. Obter a matriz de transformação;
2. Obter a matriz de rigidez da barra em relação ao referencial local;
3. Obter a matriz de rigidez da barra no referencial geral (K_g);
4. Obter o vetor das forças nodais no referencial local;
5. Obter o vetor das forças em relação ao referencial geral;

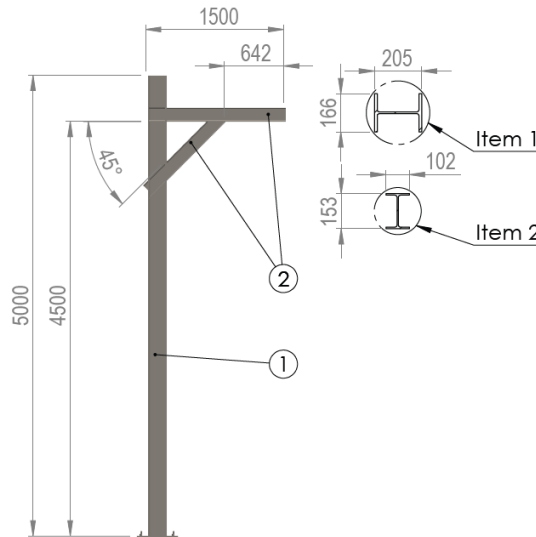
6. Aplicar as condições de apoio;
7. Determinar os deslocamentos;
8. Calcular as reações nos apoios;
9. Passar os deslocamentos relativos à barra corrente do vetor \underline{a} para \underline{a}_g .

5 METODOLOGIA

5.1 OBJETO DE ESTUDO

O objeto de estudo do presente trabalho é uma monovia do tipo forca, isto é, suspensa por coluna cujo pórtico é apresentado na Figura 11 com seus respectivos perfis de viga do tipo "I" caracterizados como "Item 1" e "Item 2" de aço ASTM A-36 com propriedades mecânicas postas na Tabela 2. Neste trabalho foi realizado uma análise estática dos elementos da estrutura metálica e verificação dos perfis selecionados.

Figura 11 – Pórtico de sustentação.



Fonte: Autoria própria.

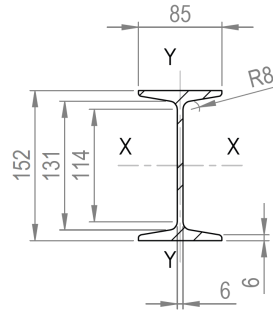
Tabela 2 – Propriedades mecânicas do ASTM A36.

Parâmetros	Limites.
Limite de escoamento (MPa)	250 min.
Limite de ruptura (MPa)	400 min.
Alongamento após ruptura (%)	20 min.

Fonte: (GERDAU, 2023) .

Foi avaliado o perfil "I" da Figura 12 com suas dimensões dadas pela Tabela 3. Essa análise foi realizada para verificação de possíveis regiões críticas, com deslocamentos excedendo as especificações da norma 8400:1984 e 8800:2008 no caminho/guia da monovia, em relação ao tipo de perfil selecionado.

Figura 12 – Perfil do caminho monovia.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 3 – Medidas do perfil "I" do caminho da monovia.

Parâmetros	Dimensões	
	Milímetros	Polegadas
Espessura da alma (t_f)	6	3/16"
Espessura da aba (t_0)	6	3/16"
Altura livre da alma (h_0)	114	4"1/2
Altura externa do perfil (h)	152	6"
Largura da aba (b)	85	3"11/32
Raio (R)	8	5/16"

Fonte: Autoria própria.

A modelagem geométrica monovia foi feita em *SolidWorks*® apresentando um conjunto de 11 pórticos e perfil "I" soldado na região de curvatura. Foi feito a comparação dos resultados obtidos com ferramenta *Cype 3D*® para verificação do efeito da carga em diversos pontos (Figura 13).

Figura 13 – Modelo de monovia a ser avaliado.



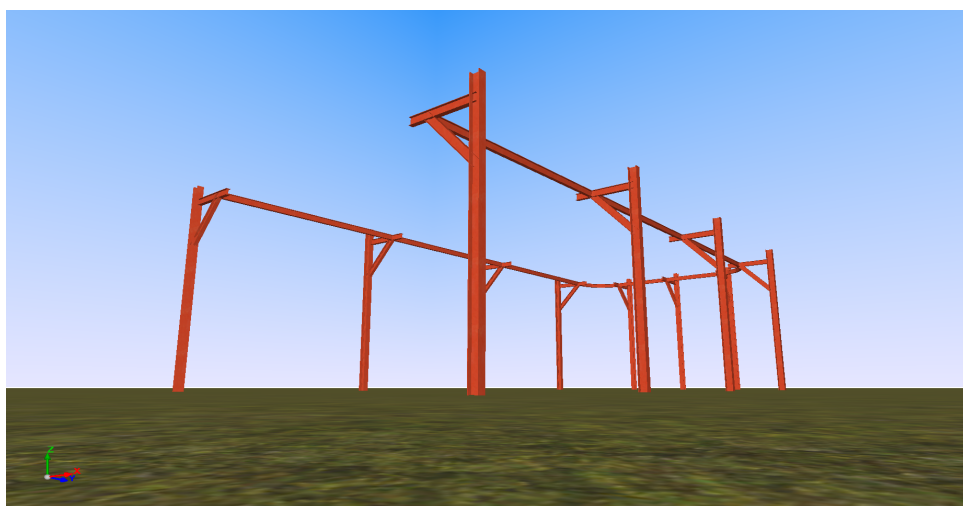
Fonte: Autoria própria.

5.2 FERRAMENTAS DE ESTUDO

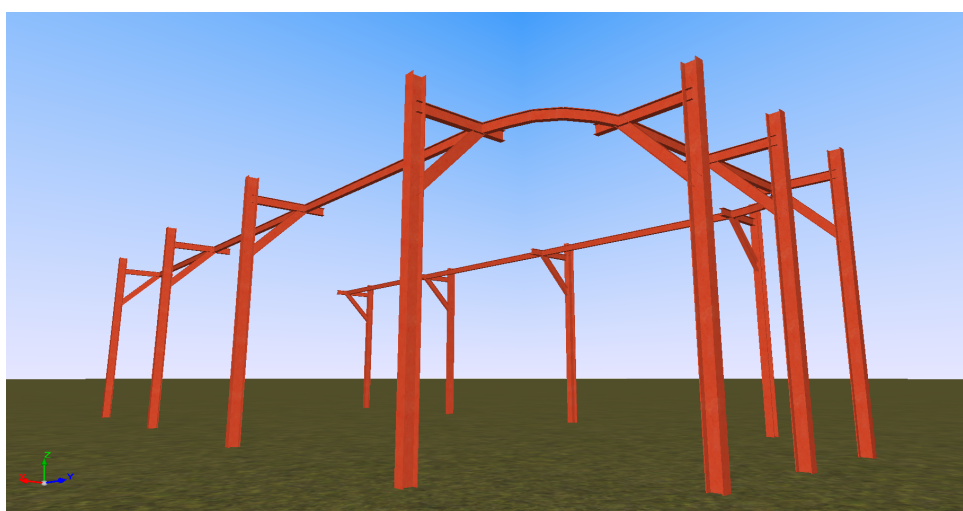
O *Cype 3D*[®] é um *software* comercial voltado para cálculo estrutural e dimensionamento de elementos estruturais metálicos, além de outros tipos de projetos estruturais (RABELO; JUNIOR, 2019). A versão utilizada foi a de 2019.i de 64 *bits* que possui a vista 3D da estrutura com as propriedades dos elementos. Esse *software* é uma ferramenta de análise estrutural e projeto que auxilia engenheiros no dimensionamento e verificação de estruturas.

As Figuras 14a e 14b mostram a monovia projetada no *Cype 3D*[®] com suas vistas isométrica esquerda e esquerda traseira. Assim, este será aplicado para verificar o comportamento da estrutura.

Figura 14 – Monovia *Cype 3D*[®]
a) Vista isométrica esquerda e b) Vista isométrica esquerda traseira.



(a)



(b)

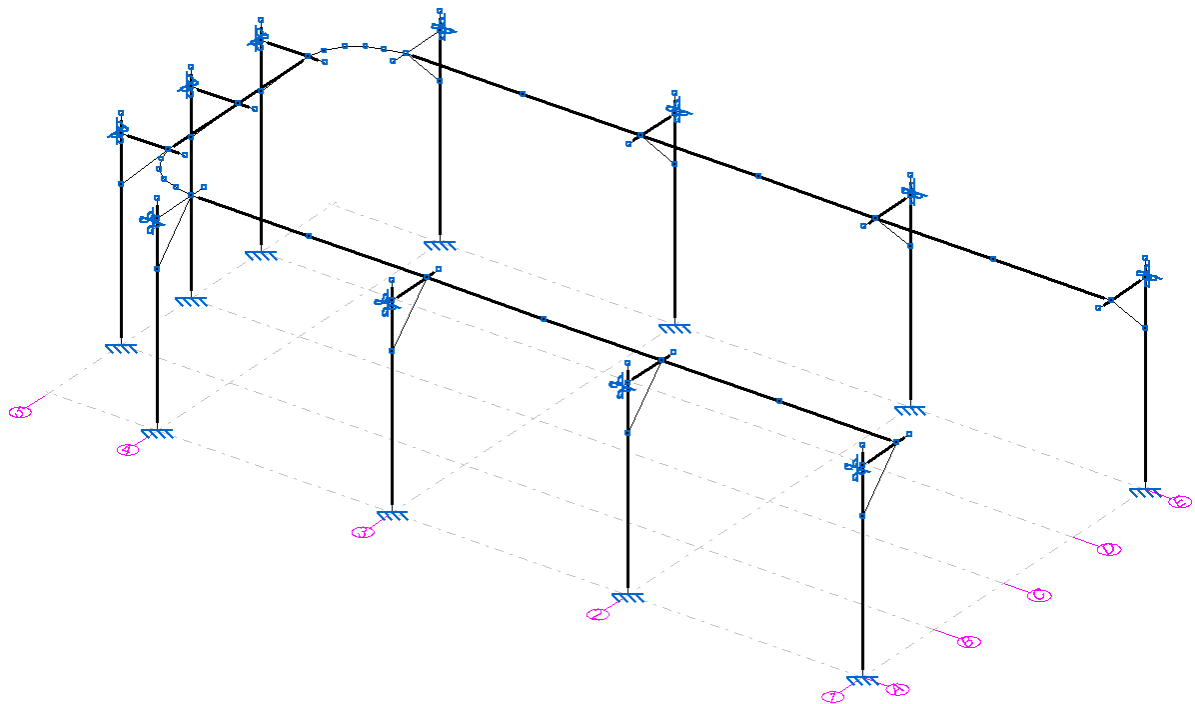
Fonte: Autoria própria.

No contexto da ferramenta, a verificação de estado limite último (ELU), de ruína/colapso estrutural, no ponto mais desfavorável, refere-se a uma análise realizada para determinar se uma estrutura atende aos requisitos de resistência e estabilidade frente às cargas máximas aplicadas. Ao realizar a verificação nos ponto mais desfavorável no *Cype 3D*[®], o *software* considera as cargas, configurações geométricas e as propriedades dos materiais para determinar se a estrutura satisfaz aos critérios de resistência e estabilidade estabelecidos pelas normas e códigos de projeto aplicáveis.

5.3 MODELO DA SIMULAÇÃO EM *CYPE 3D*

O Apêndice A exibe as vistas, respectivamente, frontal, lateral e superior com os parâmetros dimensionais dos componentes da monovia cujas dimensões do perfil "I" aplicadas são de $152 \times 5,9$ mm, na qual as regiões do caminho que apresentam curvatura tem dimensões de raio externo e interno de 1038 mm e 962 mm, respectivamente.

Figura 15 – Classificação geral.



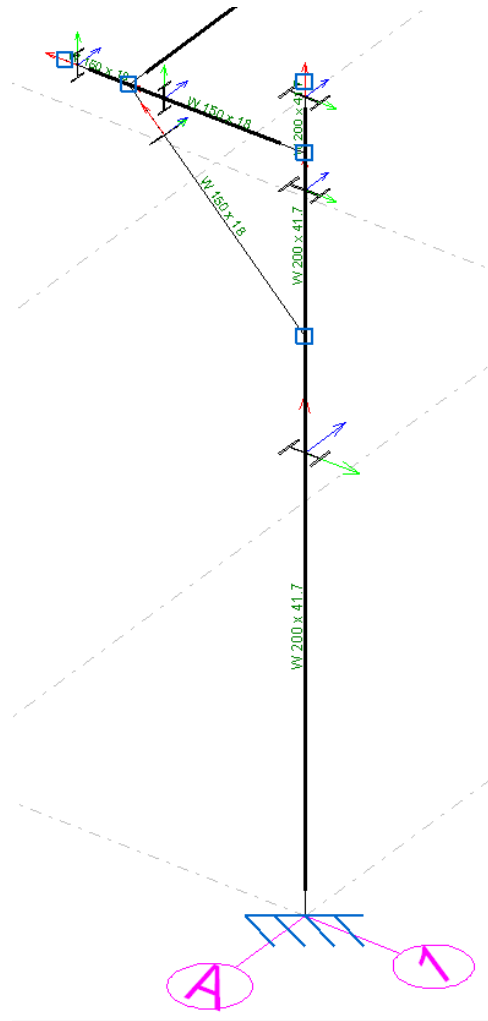
Fonte: Autoria própria.

A Figura 15 mostra a classificação geral das regiões de análise do projeto sendo variadas conforme a posição lateral indicado por número e região frontal indicado por letras. Para melhor visualização das vistas frontal, lateral e superior e os detalhes do projeto verificar Apêndice

A. A montagem do pórtico fora realizada por soldagem no processo MIG/MAG (*Metal Inert Gas/Metal Active Gas*) com arame cobreado de 1.5 mm.

A Figura 16 mostra a vista ampliada do pórtico com seus parâmetros dimensionais. Nela é possível visualizar como a ferramenta apresenta os ponto de conexão dos elementos de viga assim como suas dimensões, sendo elas:

Figura 16 – Vista ampliada do pórtico.

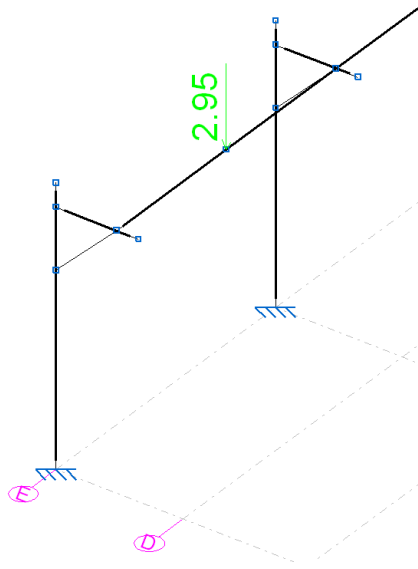


Fonte: Autoria própria.

- Perfil "W": 150 × 18 mm perfil horizontal onde é conectado o caminho da talha elétrica;
- Perfil "W": 150 × 18 mm elemento treliçado que forma a mão francesa com angulação de 45 graus;
- Perfil "W": 200 × 41,7 mm perfil de viga em vertical;

Na Figura 17 é mostrado a definição da carga aplicada no caminho/guia de 2950 N ou 2,95 kN. Nesta fora delimitado, tendo como base o plano cartesiano (x, y, z) , os pontos de operação sendo estes aproximadamente ao centro da distância entre os pórticos fora-fora, isto é, um vão de 5500 mm com uma carga aplicada em seu centro.

Figura 17 – Aplicação da carga nos elementos.

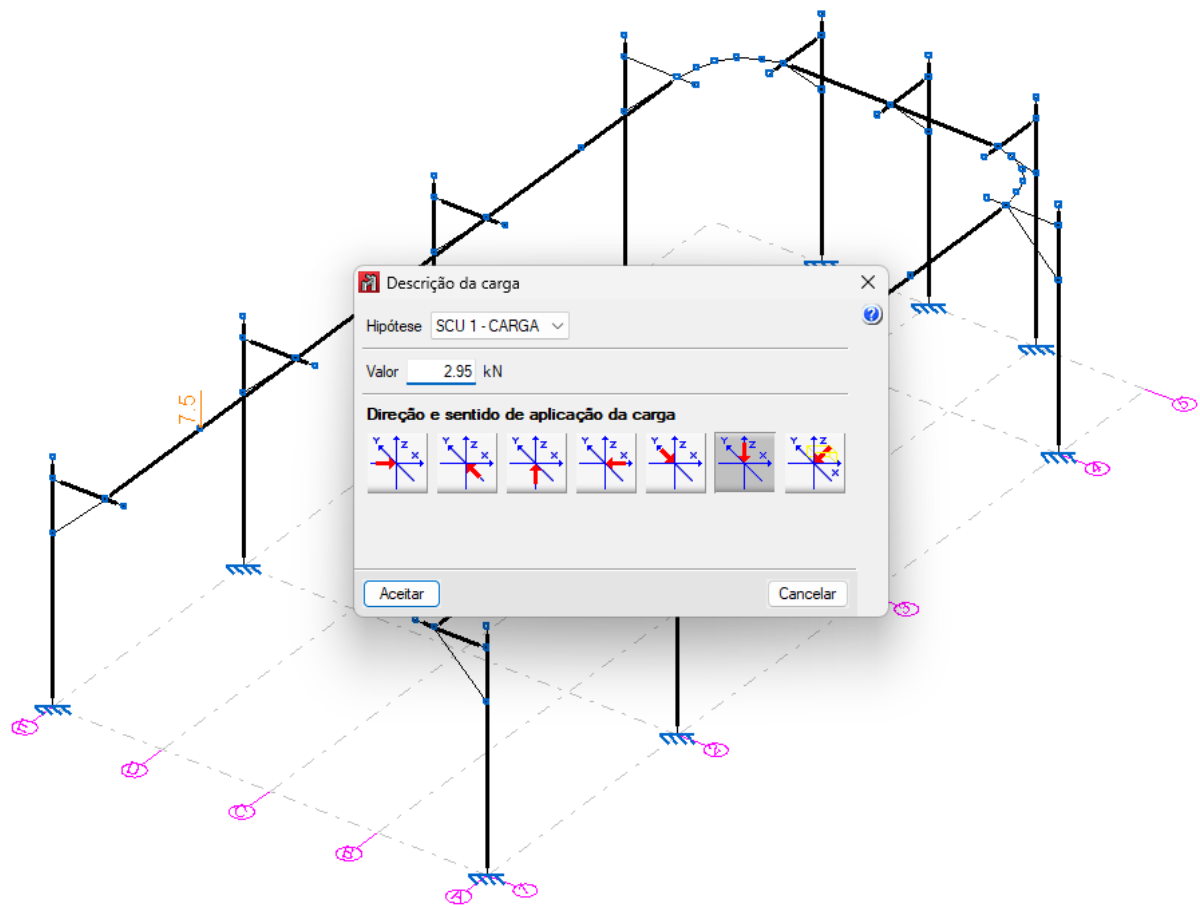


Fonte: Autoria própria.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A norma ABNT:NBR:8400:1984 trata do cálculo de equipamento para elevação e movimentação de carga, a qual estabelece os procedimentos para os cálculos da estrutura e equipamentos que executam tal atividade determinando as condições de resistência dos diversos componentes do equipamento perante as solicitações e esforços considerados. Tendo em vista tais solicitações, neste capítulo será analisado os comportamentos dos deslocamentos e das resistências da monovia, bem como o aproveitamento estrutural. Na Figura 18 é exposta a vista isométrica com detalhamento da restrição da carga imposta no plano cartesiano.

Figura 18 – Definição da carga aplica.



Fonte: Autoria própria.

6.1 DESLOCAMENTO

Os resultados foram obtidos pela aplicação dos elementos finitos da monovia da Figura 10 cuja malha utiliza elementos unidimensionais. Essa malha foi aplicada em relação ao desenho

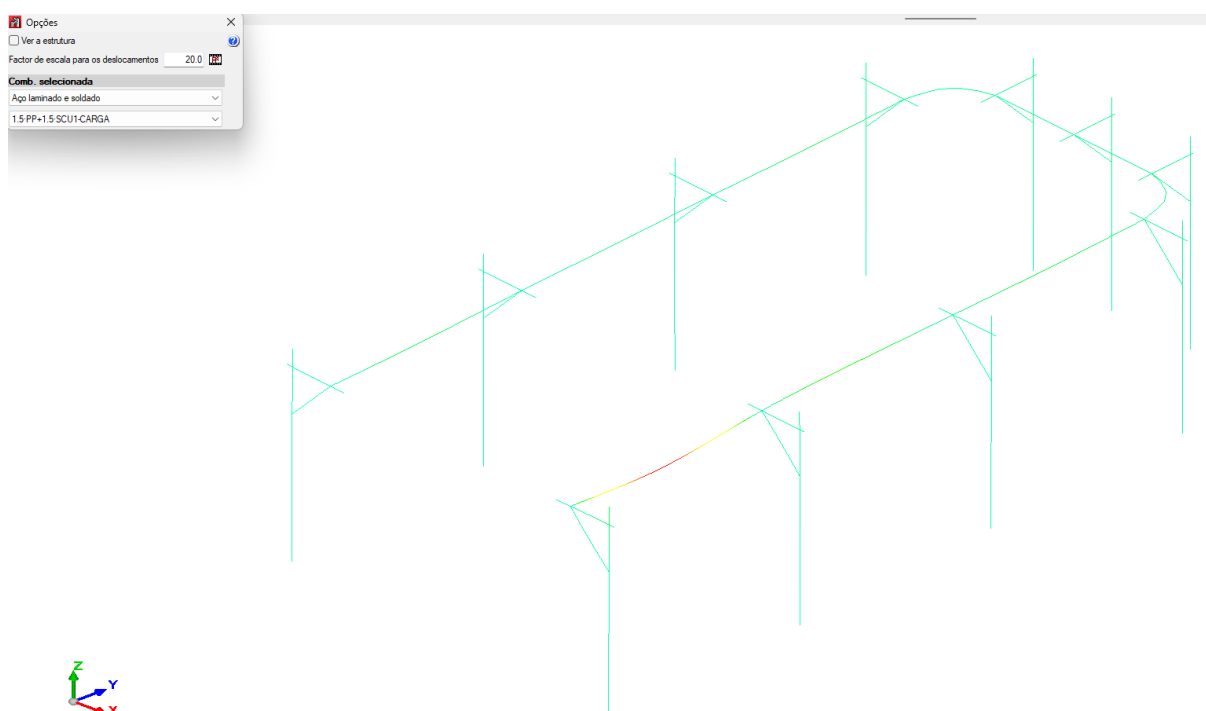
aramado do Apêndice A. A ferramenta utilizada não mostra a densidade da malha, que é um critério aplicado para obter a melhor representação sem que sobrecarregue o modelo. Para análise dos resultados abaixo foi considerado o posicionamento dos elementos da Figura 15.

6.1.1 Primeiro Caso

Avaliando o primeiro caso da Figura 19 cuja a aplicação aproximada foi de um aço laminado e soldado nas curvas, isto é, um perfil soldado. Foi usado um fator de escala para deslocamentos 20, no centro do perfil localizado entre os dois pórticos da região $E1$ para $E2$. Observou-se uma acentuação no deslocamento da viga indicada pela coloração vermelho, como mais intenso, e sua propagação variou entre a tonalidade entre laranja, amarela para verde.

Esses resultados estáticos expõe a carga crítica de içamento no centro em um trecho da monovia. Em concordância com Rocha (2019) este fenômenos característico ocorre quando as tensões do modelo são superiores às admissíveis do perfil selecionado, indicando que deve ser alterado (FARINHA, 2022).

Figura 19 – Deslocamento - caso 01.



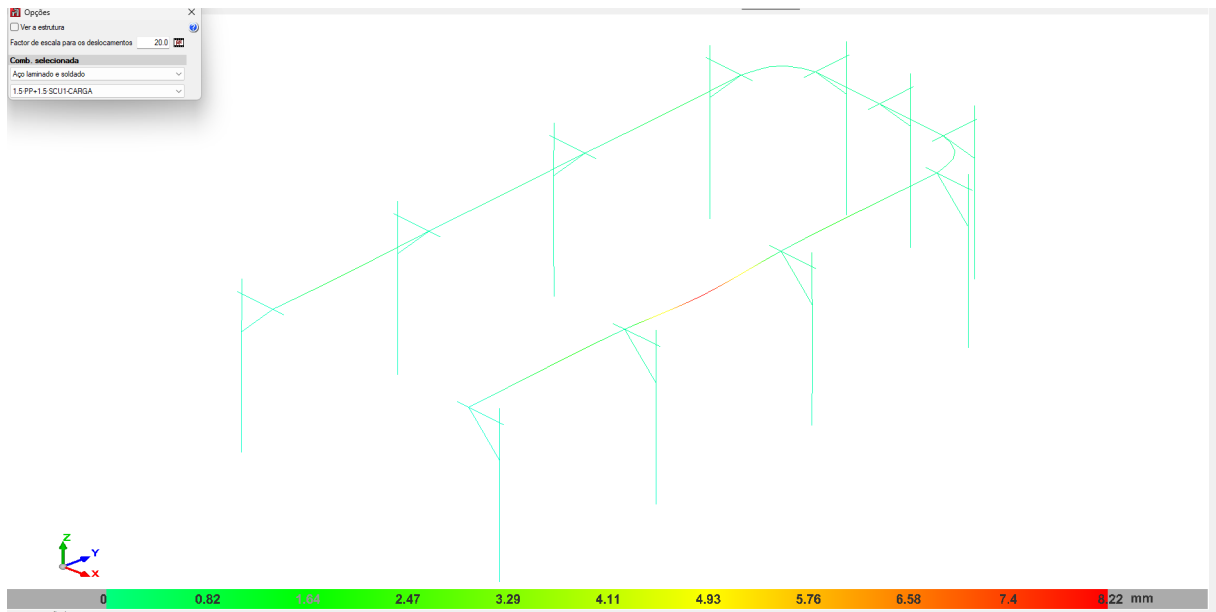
Fonte: Autoria própria.

6.1.2 Segundo e Terceiro caso

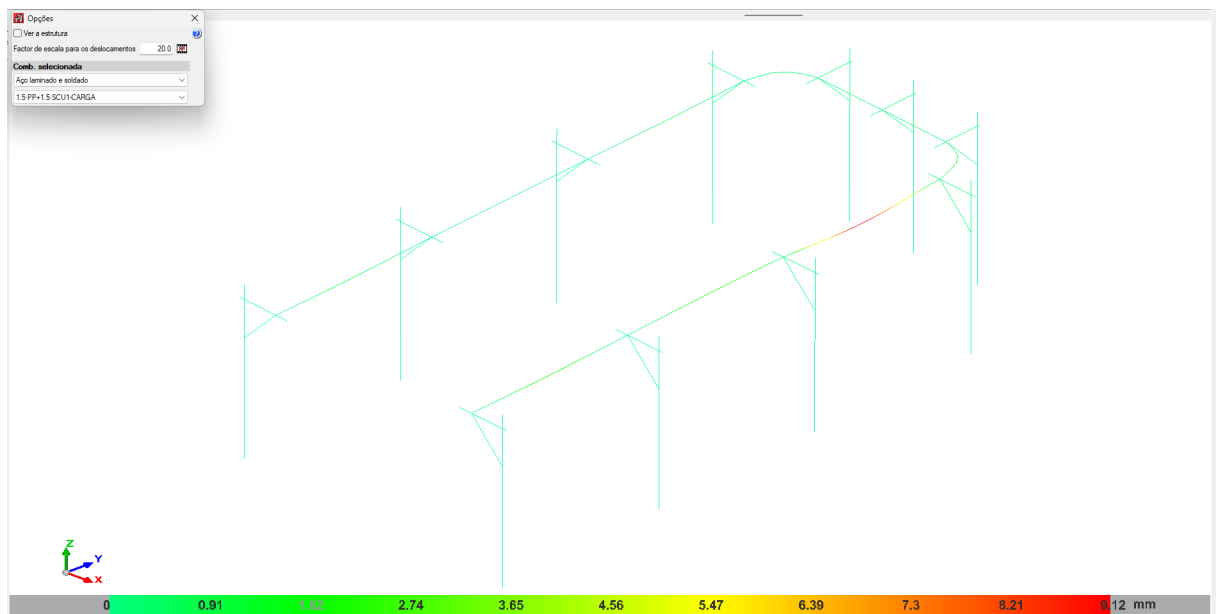
No segundo caso as Figuras 20a e 20b, para melhor entendimento do efeito do deslocamento exibido no projeto em aramado, tem-se o demonstrativo de variação de 0 à 8, 22 mm nas

regiões $E2$ para $E3$. A norma ABNT:NBR:8400:1984 considera que as falhas possíveis ocorrem quando há ultrapassagem do limite de escoamento e limite de resistência à fadiga.

Figura 20 – Deslocamentos:
a) Caso 02 e b) Caso 03.



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria.

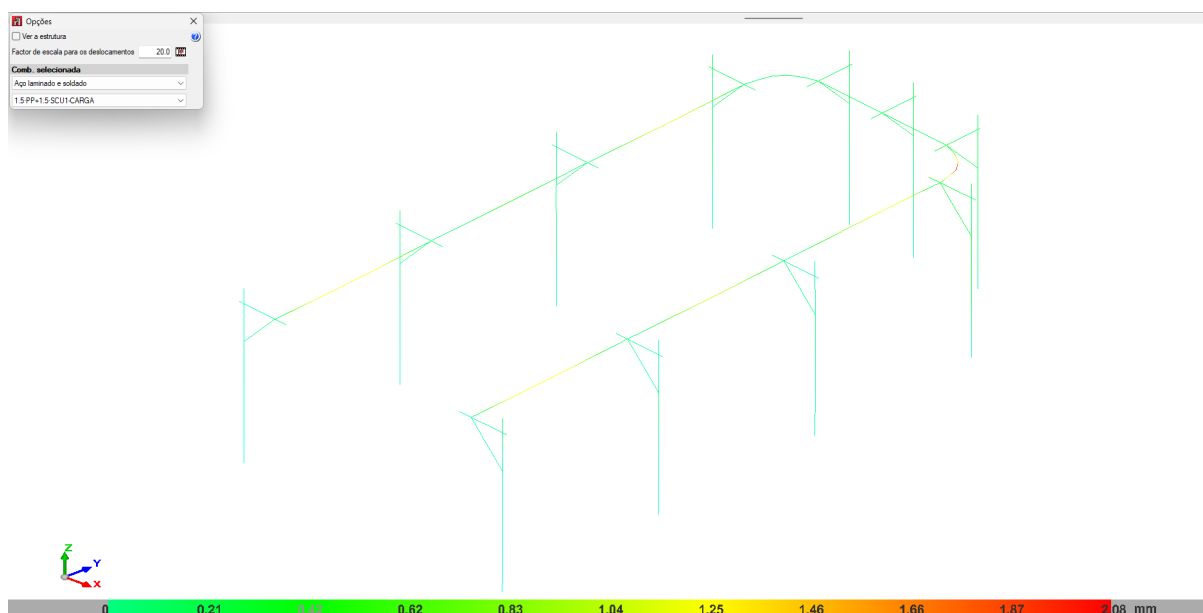
O mesmo comportamento foi gerado nas regiões $E3$ para $E4$, o que já era esperado, pois não houve variação de parâmetros de montagem seja do perfil ou da distância entre os pórticos no que se refere ao centro. No entanto, a deslocamento foi maior que o anterior variando

em 0 à 9,12 mm. Isso ocorreu devido a variação de sentido da estrutura, efeito da região de curvatura (SILVA, 2017).

6.1.3 Quarto caso

O caso 4 da Figura 21 é o carregamento na curva de $A4$ para $B5$. Nesta o deslocamento variou entre 0 à 2,08 mm. Diferente dos casos anteriores, outros elementos da estrutura apresentaram variação de deslocamento entre os valores de 1,04 à 1,46 mm sendo eles nas regiões $(E1, E2)$, $(E3, E4)$, $(A1, A2)$ e $(A3, A4)$. Considerando que o ambiente de aplicação há ausência de vento, e que a montagem foi conforme o projeto, observou-se um efeito propagante do deslocamento, que pode ter ocorrido devido ao seu arranjo estrutural.

Figura 21 – Deslocamento - caso 04.



Fonte: Autoria própria.

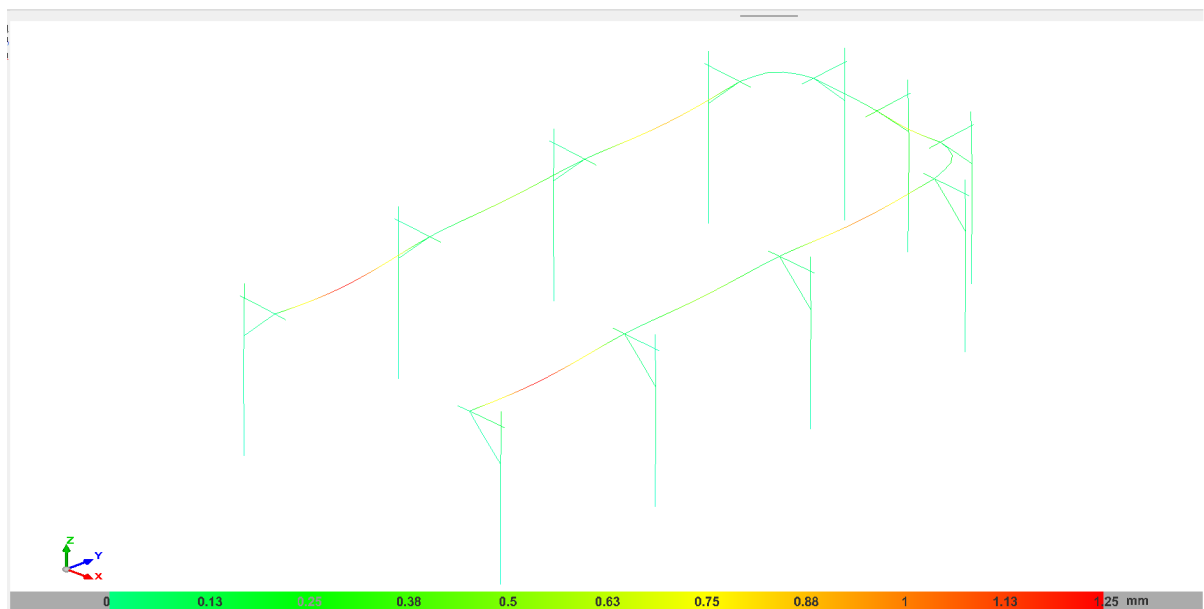
Perneta (2010) afirma que quando há deslocamento concentrado em um ponto específico em um elemento estrutural, é possível que a integridade desta seja afetada nessa região se este for um ponto fraco, gerando deformações longitudinais em múltiplos elementos ao longo do caminho, dando origem a deterioração dos elementos estruturais. Sendo assim, constata-se então que no caso 4 houve propagação do deslocamento no caminho.

6.1.4 Quinto caso

No caso 5 da Figura 22, o carregamento foi posto na ligação entre uma curva e outra, isto é, nas regiões $B5$ para $C5$. Seu deslocamento nessa região foi de 0,63 à 0,88 mm, a qual reduziu de forma significativa quando comparado aos casos 2 e 3, pois como a distância entre

os pórticos foi menor a força de cisalhamento foi reduzida, logo, o momento fletor tende a apresentar o mesmo comportamento (SOUZA, 2018).

Figura 22 – Deslocamento - caso 05.



Fonte: Autoria própria.

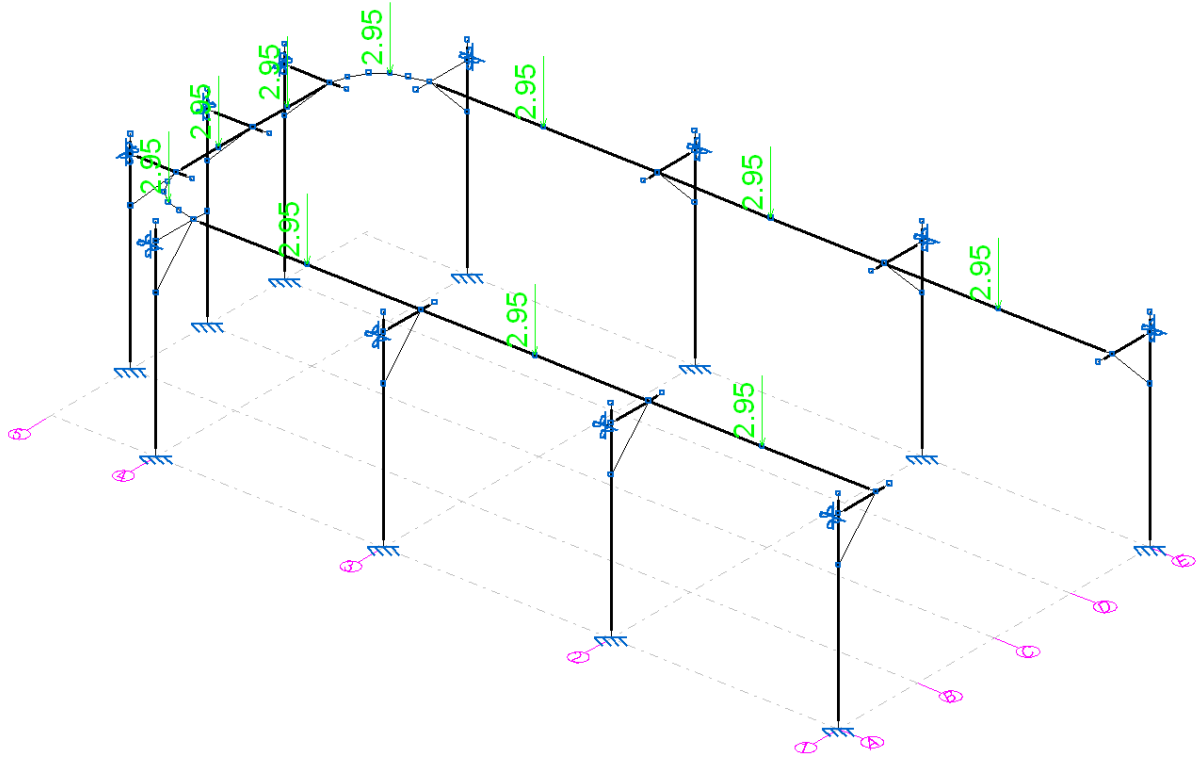
Igualmente ao caso 4, houve deslocamento de aproximadamente 1,25 mm de maior acentuação, porém foi equivalente a média dos resultados anteriores, ou seja, para média = $(1,04 + 1,146)/2 = 1,25$, então, os deslocamentos são equivalentes nos dois casos. Isso ocorre devido a viga ser submetida a um momento fletor, causado por uma carga aplicada perpendicularmente ao eixo longitudinal da viga (PFEIL, 2009).

O momento fletor causa deslocamentos na viga, resultando em curvatura ao longo do comprimento da mesma, fenômeno este comum em uma viga apoiada em suas extremidades e sujeita a uma carga em seu centro (LORENZI, 2018).

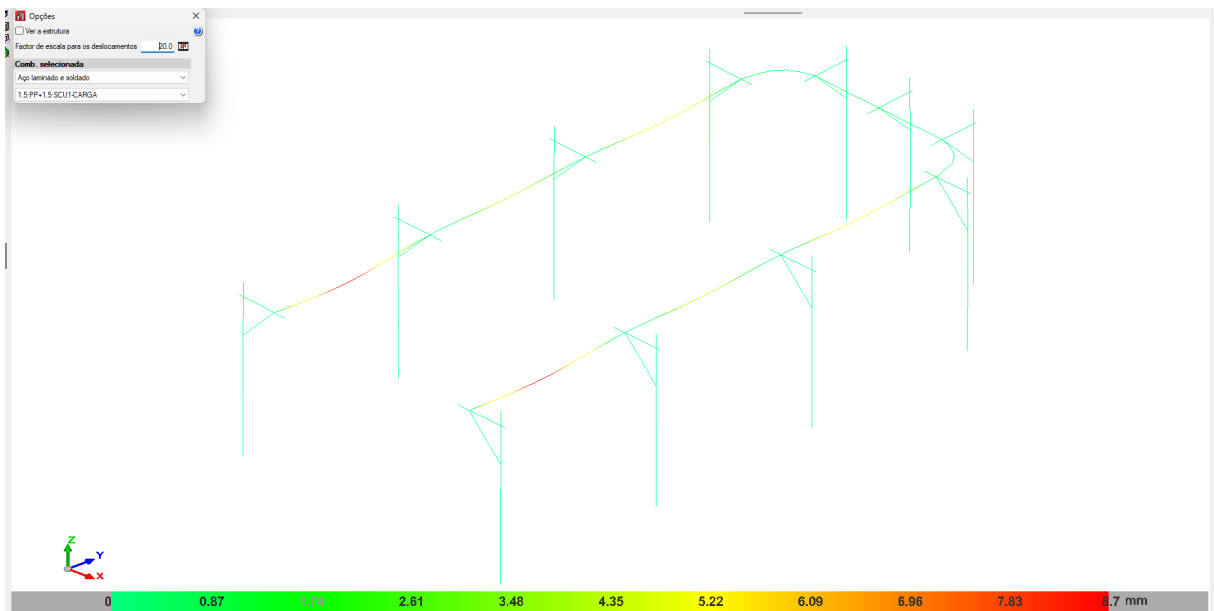
6.1.5 Último caso

Na última configuração, o caso 6, o carregamento foi aplicado em cada trecho da monovia, com o intuito de aproximar da situação de operação do projeto real, em que há diversas regiões que a carga estará sendo içada em cada trecho da monovia (Figuras 23a e 23b). Para este caso o deslocamento mais elevada foi de 8,7 mm nas regiões de $(A1, A2)$ e $(E1, E2)$. Já nas regiões $(A1, A2)$, $(A2, A3)$, $(A3, A4)$ e $(E2, A3)$, $(E3, E4)$ ficaram entre 2,61 à 6,09 mm.

Figura 23 – Monovia:
a) Aplicação de carga e b) Deslocamento - caso 06.



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria.

6.2 APROVEITAMENTO DA RESISTÊNCIA

O aproveitamento de resistência refere-se à utilização eficiente da capacidade de resistência de um material ou elemento estrutural, ou seja, é uma medida da proporção em que a resistência real da estrutura é utilizada em relação à resistência máxima possível (SANTOS, 2018). Logo, para avaliar a resistência da monovia fora posta a verificação dos Estado Limite Último (ELU) nos pontos mais desfavoráveis (Apêndice B).

No contexto do *software Cype 3D*[®], a verificação do ELU no ponto mais desfavorável, refere-se a uma análise realizada para determinar se uma estrutura atende aos requisitos de resistência e estabilidade frente às cargas máximas aplicadas (RABELO; JUNIOR, 2019).

Ao realizar a verificação de ELU no ponto mais desfavorável a ferramenta considera as cargas, configurações geométricas e as propriedades dos materiais para determinar se a estrutura satisfaz aos critérios de resistência e estabilidade estabelecidos pelas normas e códigos de projeto aplicáveis. Dessa forma, avaliando o elemento de viga de dimensões 127×5.4 nas regiões *E1* para *E2* e considerando a propriedade mecânica da Tabela 2 de 250 MPa do Apêndice C, foi obtido um aproveitamento de resistência e flecha equivalente a 22.22% e 20,66%, respectivamente.

O aproveitamento da resistência foi de 26.47% conforme a Tabela 4. Esse valor significa que a estrutura projetada atende a aproximadamente 26.47% da resistência máxima permitida para o aço A-36 com 250MPa, indicando que a estrutura está dimensionada de acordo com os critérios de resistência, levando em consideração as cargas aplicadas e as propriedades do material.

Tabela 4 – Aproveitamentos obtidos do Apêndice C.

Dimensões	Resistência	Flecha	Região
127 × 5.4	26.74%	50.01%	<i>E1</i> para <i>E2</i> extremidade oposta a saída da monovia
127 × 5.4	21.56%	37.90%	<i>E2</i> para metade de <i>E3</i>
127 × 5.4	22.76%	42.39%	<i>E3</i> para metade de <i>E4</i>
152 × 5.9	12.17%	0.17%	<i>E4</i> para <i>D5</i>
152 × 5.9	6.82%	4.82%	<i>C5</i> para metade de <i>D5</i>
127 × 5.4	22.22%	20.66%	<i>E1</i> para metade de <i>E2</i>

Fonte: Autoria Própria .

Já para aprovação de flecha de 50.01% a deslocamento vertical da estrutura, atende a aproximadamente 50.01% dos critérios permitidos. É importante ressaltar que a flecha é um deslocamento que pode afetar a estabilidade e o desempenho da estrutura, e os códigos e normas geralmente estabelecem limites máximos para esse parâmetro (ABNT, 1984). O fato do aproveitamento de resistência estar em 26.47% e o aproveitamento de flecha em 50.01% sugere

que a estrutura pode precisar ser revisada ou otimizada nesses pontos críticos para garantir que atenda aos critérios de projeto e aos requisitos de segurança e desempenho.

A análise no ponto mais desfavorável foi realizada para identificar a posição crítica na estrutura onde ocorrem as maiores tensões ou deformações, ou onde os efeitos combinados de diferentes cargas resultam nas condições mais desafiadoras para a estrutura, mesmo sendo posto na condição de contorno de apoio fixo no nível da viga de sustentação para melhoria do balanço da monovia (RABELO; JUNIOR, 2019).

Embora tenha tido regiões em que a aprovação da flecha necessitou de alteração, outros como em E4 para D5 a resistência de 12.17% e flecha de 0.17% foram reduzidas. Esse resultado de resistência indica que a estrutura está dimensionada de acordo com os critérios de resistência, levando em consideração as cargas aplicadas e as propriedades do material. Essa premissa também é válida para flecha de 0.17%, pois é muito baixa, o que indica que a estrutura apresenta uma deformação vertical mínima e está dentro dos limites permitidos pelos critérios de projeto (ABNT, 1984).

7 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi feito uma avaliação de sistema monovia para içamento de carga através da ferramenta *Cype 3D*, em que através do projeto preparado em *SolidWorks* com aço ASTM A-36 e em seguida posto o aramado no *Cype 3D*, efetuou - se a aplicação da carga no caminho/guia da monovia, para analisar o efeito desta em diversas regiões. Após a aplicação deste procedimento, foi possível analisar a resistência e o deslocamento deste arranjo estrutural e com base nisso, conclui - se que:

- Constatou-se que na situação ideal, com a carga aplicada em diversas regiões na trajetória da monovia, que houve deslocamento máximos, pois excedeu sua capacidade nominal a 2,95 kN, demandando na troca do perfil e dimensões;
- Foi detectado que as regiões que apresentaram pontos críticos na estrutura como os casos 02 e principalmente o 03, devido as dimensões do perfil aplicado. O interessante é que se esperava tal comportamento da região de curvatura do caso 04 por ser um elemento de viga soldado, porém, este teve bom aproveitamento e deslocamento devido as dimensões do perfil serem maiores, além de possuir um comprimento reduzido;
- O tipo de perfil aplicado não foi o ideal, porém quando substituído por outro como 152×5.9 , o aproveitamento foi reduzido significativamente, mostrando que de fato suas propriedades geométricas podem alterar seu desempenho quando posto em um arranjo estrutural. Assim, indica-se aplicar perfis como I e T com mesma dimensões, pois atendem as especificações do projeto conforme a norma ABNT:8800:2008, assim como a condição de contorno.
- Essa avaliação é importante para garantir a segurança e a integridade da estrutura, assegurando que ela seja capaz de resistir às cargas máximas esperadas durante sua vida útil, pois quando a carga foi aplicada em regiões consideradas críticas gerou deslocamento em diversos trechos na monovia;

7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Análise dinâmica da monovia considerando diferentes tipos de cargas e velocidades de movimentação;
- Avaliação do efeito de vento na estrutura da monovia;
- Investigação de técnicas de otimização para redução de deslocamentos e aproveitamento eficiente da resistência;

- Estudo de técnicas de mitigação de deslocamentos, como o uso de dispositivos de amortecimento;
- Análise de fadiga da monovia, considerando as cargas cíclicas aplicadas ao longo do tempo;
- Estudo de sistemas de monitoramento estrutural para avaliar o comportamento real da monovia em condições de operação.

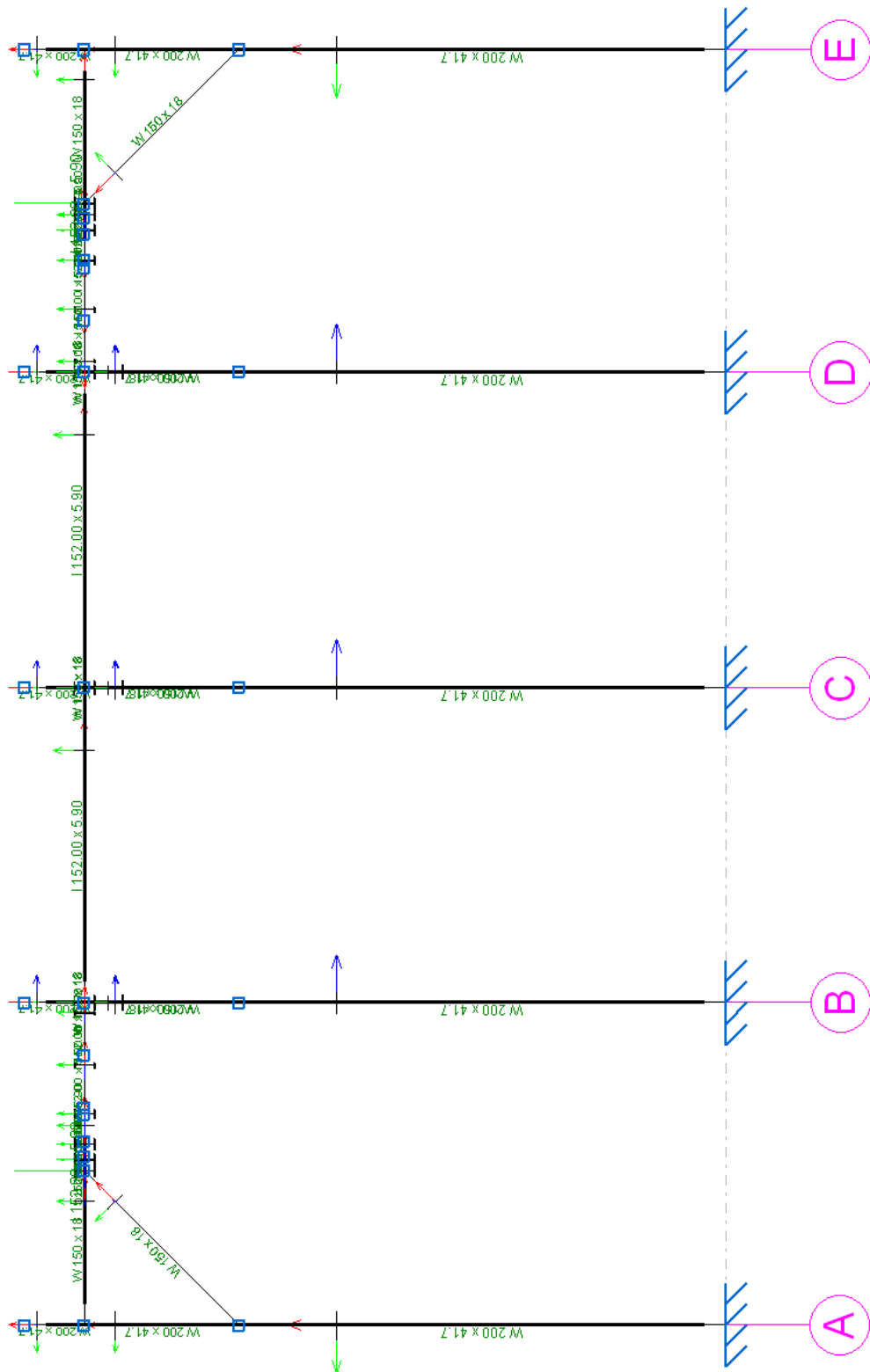
REFERÊNCIAS

- ABNT. Cálculo de equipamento para levantamento e movimento de cargas. Rio de Janeiro, 1984.
- ABNT. Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.
- AZEVEDO, Á. F. M. Método dos elementos finitos. 2003.
- BHAVIKATTI, S. Finite element analysis. New Age International, 2005.
- CAMPOS, A. P. M. Projeto de ponte rolante. Universidade Federal Rural do Semi-Árido, 2018.
- CHAVES, J. R. F. Análise dinâmica de pórticos metálicos contraventados. 2009.
- COOK, R. D. et al. Concepts and applications of finite element analysis. John wiley & sons, 2007.
- FARINHA, V. d. S. M. L. Dimensionamento de um semi-pórtico para um almoxarifado em uma fábrica de torneiras. 2022.
- FEREGUETTI, P. Monovias com perfis estruturais gerdau. 2018.
- FERREIRA, F. P. V. Segurança no içamento e movimentação de carga com guindastes. 2008.
- GERDAU. Propriedades mecânicas dos aços. **Andr'e' Paulo**, 2023. Acesso em: 14/01/2023. Disponível em: <<https://www2.gerdau.com.br/blog-acos-especiais/propriedades-mecanicas-dosacos>>.
- GUANABARA, M. K. Dimensionamento de estruturas metálicas: Rotina computacional para seleção de perfis metálicos. 2010.
- LORENZI, R. T. Dimensionamento estrutural de um pórtico rolante para levantamento de cargas de até 10 toneladas. 2018.
- MICHELS, E. Projeto detalhado de uma máquina de elevação e transporte. 2012.
- NARDIN, F. Â. A importância da estrutura metálica na construção civil. **Itatiba: Universidade São Francisco (USF)**, 2008.
- PERNETA, H.; CORREIA, M. J.; BAPTISTA, A. M.; SALTA, M. Reparação de estruturas metálicas. **REHABILITAR2010, June**, 2010.
- PFEIL, W. e. M. P. Estruturas de aço: dimensionamento. LTC, Rio de Janeiro, 2009.
- PINHEIRO, A. C. d. F. B. Estruturas metálicas: cálculo, detalhes, exercícios e projetos. Editora Blucher, 2005.
- RABELO, J. M.; JUNIOR, N. M. P. Dimensionamento de galpão em estrutura metálica pelo software cypecad 3d. 2019.

- ROCHA, L. E. d. S. Análise estrutural de monovia para carregamento de minério utilizando elementos finitos. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2019.
- SÁLES, J. J. d.; MALITE, M.; GONÇALVES, R. M.; BONFÁ, J. L. et al. Elementos de estruturas de aço: dimensionamento. EESC/USP, 2019.
- SANTOS, R. R. d.; SOUZA, I. R. d. Estudo de caso aplicando a técnica de análise do módulo de falhas e efeitos em um equipamento de movimentação de carga. 2018.
- SANTOS, T. R. S. Projeto de uma estrutura metálica para movimentação de cargas. 2018.
- SANTOS, T. R. S. Projeto de uma estrutura metálica para movimentação de cargas. 2018.
- SILVA, R. E. R. D. Projeto de galpão em estrutura metálica: Consumo de aço em soluções com perfis laminados e conformados a frio. 2017.
- SOARES, J. O. Projeto e otimização de pontes rolantes. 2011.
- SORDI, G. Dimensionamento da viga principal de uma ponte rolante. 2016.
- SOUZA, L. G. de. Estudo comparativo de sistemas estruturais estudo de caso. 2018.
- TRIVEDI, S. Finite element analysis: A boon to dentistry. Elsevier, v. 4, 2014.

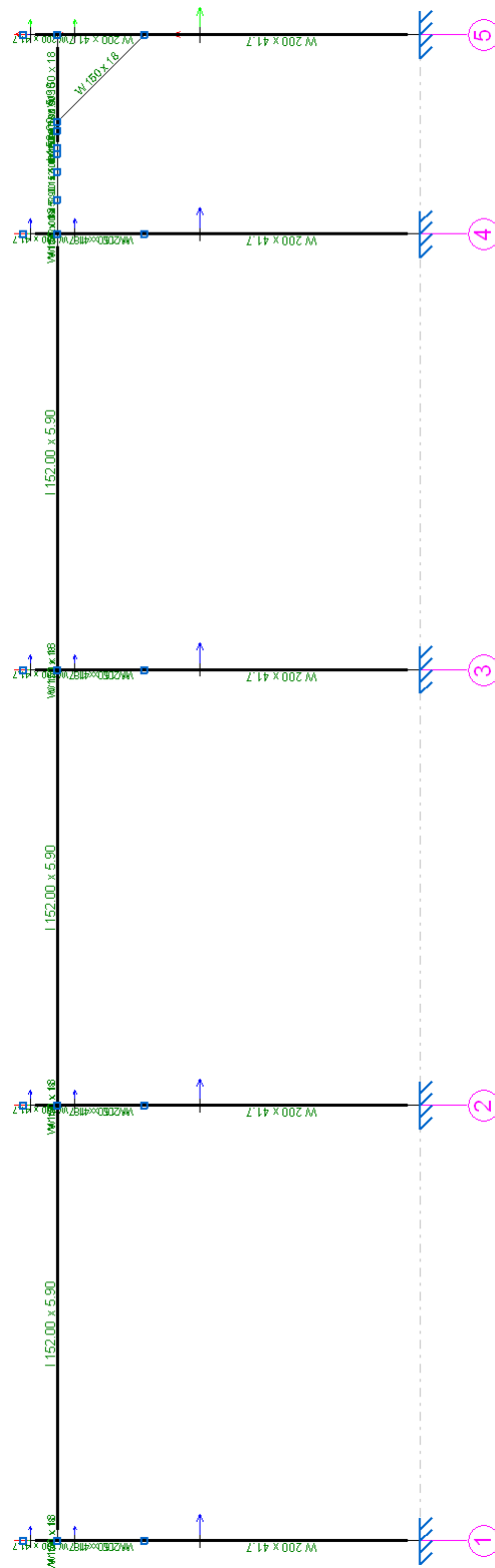
APÊNDICE A – PARÂMETROS DIMENSIONAIS DA VISTA FRONTAL

(1 DE 3)



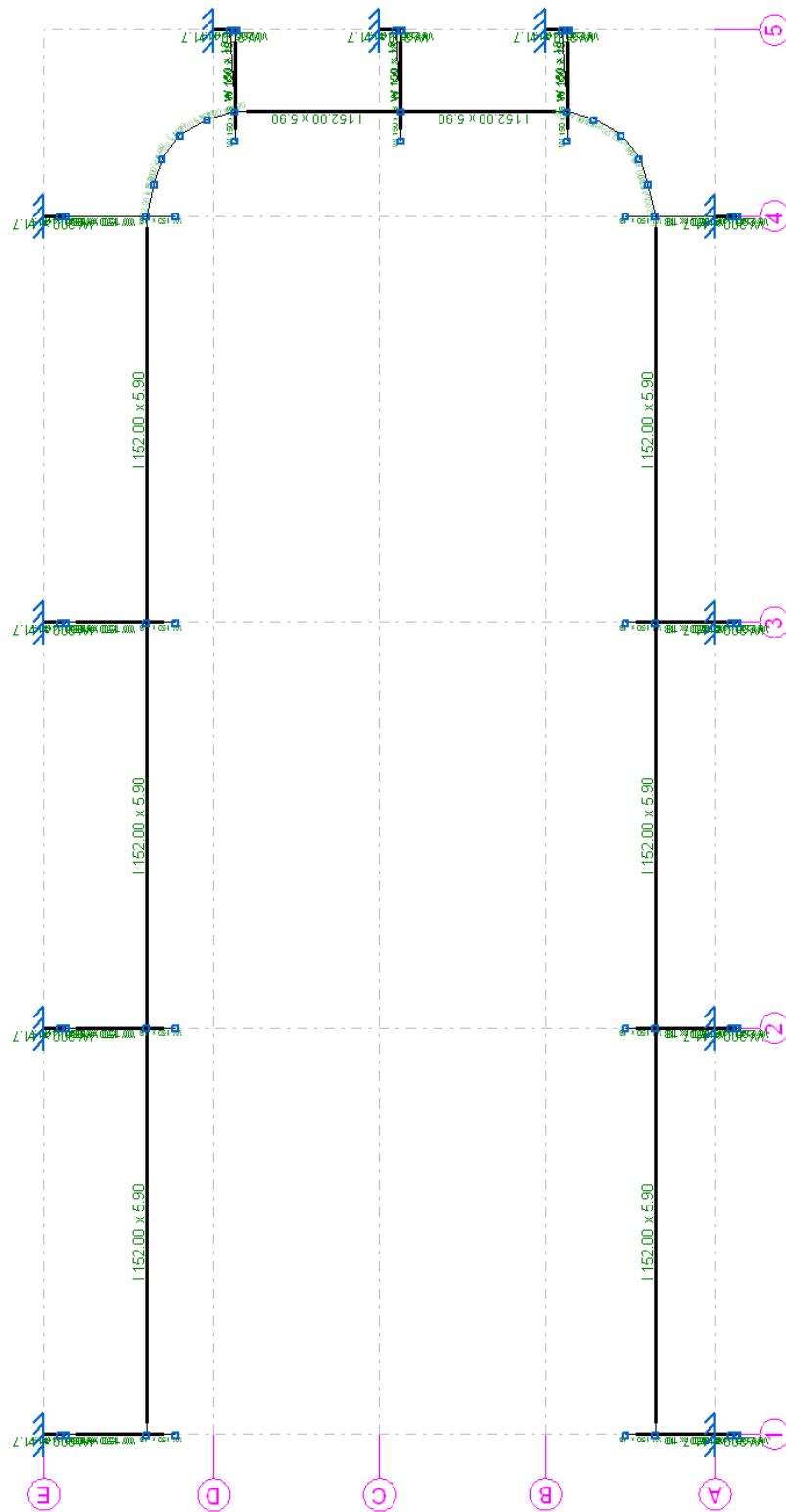
APÊNDICE A – PARÂMETROS DIMENSIONAIS DA VISTA LATERAL

(2 DE 3)

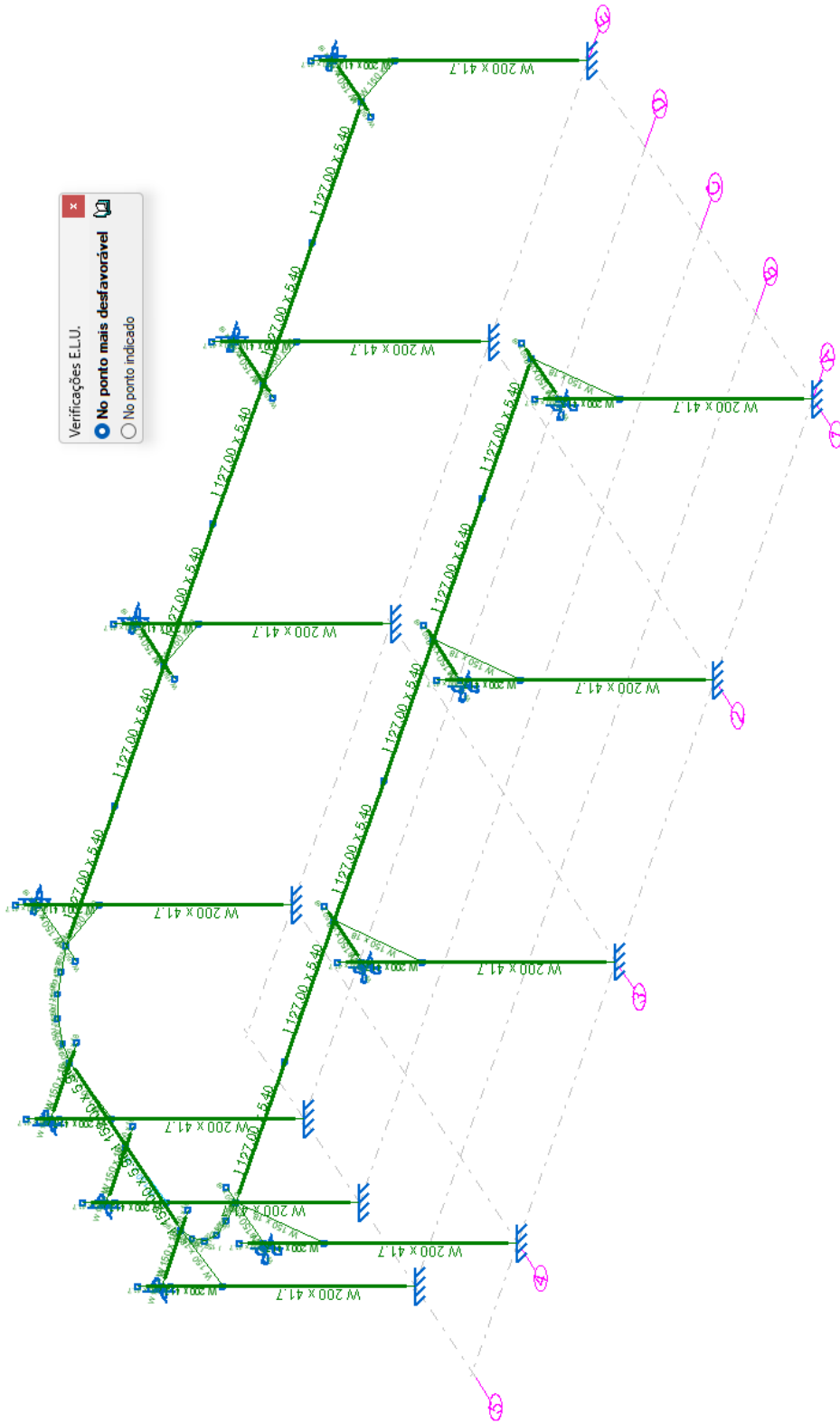


APÊNDICE A – PARÂMETROS DIMENSIONAIS DA VISTA SUPERIOR

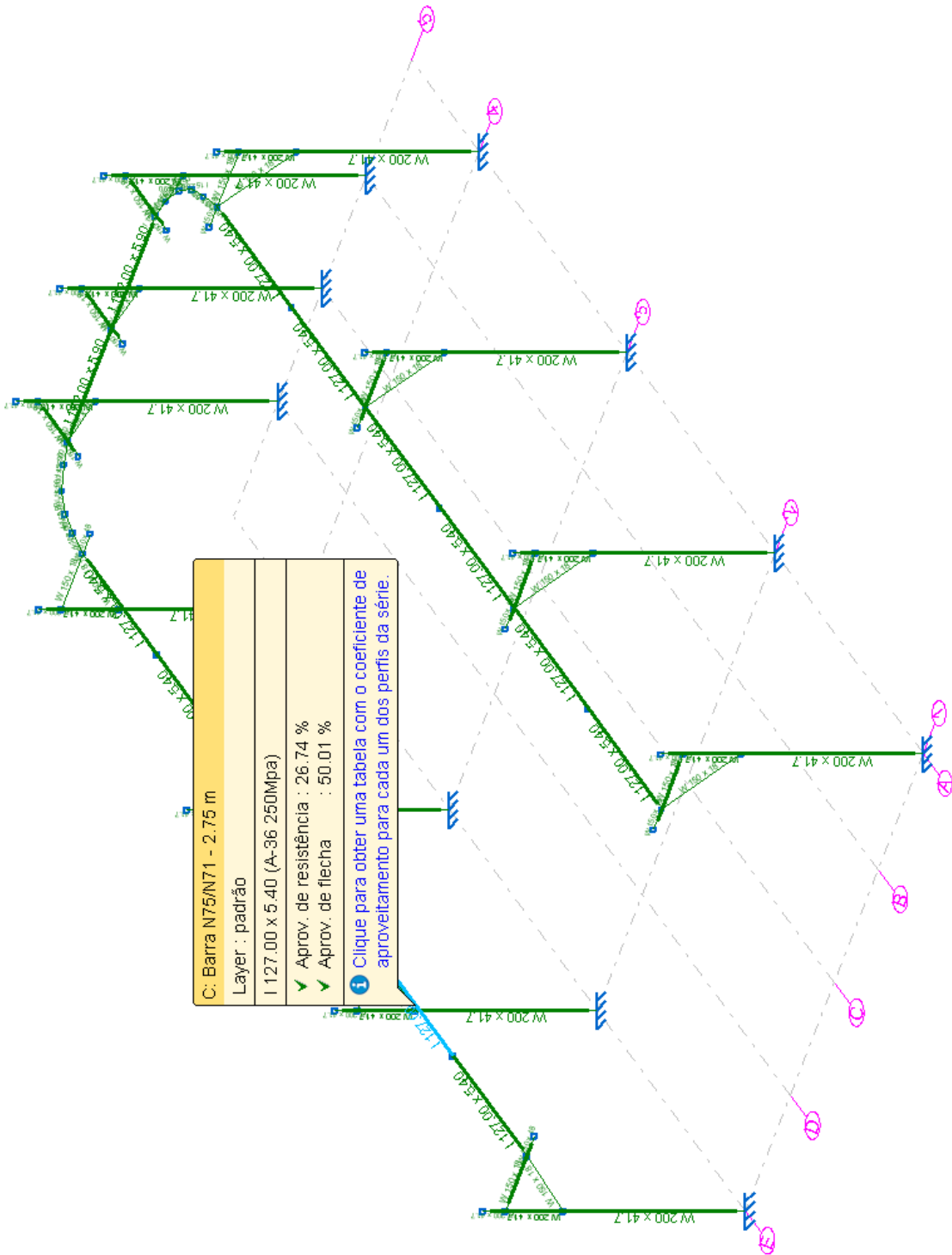
(3 DE 3)



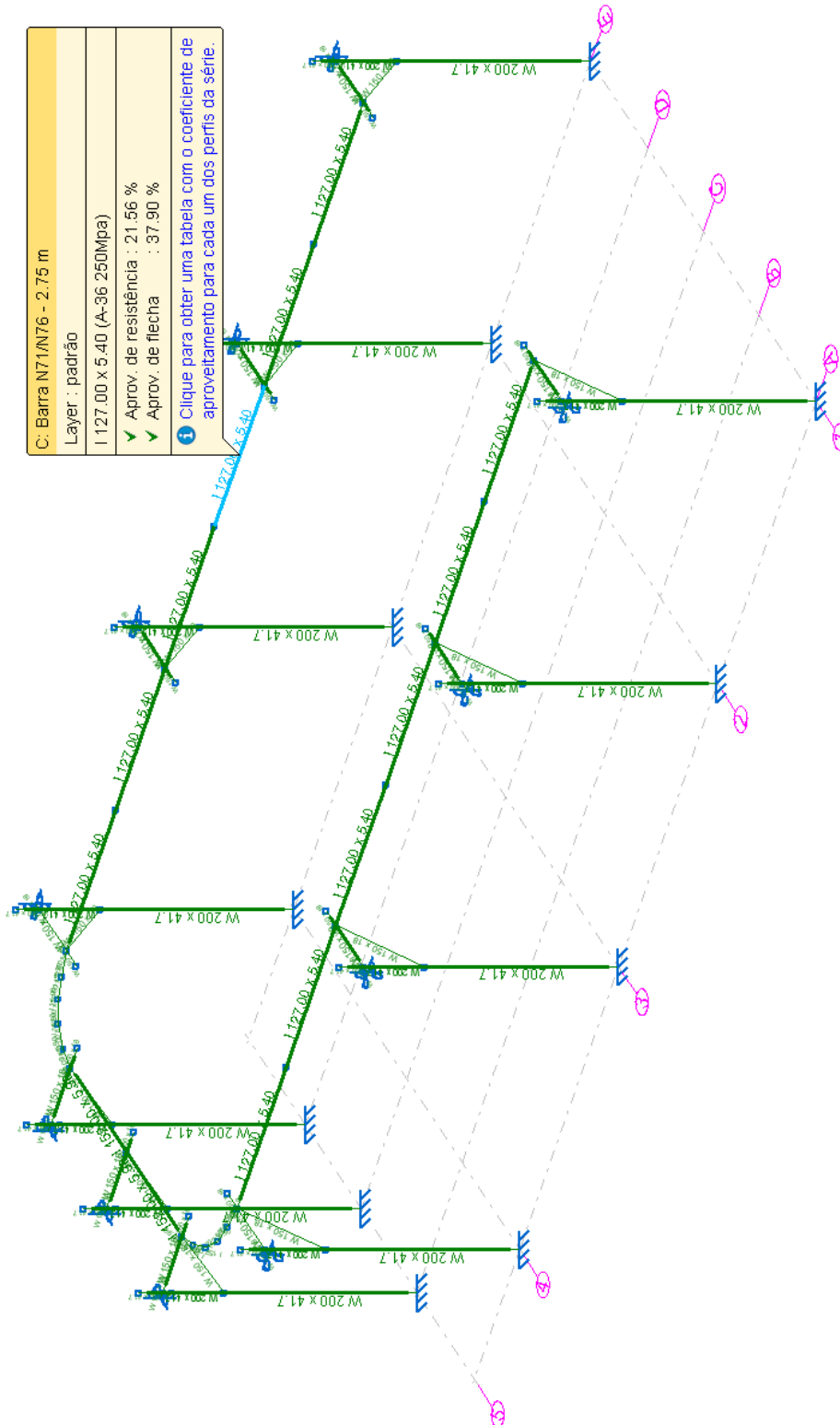
APÊNDICE B – RESISTÊNCIA



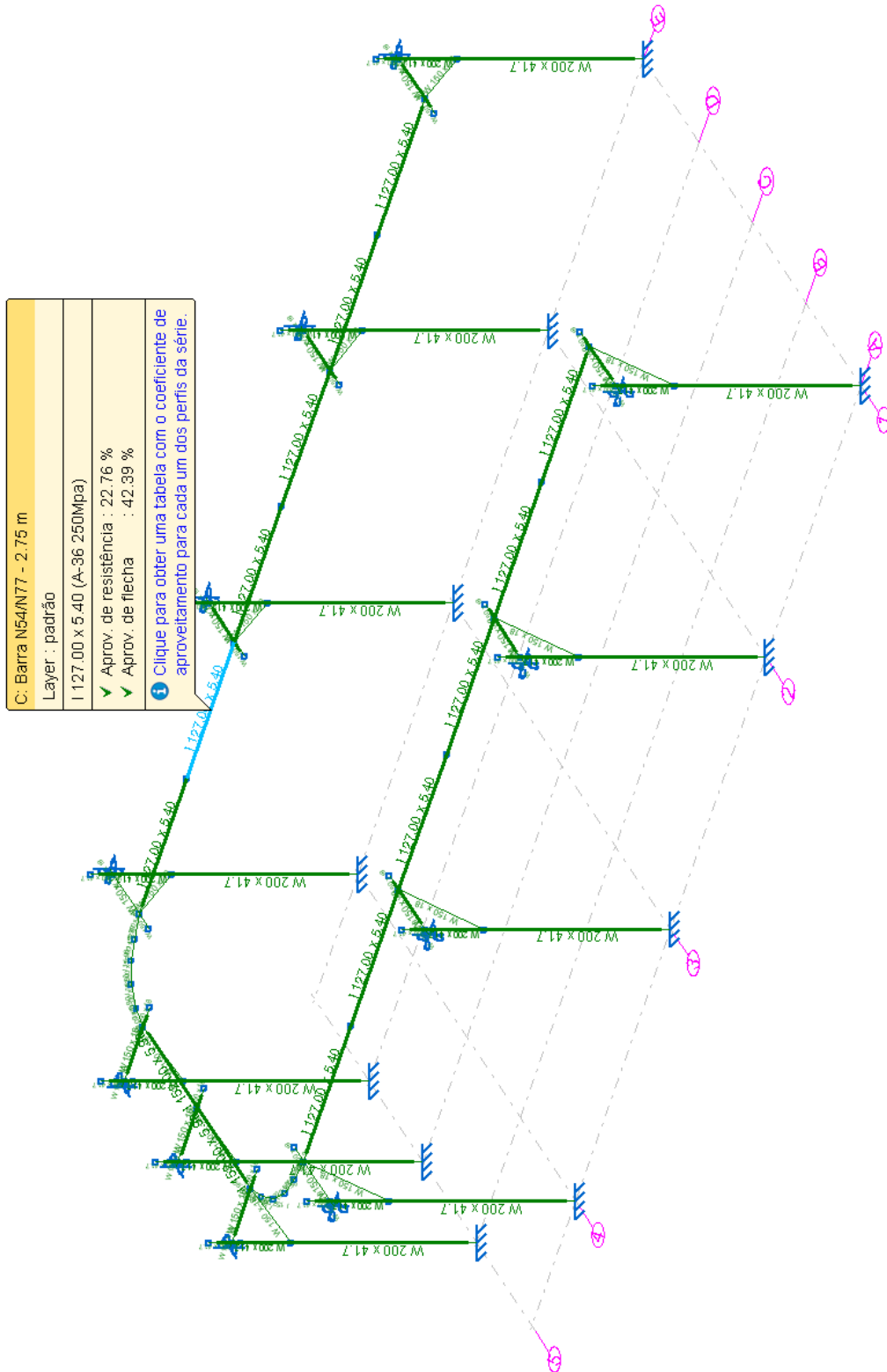
APÊNDICE C – APROVEITAMENTO CASO 1 (1 DE 6)



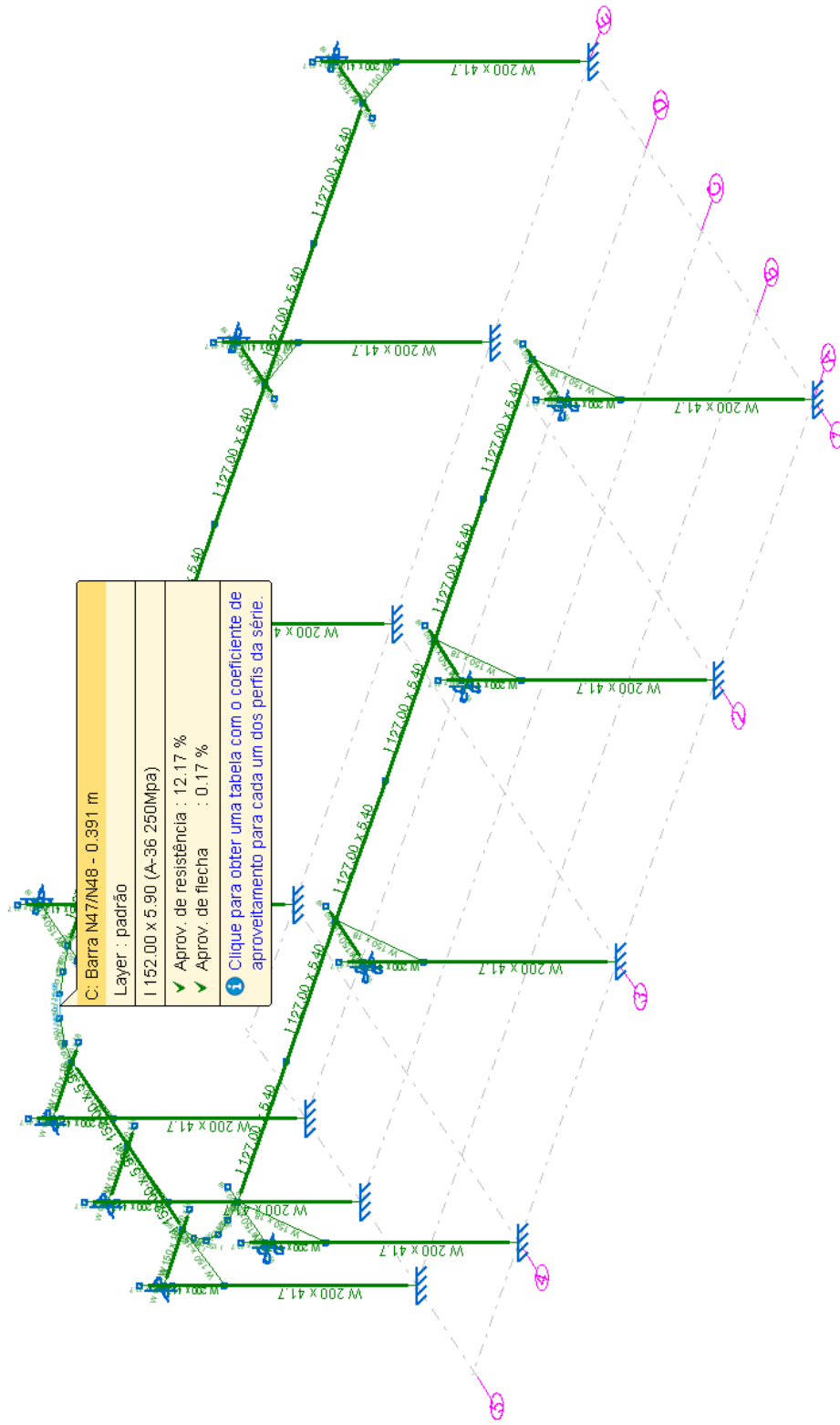
APÊNDICE C – APROVEITAMENTO CASO 2 (2 DE 6)



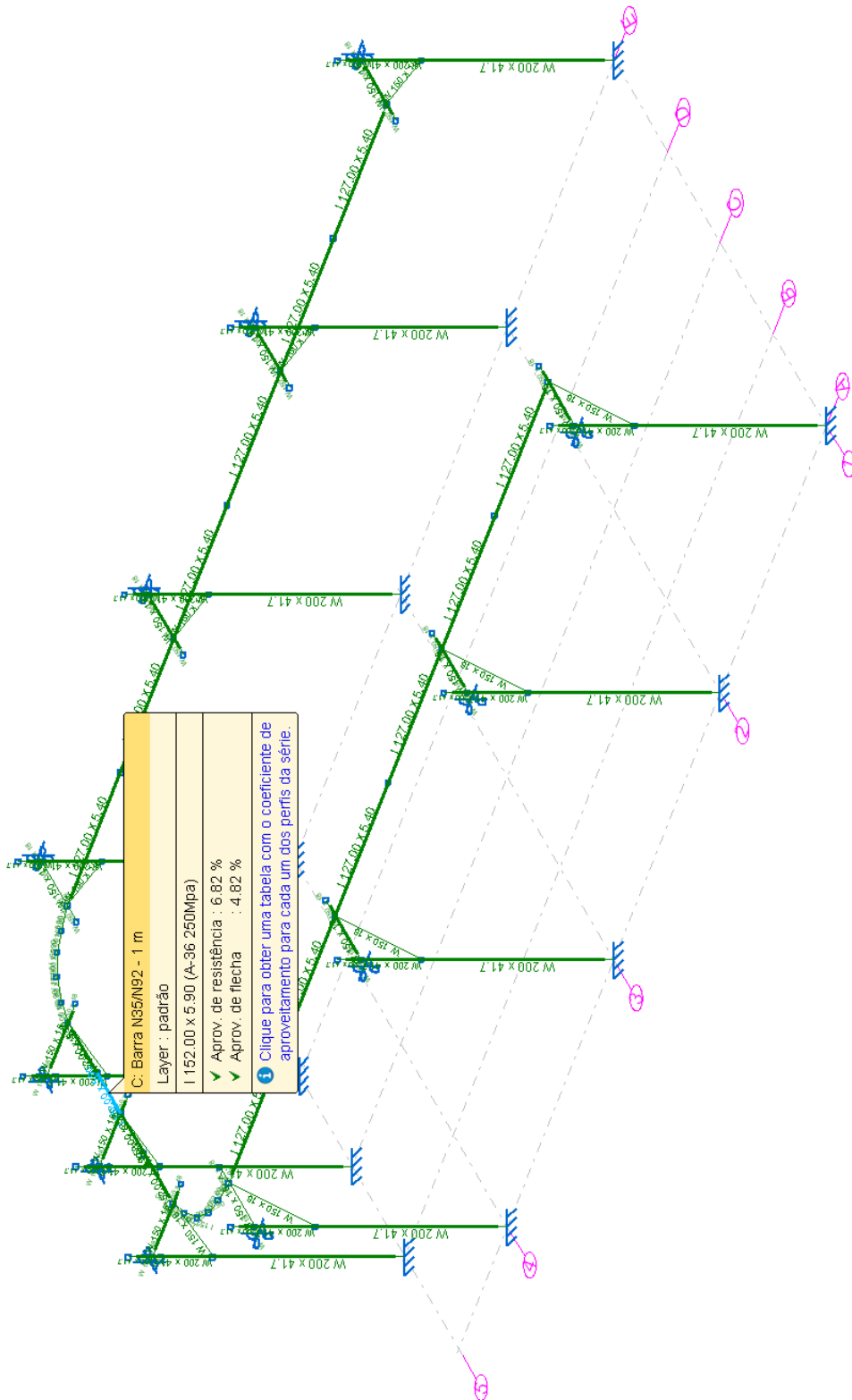
APÊNDICE C – APROVEITAMENTO CASO 3 (3 DE 6)



APÊNDICE C – APROVEITAMENTO CASO 4 (4 DE 6)



APÊNDICE C – APROVEITAMENTO CASO 5 (5 DE 6)



APÊNDICE C – APROVEITAMENTO CASO 6 (6 DE 6)

