

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO GRANDE DO SUL**
Campus Ibirubá

GUSTAVO MARTINS GEHM

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
**Análise estrutural de ponte rolante: uma perspectiva analítica e
computacional**

Ibirubá

2022

GUSTAVO MARTINS GEHM

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Análise estrutural de ponte rolante: uma perspectiva analítica e computacional

Trabalho de conclusão de curso apresentado junto ao Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Campus Ibirubá, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Jefferson Morais Gauterio

Ibirubá

2022

GEHM, Gustavo Martins

Análise estrutural de ponte rolante: uma perspectiva analítica e computacional
/ Gustavo Martins Gehm, 2022.

Orientador: Prof Me. Jefferson Moraes Gauterio

49 páginas, ilustrado

Monografia (Graduação) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
do Rio Grande do Sul – Campus Ibirubá, Engenharia Mecânica, Ibirubá, 2022.

1.Engenharia Mecânica. 2.Análise Estrutural. 3. ABNT NBR 8400. 4.CAE.

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul –
Campus Ibirubá,

Engenharia Mecânica.

Análise estrutural de ponte rolante: uma perspectiva analítica e computacional.

Gustavo Martins Gehm

Trabalho de conclusão de curso apresentado junto ao Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Campus Ibirubá, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Banca Examinadora:

Prof. (orientador) Me. Jefferson Morais Gauterio
IFRS Campus Ibirubá

Prof. Dr. Anderson Fraga
IFRS Campus Ibirubá

Prof. Me. Giancarlo Stefani Schleder
IFRS Campus Ibirubá

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram de maneira direta ou indireta no desenvolvimento deste trabalho.

Primeiramente, agradeço a Deus pelo dom da vida e saúde que fez possível com que tudo acontecesse.

Ao IFRS Campus Ibirubá, pelo curso Bacharelado em Engenharia Mecânica público, gratuito e de qualidade.

A todos professores aos quais tive a honra de ter aulas e aprender com a experiência e conhecimento destes.

Ao meu orientador Jefferson Moraes Gauterio por auxiliar no caminho a ser seguido durante o desenvolvimento do trabalho, além da revisão deste trabalho.

Aos meus colegas de faculdade, pela amizade e parceria que se iniciaram na faculdade e seguirão para a vida.

Aos meus pais, Elmiro Gehm e Marina Martins Gehm pela educação, criação e por todo apoio aos quais fizeram com que eu pudesse chegar onde cheguei e com forças para alcançar meus objetivos.

A minha namorada Luana Kuntz pelo amor, companheirismo e carinho ao longo deste período no qual foi muito importante e definitivo na minha vida.

RESUMO

Com o desenvolvimento da tecnologia, processos se criaram e com eles necessidades também foram criadas. Com o objetivo de facilitar e melhorar o transporte e movimentação de cargas, em 1890 tem-se registros de que os primeiros equipamentos movimentadores de carga foram fabricados. Este trabalho busca apresentar o desenvolvimento do estudo aplicado ao dimensionamento da viga principal de uma ponte rolante, projetado através da ABNT NBR 8400. O referencial teórico apresentará uma abordagem dos conceitos da resistência dos materiais, além do conceito de elementos finitos aplicados ao objeto de estudo. Para desenvolvimento do dimensionamento é feito um estudo aprofundado da norma referenciada, analisando os pontos e condições de contorno aplicáveis à análise em questão. Além da análise por intermédio da norma e cálculos analíticos desenvolvidos para seleção do perfil da viga, será feita a análise por intermédio de um *software* com tecnologia CAE para comparação e validação entre as informações obtidas. A validação entre as formas de análise irá gerar uma confiabilidade maior ao estudo elaborado.

Palavras chave: resistência dos materiais, dimensionamento de viga através de norma, simulação CAE.

ABSTRAT

With development technology, process will be created and with him, needs also was created. With the main of to facilitate and improve the transport and movimentation of loads, in 1890 there has been records that the first movers loads equipments were manufactured. This academic work present the development to study applied to dimensioning of the main beam of an overhead crane, designed between ABNT NBR 8400. Theory referential will be present approach by materials resistance, in addition to concept of finite elements applied to study object. To development the design, an in-depth study of the referenced standard is carried out, analyzing the points and boundary conditions applicable to the analysis in question. In addition to analisys by the norm and analytical calculations developed to selection of beam profile will be done by one software with CAE tecnologia to comparation and validation between information obtained. Validation between the forms of analysis will generate greater reliability for the study carried out.

Key words: materials resistance, dimensioning of beam per norm, simulation CAE.

LISTA DE SÍMBOLOS

ΔA – área – mm²

E – módulo de elasticidade – GPa

$\epsilon_{méd}$ – deformação

ΔF – força - N

I – momento de inércia – mm⁴

k_p - classe do espectro

M_{máx} – momento máximo – Nm

$m1r$ = massa da carga içada - kg

$m1máx$ = massa máxima da carga içada - kg

n_i = número de vezes em que a massa 1 é içada

$nmáx$ = número de ciclos de elevação que determinam a duração total de uso

M_x - coeficiente de majoração

S_g - Solicitações devido ao peso próprio, com carga constante – kg

S_L - Solicitações devido à carga de trabalho - kg

S_H - Solicitações devido aos movimentos horizontais

Δs – variação no comprimento

W_{min} – módulo resistente do material – cm³

Y – distância do centro da viga até sua extremidade – mm

σ – tensão – N/mm²

Ψ – coeficiente dinâmico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	JUSTIFICATIVA.....	10
1.2	OBJETIVOS	10
1.2.1	Objetivo geral	10
1.2.2	Objetivos específicos	10
2	REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1	RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS	11
2.1.1	Tensão	12
2.1.2	Flexão	13
2.1.3	Deflexão em vigas e eixos	14
2.1.4	Deformação	15
2.1.4.1	Lei de Hooke: módulo de elasticidade	16
2.1.4.2	Comportamento elástico e comportamento plástico de um material	17
2.1.5	Análise por elementos finitos	18
2.2	PONTE ROLANTE	19
2.2.1	Componentes de uma ponte rolante	20
2.2.1.1	Viga principal.....	20
2.2.1.2	Vigas de rolamento	21
2.2.1.3	Colunas	22
2.2.1.4	Talha.....	22
2.2.1.5	Cabeceira.....	23
3	MATERIAIS E MÉTODOS	24
3.1	PERFIL ESTRUTURAL LAMINADO.....	24
3.1.1	Determinação de ciclos de elevação	26
3.1.2	Classificação da classe de elevação	27
3.1.3	Cálculo do espectro de carga	28
3.1.4	Classificação do grupo de equipamentos	29

3.1.5 Casos de solicitação	30
3.1.6 Diagrama de corpo livre	33
3.1.7 Verificação com relação ao limite elástico.....	34
3.2 PROJETO E SIMULAÇÃO EM SOFTWARE CAD/CAE	39
3.2.1 Verificação com relação a tensão.....	39
3.2.2 Verificação com relação ao deslocamento	42
4 CONCLUSÃO	44
REFERÊNCIAS.....	45

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da humanidade se nota de tempos em tempos, embora a evolução, estudo e avanço da ciência seja diário. Antes de termos o desenvolvimento da ciência dos materiais, trabalhávamos com aços que não conferiam propriedades mecânicas ou químicas. Antes de termos avanços no estudo dos projetos de máquinas, as máquinas eram construídas com o conhecimento empírico.

As construções e obras de engenharia eram projetadas para resistir à ação da gravidade e esforços do processo de uma forma cega do ponto de vista científico. No entanto, como não se tinham dados para serem analisados, erros poderiam ser cometidos com o intuito de não quebrar, acabando desta forma por superdimensionar os materiais.

Com o avanço da indústria, com a necessidade de realizar trabalhos mecânicos ou converter energia em algum trabalho, ter um bom projeto que atenda a necessidade sem deixar a desejar quanto à dimensionamento, ergonomia, segurança e velocidade de processo, é fundamental. Equipamentos de movimentação de carga foram implementados na indústria para facilitar processos. Pontes rolantes são muito comuns para interligar processos, células de uma linha de produção, armazenagem de materiais.

Com uma abordagem analítica e computacional, pretende-se projetar a viga principal de uma ponte rolante com capacidade para 5 toneladas neste trabalho. O objetivo é conciliar e comparar a forma analítica com os resultados obtidos através de software CAE, utilizando como base de informação a teoria de resistência dos materiais e a norma que regulamenta projetos de pontes rolantes. Não é objetivo do trabalho projetar todos os componentes da ponte rolante, desta forma limitando-se assim a viga principal.

1.1 JUSTIFICATIVA

Com a necessidade de movimentação de carga na indústria, vemos empilhadeiras em muitos processos. No entanto, tem-se normas regulamentadoras vigentes que abordam essas questões e indicam outros caminhos para esses processos. Como por exemplo, NR 17 sobre ergonomia, NR 11 sobre transporte, movimentação e armazenagem de materiais, além da NR 12 que abrange a segurança na operação de máquinas e equipamentos. Com isso, tem-se a necessidade pela correta seleção do equipamento para cada processo de forma a garantir segurança e eficiência para descarregar ou movimentar materiais.

Com a ascensão e grande evolução nos métodos e processos industriais, há muito uso de equipamentos de movimentação de carga e acaba sendo inevitável no projeto o estudo estrutural dos componentes e por fim da estrutura como um todo no que diz respeito aos cálculos estruturais. A análise estrutural faz com que o projeto tenha um nível maior de assertividade. Desta forma, permitindo que o engenheiro projetista tenha uma visão baseada em dados, possibilitando que a tomada de decisão seja feita da forma mais correta.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é desenvolver um estudo no âmbito estrutural, de forma analítica e também por intermédio de *software* CAD (Computer Aided Design) para modelagem e simulação por elementos finitos, para a viga principal de uma ponte rolante, analisando os fenômenos que ocorrem.

1.2.2 Objetivos específicos

- Revisão bibliográfica em resistência dos materiais;
- Estudo nas normas que regulamentam o tema do trabalho;
- Desenvolvimento de cálculos estruturais na forma analítica;
- Desenvolvimento de simulação estrutural por meio computacional;
- Definir pontos críticos e possibilidade de melhoria para a análise feita.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão abordados os principais conceitos aplicados para o desenvolvimento deste trabalho, além da demonstração do que são as pontes rolantes objeto de estudo do presente trabalho.

2.1 RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS

O principal elemento de análise no trabalho proposto é a viga principal da ponte rolante. Dois dos principais autores na área de resistência dos materiais trazem definições similares quanto ao elemento viga. Para Norton (2013, p.154), viga é qualquer elemento estrutural apoiado sujeito a esforços transversais a seu comprimento. Elementos como vigas, eixos e colunas são importantes componentes dentro de um projeto e os fenômenos que ocorrem com estes são os mais variados, de acordo com a carga, ambiente e regime de trabalho em que são submetidos. Já de acordo com Hibbeler (2010, p.181), vigas são elementos estruturais projetados para suportar cargas aplicadas no sentido perpendicularmente a seu eixo longitudinal. Uma viga é um dos mais importantes elementos estruturais que temos em uma estrutura, como por exemplo em pontes, prédios, carros, equipamentos de movimentação, entre outros.

Segundo Hibbeler (2010, p.1), o estudo da mecânica dos materiais tem início por volta do século XVII onde tem-se registros de que foram ensaiadas hastes e vigas compostos por diferentes materiais a fim de compreender os efeitos gerados no elemento sob a aplicação de uma carga. Com isso, notou-se a necessidade de conhecer mais sobre as propriedades mecânicas de cada tipo de material testado. Desta forma, estudos foram desenvolvidos por cientistas que buscavam respostas e dados que orientassem no âmbito dos estudos que estavam sendo feitos, objetivando conhecer mais sobre as propriedades mecânicas que os materiais possuíam.

As propriedades de um material podem ser determinadas através de diversos tipos de ensaios. Dentre eles, os mais conhecidos são o ensaio de tração e compressão, que possibilitam ensaiar um corpo de prova e extrair resultados como resistência a tração, módulo de elasticidade, tensão no escoamento, tensão na ruptura, deformação no escoamento, deformação na ruptura.

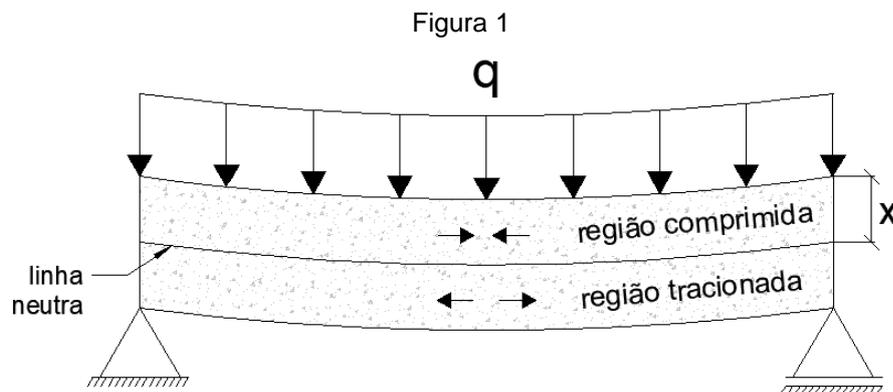
2.1.1 Tensão

Para definir tensão, é preciso entender sobre como uma força é aplicada e a forma como o corpo absorve a mesma. De acordo com Hibbeler (2010, p.14), entender a distribuição de carga interna em um corpo é de suma importância. Tendo isso em vista, leva-se como premissas com relação a resistência dos materiais. Uma delas é considerar que o material é contínuo, significando que o mesmo possui a matéria uniformemente distribuída. A outra premissa é que o material deve ser coeso, não possuindo trincas ou não uniformidades.

Para Hibbeler (2010, p.14) a tensão normal, representada pela letra grega σ (sigma) é a intensidade de uma força aplicada por unidade de área, sendo a força normal à área:

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta F}{\Delta A} \right)$$

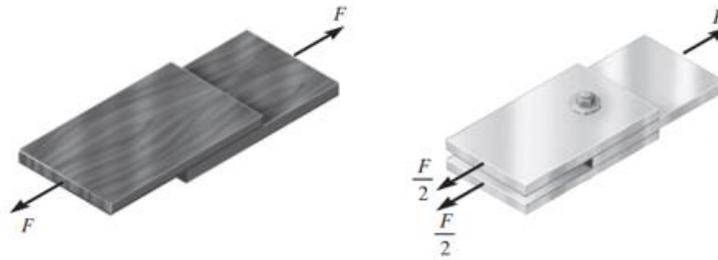
A tensão é expressa em newtons por metro quadrado (N/m^2), equivalente a um pascal ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$). Com isso, quando a força comprime a superfície, tem-se uma tensão de compressão e quando a força traciona o elemento, tem-se uma tensão de tração, como podemos ver na Figura 1.



Fonte: Núcleo do conhecimento

Ainda para Hibbeler (2010, p.20), a tensão de cisalhamento é definida como a componente da tensão que age no plano da área seccionada. O cisalhamento é comumente visto em parafusos que fixam chapas ou flanges por exemplo, sendo submetidos a esforços transversais. O cisalhamento pode ser simples ou duplo, como ilustrado na Figura 2.

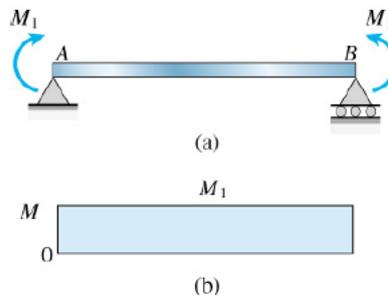
Figura 2



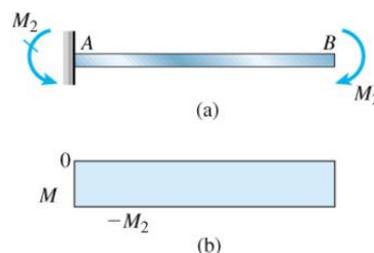
Fonte: adaptado de Hibbeler (2013, p.21 e 22)

2.1.2 Flexão

A flexão pode ser caracterizada quando uma viga é submetida a uma força e o resultado dessa força faz fletir (curvar) a barra. Gere (2003, p.228), sugere que na análise de vigas, frequentemente é preciso distinguir entre a flexão pura e flexão não uniforme. Flexão pura é referente à flexão na viga submetida a um momento fletor constante. Portanto a flexão pura acontece apenas em regiões da viga em que a força de cisalhamento é zero, pois $V = dM/dx$, conforme vemos na Figura 3 abaixo.

Figura 3: Viga simples em flexão pura ($M=M_1$)

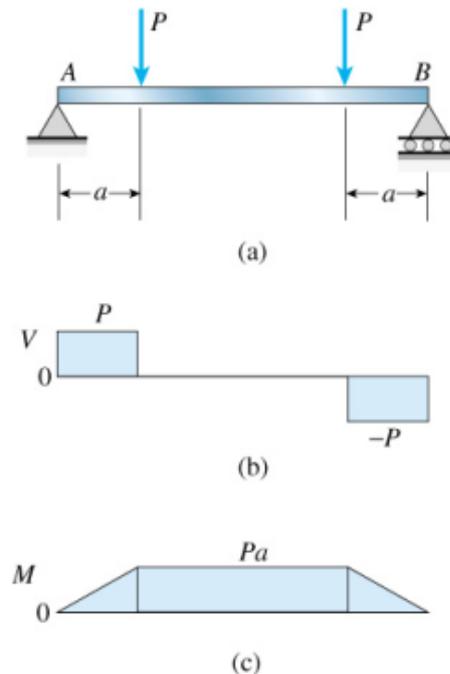
Fonte: Gere (2003, P.228)

Figura 4: Viga engastada em flexão pura ($M = -M_2$)

Fonte: Gere (2003, P.228)

Já a flexão não uniforme é referente a flexão na presença de forças de cisalhamento, o que significa que o momento fletor varia quando a força é deslocada ao longo do eixo da viga, como mostrado na Figura 5 abaixo.

Figura 5: Viga com região central em flexão uniforme e extremidades em flexão não uniforme



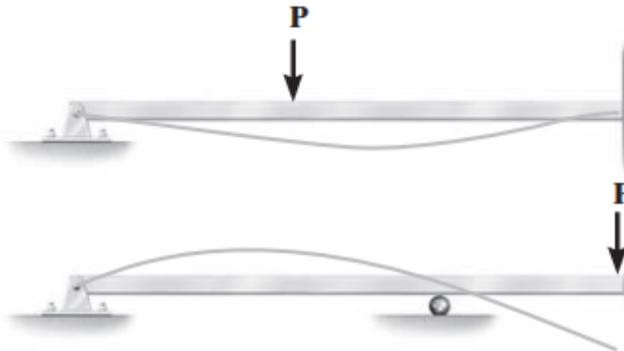
Fonte: Gere (2003, P.228)

2.1.3 Deflexão em vigas e eixos

De acordo com Hibbler (2010, p.421), para que seja possível visualizar a deflexão de um elemento como viga ou eixo, é necessário esboçar um desenho evidenciando parcialmente os resultados calculados. Para isso, é necessário levar em consideração as condições de contorno que restringem o caso, objeto de estudo, como por exemplo os tipos de apoio, podendo ser: rolete, pino, extremidade fixa, extremidade livre, pino ou articulação interna.

Tendo isso em vista, “O diagrama da deflexão do eixo longitudinal que passa pelo centroide de cada área da seção transversal da viga é denominado linha elástica.” (HIBBLER, 2010, p.421). Na Figura 6 vemos a projeção da linha elástica em duas vigas com diferentes condições de contorno.

Figura 6



Fonte: Hibbeler (2010, P.421)

Na Figura 6 é possível observar a deformação da linha elástica com a aplicação de um esforço. Conforme mencionado acima, cada situação de engastamento ou apoio resultará em uma projeção de deformação para a linha elástica.

2.1.4 Deformação

Na medida em que uma força é aplicada sobre um corpo, tem-se uma deformação, fenômeno que ocorre em todo tipo de material. Em alguns é visível a alteração física e em outros não se consegue visualizar sem a utilização de equipamentos de medição. Para Hibbeler (2010, p.47), a deformação de um corpo não é uniforme em seu volume, podendo variar em função da geometria que o mesmo possui.

Pode-se notar esse ponto aplicando uma determinada força em um elástico, o mesmo se deformará elasticamente e voltará a seu estado normal quando cessada a força, sendo visível a deformação ao olho humano. Já em uma estrutura metálica que compõe uma ponte rolante, não é possível visualizar a deformação quando aplicada carga na talha e solicitada a estrutura, sem o auxílio de equipamentos especiais de medição.

Além da deformação poder ser gerada pela aplicação de força, também pode-se ter deformação apenas pela variação de temperatura. Sabe-se que pontes rodoviárias possuem juntas de dilatação para absorver melhor a aplicação de esforços, além de servir como junta de dilatação, para evitar trincas e rupturas quando o material se dilata em virtude da variação de temperatura.

Deformação normal: de acordo com Hibbeler (2013, p.47) é o alongamento ou contração de um segmento de reta por unidade de comprimento. Pode-se analisar a

deformação normal a partir de uma reta AB, com os pontos iniciais A e B e posterior a deformação tornam-se A' e B', tornando a reta em uma curva. A mudança no seu comprimento é Δs , desta forma, pode-se definir a deformação normal média como:

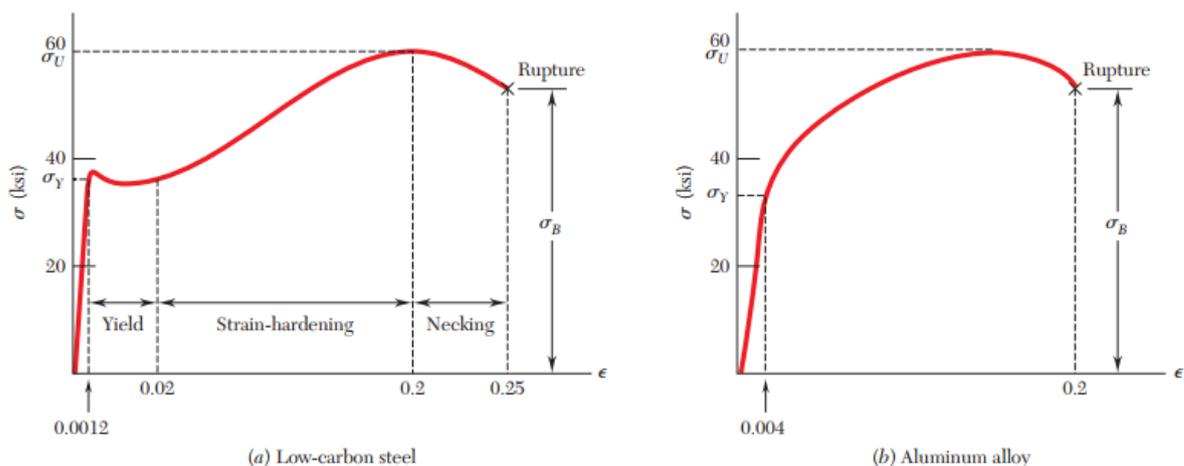
$$\epsilon_{\text{méd}} = \frac{\Delta s' - \Delta s}{\Delta s}$$

Para Hibbeler (2013, p.47), em projetos de engenharia aplica-se o estudo com pequenas deformações, tendo como base que equipamentos e máquinas no geral são rígidas e que suas deformações em virtude da solicitação de um esforço gerem valores muito pequenos e muitas vezes nem são percebidos. Assim, com a premissa da análise de pequenas deformações para uma gama muito grande de materiais, pode-se considerar a deformação normal, $\epsilon \ll 1$, simplificando cálculos de deformação normal.

2.1.4.1 Lei de Hooke: módulo de elasticidade

De acordo com Beer (2015, p.57), estruturas em engenharia são desenvolvidas para sofrer deformações relativamente pequenas que correspondem apenas a parte linear, reta do diagrama de tensão-deformação mostrado na Figura 7 abaixo.

Figura 7



Fonte: Beer (2015, p.60)

Para a parte inicial do gráfico tensão versus deformação, a tensão σ aplicada é diretamente proporcional a deformação gerada ϵ . Assim, descreve-se através da equação abaixo:

$$\sigma = E \epsilon$$

Onde:

σ : tensão

E: módulo de elasticidade do material, ou também conhecido como módulo de *Young*

ϵ : deformação específica

O maior valor de tensão para o qual a lei de Hooke é aplicada se chama limite de proporcionalidade. Este limite é o ponto onde a maior tensão aplicada ainda gera deformação de maneira linear no material, posterior a esse valor, a deformação não é mais proporcional a tensão aplicada.

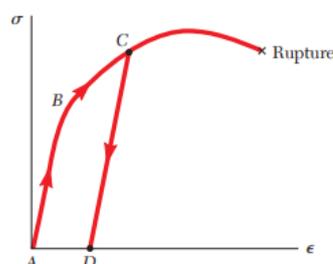
2.1.4.2 Comportamento elástico e comportamento plástico de um material

Com a aplicação de um esforço, é possível gerar deformações permanentes ou deformações temporárias em um objeto. Se a deformação gerada no corpo de prova desaparecer quando cessada a força, pode-se dizer que a deformação foi elástica. Com isso, a maior tensão na qual o material se comporta como elástico é chamada de limite elástico do material.

Se o material tem um ponto de escoamento bem definido, como na Figura 7, o limite elástico, o limite de proporcionalidade e o ponto de escoamento são essencialmente iguais. Em outras palavras, o material comporta-se elástica e linearmente desde que a tensão seja mantida abaixo do ponto de escoamento. (BEER, 2015, p.59)

Em caso de que a deformação ocorra de forma plástica, o ponto de escoamento é atingido. Quando a força é removida, a tensão e a deformação específica diminuem de forma linear. Como se observa na Figura 8 abaixo, tem-se duas retas, AB e CD. A reta AB representa o carregamento e a reta CD o descarregamento. Nota-se que ϵ (deformação) não retorna a zero, demonstrando que ocorreram deformações plásticas, ou também chamada de deformações permanentes.

Figura 8



Fonte: Beer (2015, p.69)

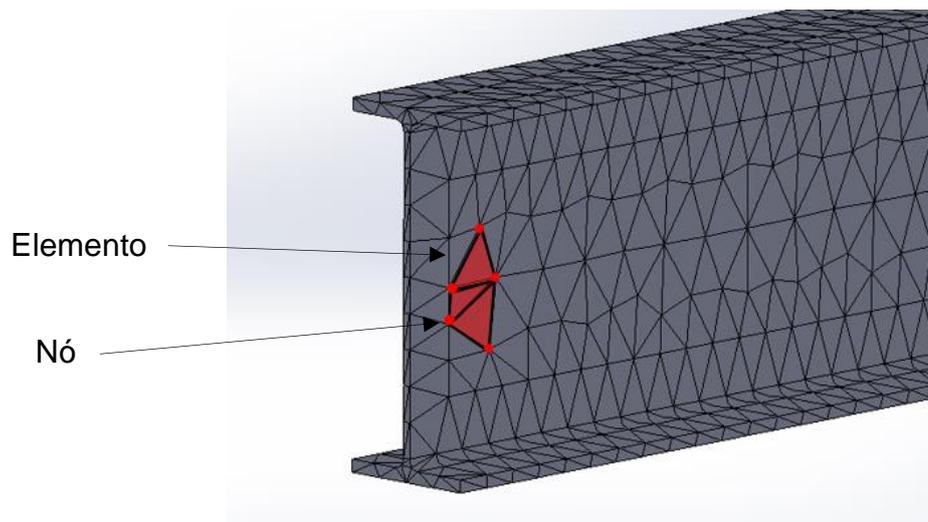
2.1.5 Análise por elementos finitos

Para modelar um problema deve-se saber resolvê-lo por intermédio dos conceitos e teorias da resistência dos materiais, tratando-se de vigas, principalmente da análise estática.

A análise por intermédio de elementos finitos permite obter resultados dos esforços aplicados no objeto, partindo da carga e transferindo as forças a todos os nós que interligam os finitos elementos que formam a malha.

Imagine um elemento simples sendo dividido em várias partes, o conjunto desses elementos subdivididos formam a malha do material e o que interliga os elementos, são os nós, conforme se vê na Figura 9.

Figura 9



Fonte: Autor (2022)

Para Filho (2013, p.3), os métodos analíticos tornam possível o cálculo da resposta exata para deslocamento, deformação e tensões na estrutura para seus infinitos pontos, no entanto esse tipo de solução é conhecido para alguns casos teóricos, que vão ao encontro da maioria dos casos que temos no dia a dia.

O método de análise por elementos finitos consiste na resolução de um sistema de equações através de método numérico para determinar o comportamento estrutural de componentes com formas complexas através de *softwares* como Solidworks, Creo e Inventor.

Com a aplicação dessa metodologia, facilita muito a análise estrutural de um projeto. No entanto para que a metodologia seja bem utilizada, deve-se parametrizar

o *software* com as informações necessárias, como por exemplo o módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, massa do material. Além da aplicação da ferramenta, faz-se necessário a verificação das normativas vigentes no âmbito do projeto desenvolvido. Ou seja, não basta o usuário apenas aplicar o *software* para resolver um dado problema, é necessário também um conhecimento das normas vigentes, elementos finitos e resistência dos materiais, de modo que o engenheiro projetista consiga analisar o resultado obtido com o *software* e verificar possíveis inconsistências nos resultados.

Por exemplo, para o desenvolvimento deste trabalho, fez-se necessário seguir as instruções orientadas na NBR 8400. Desta forma, analisa-se a norma juntamente com a ferramenta do *software* para que assim seja possível projetar a estrutura com base nas regras da norma vigente e trabalhando com o auxílio do computador para facilitar o entendimento dos pontos críticos gerados pelas solicitações.

2.2 PONTE ROLANTE

Dentro da indústria desenvolveu-se soluções para as dificuldades e necessidades criadas no âmbito das movimentações de carga. Entre essas podemos citar as movimentações de componentes que de acordo com a norma regulamentadora NR 17, faz-se necessário a aplicação de uma solução que garanta com que as condições de trabalho sejam adaptadas às condições psicofisiológicas dos trabalhadores, assegurando conforto, segurança, saúde e produtividade.

O equipamento ponte rolante é caracterizado por ser um facilitador do manuseio de cargas. O mesmo é utilizado para içar cargas por intermédio de um gancho, que é acionado por uma talha elétrica, executando movimento vertical. Já o movimento horizontal é feito por intermédio do acionamento de motoredutores que quando acionados, fazem com que a carga translade.

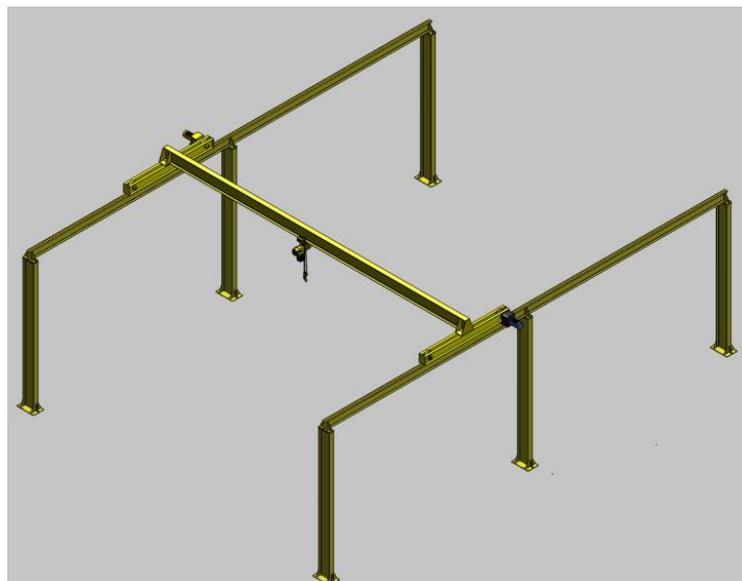
Pode-se caracterizar uma ponte rolante de acordo com suas características construtivas, como por exemplo: univiga, biviga, pórtico. Neste trabalho será desenvolvido um estudo de uma ponte rolante univiga. A seleção correta do equipamento de movimentação deve ser feita com base em uma análise in loco do processo produtivo. Essa análise deve levar em consideração dados como: ciclos de trabalho, velocidade, atividade, regime de trabalho.

O desenvolvimento do equipamento em análise segue as diretrizes que a NBR 8400 de 2019 estabelece. A norma teve a primeira versão em 1984 que passou por uma revisão e reestruturação em 2019, ampliando e especificando mais alguns pontos abordados, sendo dividida em cinco partes, 8400-1, 8400-2, 8400-3, 8400-4 e 8400-5.

2.2.1 Componentes de uma ponte rolante

O equipamento é composto por componentes como: viga principal, vigas de rolamento, colunas, talha e cabeceira. Abaixo, na Figura 10 vemos o projeto de uma ponte rolante 5 toneladas.

Figura 10



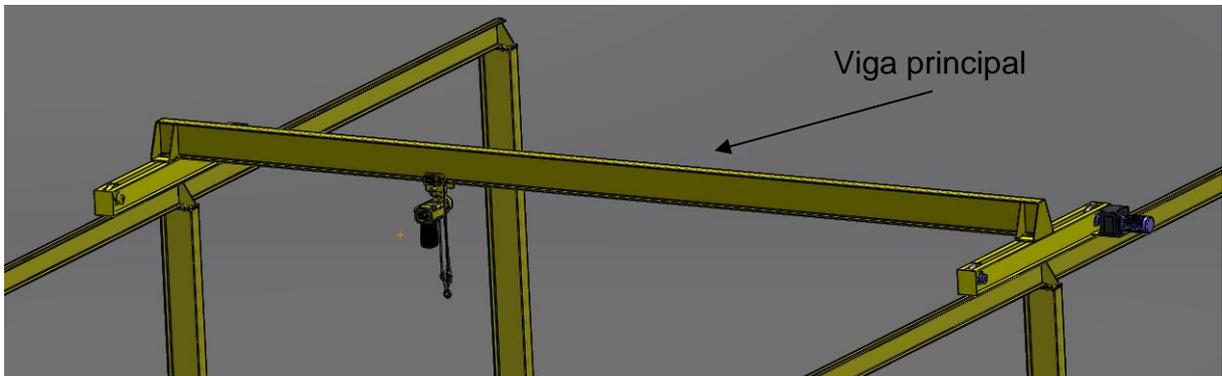
Fonte: Autor (2022)

2.2.1.1 Viga principal

A viga principal é o elemento que faz a sustentação direta do trolley (carro), carga içada e dispositivo de içamento. A viga principal é a parte de maior solicitação na ponte rolante. Esse componente sofre as solicitações oriundas da carga, somada ao trolley que combinados geram o maior momento fletor no equipamento, quando o trolley está localizado na posição central da viga. Este elemento é dimensionado de acordo com seu esforço solicitado, que é diretamente influenciado pelo vão livre que a ponte rolante terá, observando que quanto maior o vão livre, maior será a deflexão

em estado de repouso em virtude da própria massa da viga. Na Figura 11, observe-se a viga principal.

Figura 11

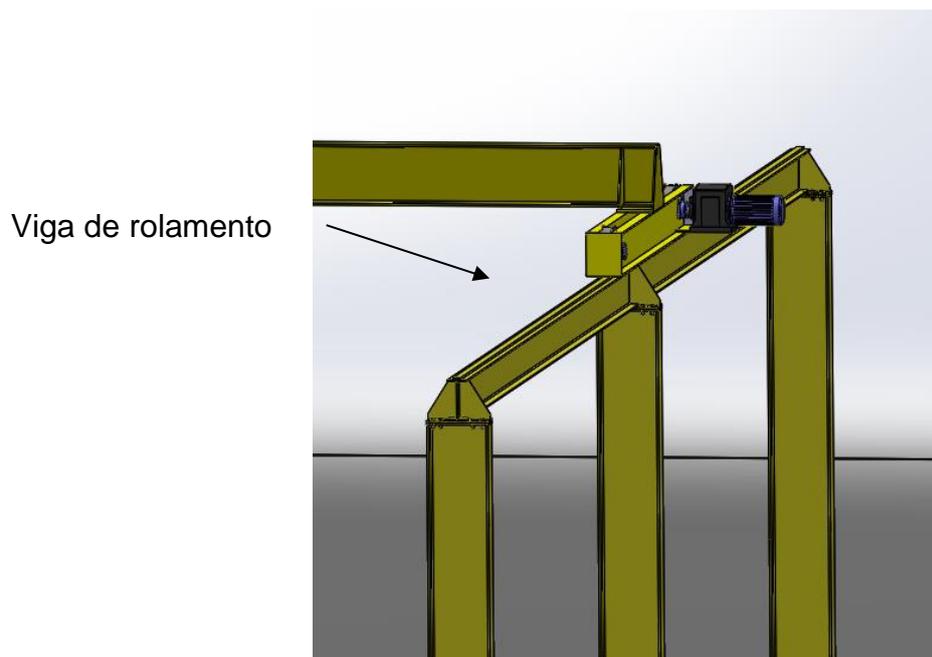


Fonte: Autor (2022)

2.2.1.2 Vigas de rolamento

As vigas de rolamento são os caminhos de rolagem da cabeceira da viga principal. São sobre esses perfis que as rodas transladam e executam o movimento horizontal da carga, conforme se vê na Figura 12.

Figura 12

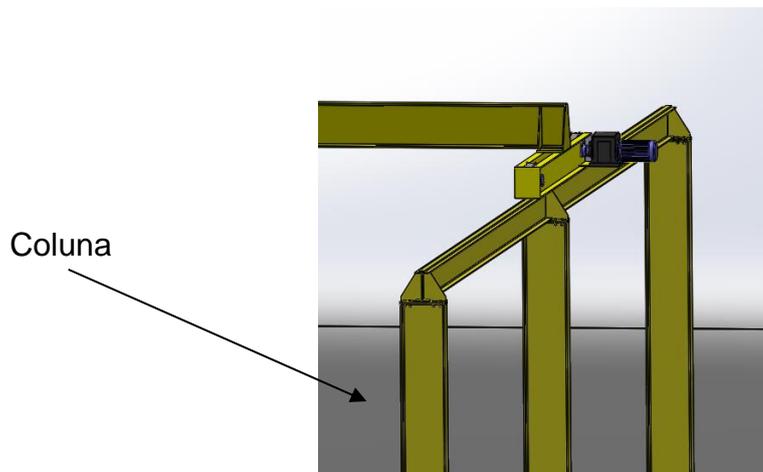


Fonte: Autor (2022)

2.2.1.3 Colunas

As colunas são os elementos estruturais verticais que dão sustentação e estabilidade a todo sistema da ponte rolante. As colunas estão sujeitas aos esforços das vigas de rolamento somadas à viga principal com a carga içada. Abaixo, na Figura 13 vemos as colunas de uma ponte rolante monoviga.

Figura 13



Fonte: Autor (2022)

2.2.1.4 Talha

A talha é o equipamento que faz o içamento da carga, deslocando-a verticalmente. Sendo composta por um motor elétrico que quando acionado, faz o enrolamento ou desenrolamento do cabo de aço no tambor. A mesma pode ser fixada diretamente no perfil da viga por intermédio de um trole. Na Figura 14, mostra-se uma talha elétrica de cabo de aço.

Figura 14

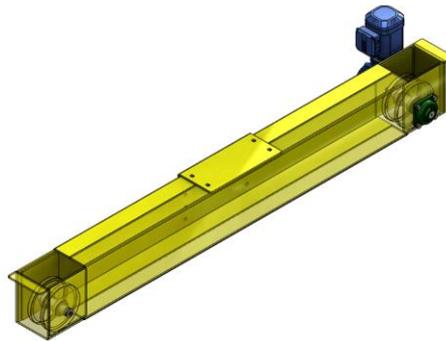


Fonte: DEMAG

2.2.1.5 Cabeceira

A cabeceira é o elemento que é unido com a viga principal e apoiado sobre as vigas de rolamento. Esta parte da ponte rolante é equipada com um ou em alguns casos dois motores elétricos que são acoplados caixas de redução e esses transmitem o movimento rotativo para as rodas, que por sua vez, fazem com que a viga principal seja deslocada horizontalmente. Na Figura 15, a ilustração de uma cabeceira.

Figura 15



Fonte: ZUMAK

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para desenvolvimento desse trabalho foi feito um estudo consistente nos assuntos que dizem respeito à resistência dos materiais e projetos mecânicos de máquinas, com objetivo de aplicar as teorias em uma análise estrutural de uma ponte rolante. Para isso será necessário estudos e cálculos analíticos, assim como desenvolvimento de um modelo em *software* CAD para fazer simulações e analisar os fenômenos que ocorrem na viga do equipamento, quando o mesmo é submetido à carregamento, analisando flexão e deflexão.

Para estudos e como base de informação, será utilizada a ABNT NBR 8400-1, NBR 8400-2, NBR 8400-3, NBR 8400-4 e NBR 8400-5 de 2019, que são respectivamente as normas que regulamentam e informam os requisitos mínimos para dimensionamento de equipamentos de transporte e elevação de carga e requisitos para projetos de estruturas de aço.

Para desenvolvimento dos cálculos necessários no dimensionamento da viga de acordo com a NBR 8400-1 foi utilizado o *software* Excel.

Também foi utilizada a norma ABNT NBR 8800 com o objetivo de fazer a verificação quanto ao deslocamento admissível no ponto central da viga.

Para desenho e simulação da viga projetada, foi utilizado o *software* de modelagem e simulação.

3.1 PERFIL ESTRUTURAL LAMINADO

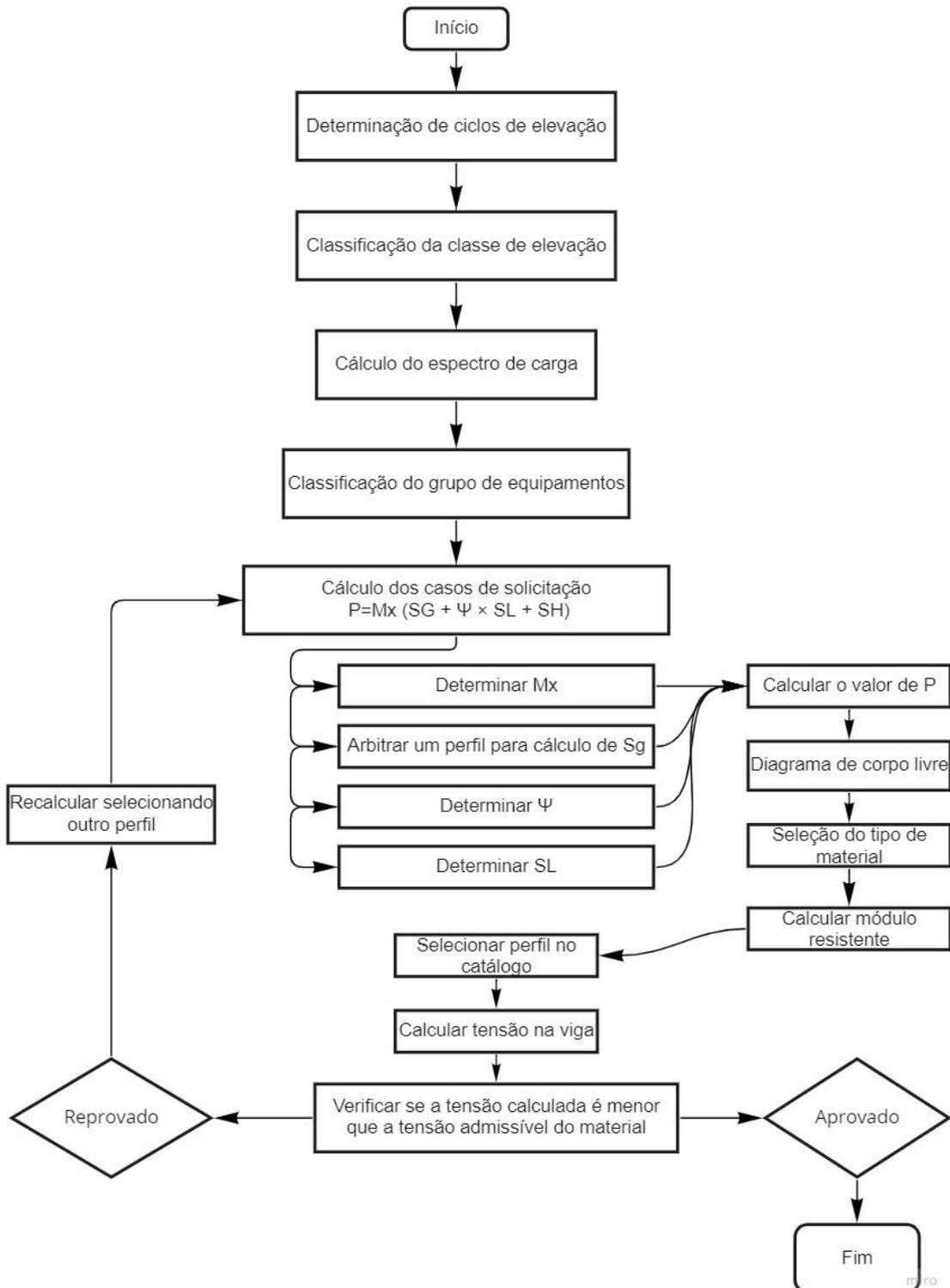
O perfil estrutural laminado é um elemento homogêneo, laminado a quente a partir de blocos sem uso de solda, com as mesas paralelas e baixas tensões residuais. São ótimas opções quando se trata de projetos onde será utilizado aço, para estruturas de galpões, pontes, equipamentos de movimentação.

O objeto de estudo deste trabalho trata-se do dimensionamento de um perfil W da viga principal de uma ponte rolante, capacidade de carga de 5 toneladas e vão livre de 15 metros. O nome “perfil W” é oriundo de *wide flange* (abas largas).

Para elaboração do projeto do perfil foi necessário analisar a norma e classificar o projeto conforme todas as condições cabíveis à aplicação em que o equipamento será posto. Desta forma, a norma dá as diretrizes a seguir para dimensionar perfis estruturais. Mas cada projeto é único e suas particularidades devem ser muito bem

analisadas para que não haja negligência ou desconsideração de algum parâmetro importante.

Para projetar especificamente esta estrutura, seguiu-se os seguintes pontos, de acordo com a NBR 8400-1, 8400-2, 8400-3, 8400-4 e 8400-5. O fluxograma abaixo demonstra a metodologia desenvolvida para o dimensionamento da viga principal da ponte rolante.



3.1.1 Determinação de ciclos de elevação

De acordo com a ABNT NBR 8400-1 (2019, p.8), um ciclo de elevação é a sequência completa de elevação e descarga, iniciando quando o equipamento eleva a carga e finalizando quando o equipamento está pronto para elevar outra carga. Ainda, a duração total de uso é um valor estimado, que propõem o início e o fim do ciclo de vida deste, iniciando quando o mesmo é posto em operação e finalizando quando o mesmo é retirado.

Com base nisso, estima-se valores para utilização do equipamento, como número de ciclos por dia e conseqüentemente por ano. Os valores obtidos não são com fins de exatidão, mas sim com o objetivo de nortear e orientar uma linha de análise.

A Tabela 1 abaixo demonstra faixas de operação muito abrangentes, com intervalos muito grandes. No entanto, é importante selecionar a faixa de operação mais condizente possível com o tipo de aplicação, evitando erros de grande monta. Assim, estima-se 96 ciclos de trabalho por dia, em dois turnos. Para essa análise, levou-se em consideração o estudo de caso de uma ponte rolante para armazenagem e separação de tubos em uma empresa fabricante de implementos agrícolas. Desta forma, foi considerado 6 ciclos por hora, gerando 48 ciclos em um turno de 8h, o que em dois turnos de oito horas gerará 96 ciclos. Abaixo, na Tabela 1, classificação do número de ciclos de elevação.

Tabela 1

Símbolo	Duração total do uso				
	(número $n_{m\acute{a}x.}$ de ciclos de elevação)				
U_0			$n_{m\acute{a}x.}$	<	16 000
U_1	16 000	<	$n_{m\acute{a}x.}$	<	32 000
U_2	32 000	<	$n_{m\acute{a}x.}$	<	63 000
U_3	63 000	<	$n_{m\acute{a}x.}$	<	125 000
U_4	125 000	<	$n_{m\acute{a}x.}$	<	250 000
U_5	250 000	<	$n_{m\acute{a}x.}$	<	500 000
U_6	500 000	<	$n_{m\acute{a}x.}$	<	1 000 000
U_7	1 000 000	<	$n_{m\acute{a}x.}$	<	2 000 000
U_8	2 000 000	<	$n_{m\acute{a}x.}$	<	4 000 000
U_9	4 000 000	<	$n_{m\acute{a}x.}$		

Fonte: Adaptado de NBR 8400-1

Com a determinação no número máximo de ciclos e ciclos de trabalho por dia, estima-se o tempo de vida útil do equipamento em aproximadamente 20 anos.

3.1.2 Classificação da classe de elevação

A Tabela 2 abaixo mostra exemplos de classificação de equipamentos de elevação. Desta forma, como o equipamento em análise é uma ponte rolante aplicada na indústria metal mecânica, classificou-se como equipamento industrial, classe de elevação HC3.

Tabela 2

Tipo de equipamento		Detalhes relacionados à natureza do uso ^a	Grupo do equipamento (ver 6.1.2.4)	Classe da elevação
Referência	Indicação			
1	Equipamentos operados manualmente	–	A1 – A2	HC1
2	Equipamentos de montagem e desmontagem	–	A1 – A2	HC1/HC2
3	Equipamentos para casa de força	–	A2 – A4	HC1
4	Equipamentos para oficina em geral	Gancho	A3 – A5	HC2/HC3
	Equipamentos industriais em geral			
5	Equipamentos para carregamento de fundição	Garra ou eletroímã	A6 – A8	HC3/HC4
6	Equipamentos para manuseio de panela de metal líquido	–	A6 – A8	HC2/HC3
7	Ponte rolante estripadora	–	A8	HC3/HC4
8	Equipamentos para decapagem	–	A8	HC4
	Equipamentos para carregamento de forno elétrico			
9	Equipamentos para forjaria	–	A6 – A8	HC4
10	Equipamentos para contêineres (pontes e pórticos rolantes)	Gancho ou “spreader” (barra de carga)	A5 – A6	HC2
11	Equipamentos com dispositivo de içamento	Garra, caçamba, tenaz ou eletroímã	A6 – A8	HC3/HC4
	Equipamento para descarregamento de navio com dispositivo de içamento			

12	Equipamentos para doca seca, equipamentos para estaleiro naval	Gancho	A3 – A5	HC2
13	Equipamentos portuários	Gancho	A5 – A6	HC2
14	Equipamentos portuários com dispositivo de içamento	Garra, caçamba, tenaz ou eletroímã	A6 – A8	HC3/HC4
15	Guindaste giratório	Gancho	A2 – A3	HC1/HC2
^a Somente alguns casos de uso típicos são mostrados como orientação nesta coluna.				

Fonte: Adaptado de NBR 8400-1

3.1.3 Cálculo do espectro de carga

De acordo com a ABNT NBR 8400-1, o espectro de carga caracteriza o número total de cargas içadas durante a vida útil. É uma função de distribuição $y = f(x)$, expressando x ($0 \leq x \leq 1$) de duração total do uso. A função expressa valores durante a qual a razão da carga içada para a carga nominal de trabalho atinge pelo menos um determinado valor y ($0 \leq y \leq 1$).

Pode-se aproximar o valor para o espectro de carga através da função abaixo, sendo a mesma uma relação entre o somatório da carga içada, dividida pela carga máxima elevada ao cubo e multiplicada pela razão do número de ciclos:

$$k_p = \sum_{i=1}^r \left[\left(\frac{m1r}{m1máx.} \right)^3 x \left(\frac{ni}{nmáx} \right) \right]$$

Onde:

$m1r$ = massa da carga içada;

$m1máx$ = massa máxima da carga içada;

ni = número de vezes em que a massa 1 é içada;

$nmáx$ = número de ciclos de elevação que determinam a duração total de uso;

Para o caso analisado neste trabalho, levou-se em conta o dimensionamento para a viga principal de uma ponte rolante com capacidade para 5 toneladas, desta forma, estimou-se a massa das cargas içadas abaixo. A partir dessas cargas, fez-se uma razão distribuindo igualmente o número de vezes em que determinada carga será içada, para fins de cálculo. Com base no número de ciclos máximo, determinado de acordo com a Tabela 1, fez-se a divisão do número máximo de ciclos, pela quantidade de massas içadas, no caso do estudo considerou-se que serão içadas seis tipos de massa, conforme Tabela 3 abaixo. Assim:

Tabela 3

	nº de ciclos	massa [kg]
n1	83333	100
n2	83333	500
n3	83333	800
n4	83333	2000
n5	83333	2500
n6	83333	5000

Fonte: Autor (2022)

O quadro acima mostra valores estimados de número de ciclos para cada faixa de carga, na prática esse número será um pouco diferente, no entanto para fins de cálculo, gerará resultados proporcionais e satisfatórios.

$$k_p = \sum_{i=1}^r \left[\left(\frac{100}{5000} \right)^3 \times \left(\frac{83333}{500000} \right) + \left(\frac{500}{5000} \right)^3 \times \left(\frac{83333}{500000} \right) + \left(\frac{800}{5000} \right)^3 \times \left(\frac{83333}{500000} \right) + \right. \\ \left. \left(\frac{2000}{5000} \right)^3 \times \left(\frac{83333}{500000} \right) + \left(\frac{2500}{5000} \right)^3 \times \left(\frac{83333}{500000} \right) + \left(\frac{5000}{5000} \right)^3 \times \left(\frac{83333}{500000} \right) \right]$$

$$k_p = 0,200$$

Com o resultado de k_p obtido, classifica-se na Tabela 4 abaixo como Q2 na classe dos espectros.

Tabela 4

Classe de espectro	Fator de espectro k_p				
			k_p	<	
Q1			k_p	<	0,125
Q2	0,125	<	k_p	<	0,250
Q3	0,250	<	k_p	<	0,500
Q4	0,500	<	k_p	<	1,000

Fonte: Adaptado de NBR 8400-1

3.1.4 Classificação do grupo de equipamentos

A classificação do grupo do equipamento é feita de acordo com os passos orientados na NBR 8400-1 seguindo a Tabela 5. Na Tabela 5 abaixo, é feito o cruzamento de dois dados já definidos no dimensionamento, uma delas é a classe de

utilização U5, já definida na Tabela 1 e outra é a classe de espectro de carga Q2, definida na Tabela 4. Com isso, chega-se a classificação do grupo do equipamento, A5. Essa classificação do grupo do equipamento, A5 obtida faz sentido quando comparada com a Tabela 2, onde a margem para equipamentos industriais em geral é de A3 a A5, comprovando que o dimensionamento segue um caminho real.

Tabela 5

Classe de espectro de carga	Classe de utilização									
	U0	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9
Q1	A1	A1	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
Q2	A1	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A8
Q3	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A8	A8
Q4	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A8	A8	A8

Fonte: Adaptado de NBR 8400-1

3.1.5 Casos de solicitação

Com os dados até o momento dimensionados, chega-se na análise dos casos de solicitação do equipamento. Os casos de solicitação consideram os fatores do ambiente de instalação. Para isso, deve-se ter definido já o local de instalação da ponte rolante. Desta forma, tem-se três casos diferentes de solicitação para serem considerados:

- a) Caso I: serviço normal sem vento;
- b) Caso II: serviço normal com vento limite de serviço;
- c) Caso III: solicitações excepcionais.

Como o equipamento projetado é para local fechado e coberto, classifica-se como Caso I, serviço normal sem vento. Para isso, de acordo com a NBR 8400-1 de 2019, deve-se levar em consideração:

- a) As cargas estáticas devido ao peso próprio S_G ;
- b) As cargas de serviço S_L multiplicada pelo coeficiente dinâmico Ψ ;
- c) Dois efeitos horizontais S_H mais desfavoráveis entre aqueles estabelecidos

(inércia, força centrífuga, reações horizontais transversais, efeitos de amortecimento), detalhados na norma, excluindo os efeitos de choque.

A equação que descreve a carga para o Caso I, serviço normal sem vento é:

$$P = M_x (SG + \Psi \times SL + SH)$$

M_x é o coeficiente de majoração, selecionado conforme Tabela 6 abaixo, utilizando-se do grupo do equipamento, já selecionado na Tabela 5.

Tabela 6

Grupo do equipamento	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
M_x	1,00	1,02	1,05	1,08	1,11	1,14	1,17	1,20

Fonte: Adaptado de NBR 8400-1

Para S_G , considera-se a massa da viga somada aos acessórios (talha e dispositivo de içamento). Neste ponto do dimensionamento ainda não se têm selecionado o perfil da viga a ser utilizado, desta forma não se sabe a massa por metro que o perfil possui.

Com isso, arbitra-se uma viga para execução do cálculo (W 530 x 72), selecionada com base na tabela de bitolas da GERDAU, vide Anexo I. Este perfil selecionado para o cálculo possui uma massa de 72 kg por metro. O valor arbitrado para o cálculo deve ser analisado no fim dos cálculos, quando se tem dados suficientes para seleção do perfil. Caso não estejam atendendo à solicitação, deverão ser refeitos os cálculos com outro perfil.

Para massa da talha, seguiu-se como base o artigo técnico da GERDAU, "Vigas de rolamento com perfis estruturais GERDAU", onde é feito o dimensionamento de perfis de rolamento e desta forma, tem-se pesos médios de talhas e suas respectivas capacidades, considerando a massa de 1300 kg para a talha. Assim:

$$SG = P (viga) + P (talha)$$

$$SG = 15m \times 72 \frac{kg}{m} + 1300kg$$

$$SG = 2380kg$$

Logo, a massa da viga somada a massa da talha fica em torno de 2380 kg.

A próxima incógnita da equação para o Caso I a ser definida é o coeficiente dinâmico, Ψ . Coeficiente dinâmico é um fator de multiplicação utilizado para considerar as oscilações causadas pela carga durante a elevação. O coeficiente dinâmico é determinado de acordo com a equação abaixo, tendo como base a classe de elevação, com o $\Psi_{\text{mín}}$ e β_2 determinados na Tabela 7 e V_h sendo a velocidade de elevação da talha, conforme catálogo de fornecedores.

$$\Psi = \Psi_{\text{mín}} + \beta_2 \times V_h$$

Tabela 7

Classe de elevação do equipamento	β_2	$\Psi_{\text{mín}}$
HC1	0,17	1,05
HC2	0,34	1,10
HC3	0,51	1,15
HC4	0,68	1,20

Fonte: Adaptado de NBR 8400-1

O V_h é a velocidade de elevação da carga em regime constante. De acordo com a ABNT NBR 8400-1, classificou-se o tipo de acionamento de elevação e seu método de operação em HD4, para a classificação da talha selecionada no catálogo técnico DEMAG, com velocidade de elevação igual a 12,5 m/min, equivalente a 0,2 m/s.

Tabela 8

Caso de solicitação	Tipo de acionamento de elevação e seu método de operação				
	HD1	HD2	HD3	HD4	HD5
Caso I, Caso II	$V_{h\text{-máx}}$	$V_{h\text{-cs}}$	$V_{h\text{-cs}}$	$0,5 \times V_{h\text{-máx}}$	$V_h = 0$
Caso III	–	$V_{h\text{-máx}}$	–	$V_{h\text{-máx}}$	$0,5 \times V_{h\text{-máx}}$

onde

HD4 é um controle de variação contínua de velocidade que pode ser utilizado pelo operador do equipamento;

$V_{h\text{-máx}}$ é a velocidade nominal de elevação;

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 8400-1

Desta forma, V_h é calculado abaixo:

$$V_h = 0,5 \times V_{h\text{-máx}}$$

$$V_h = 0,5 \times 0,2 \text{ m/s}$$

$$V_h = 0,1 \text{ m/s}$$

Com isso, calcula-se o coeficiente dinâmico Ψ , a partir de V_h obtido.

$$\Psi = \Psi_{\text{mín}} + \beta_2 \times V_h$$

$$\Psi = 1,15 + 0,51 \times 0,1$$

$$\Psi = 1,201$$

A solicitação oriunda de S_L é referente a carga içada somada a seus acessórios (ganchos, correntes, lingas). Para essa solicitação, considerou-se a capacidade nominal da talha, 5000 kg somados a um valor estimado de acessório, 100 kg, resultando assim no valor de $S_L = 5100$ kg.

A solicitação horizontal S_h , foi desconsiderada, levando em conta a utilização de freios no equipamento, o que reduz muito o esforço horizontal, podendo ser o mesmo desconsiderado.

Após as ponderações feitas, o valor do esforço pode ser calculado conforme equação abaixo:

$$P = M \times (S_G + \Psi \times S_L + S_H)$$

$$P = 1,11 (2380 + 1,201 \times 5100)$$

$$P = 9.440,661 \text{ kg} = 92.612,88 \text{ N}$$

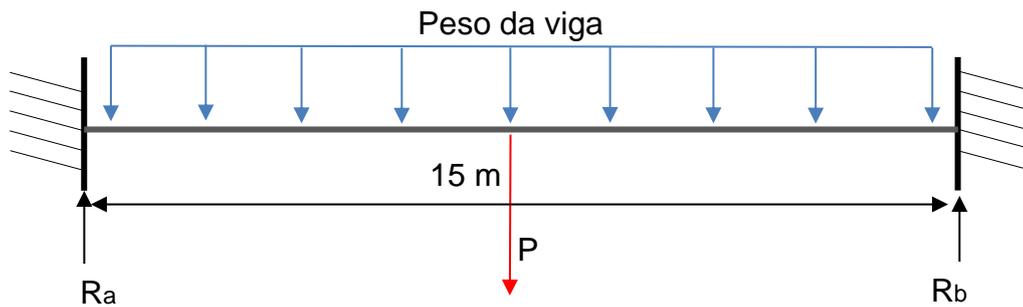
P é o valor total da carga aplicado para análise de tensão na viga.

3.1.6 Diagrama de corpo livre

Diagrama de corpo livre é o desenho esquemático que representa um corpo e todas as forças que atuam nele. O objetivo do diagrama é simplificar e facilitar o entendimento do problema. Desta forma, pode-se demonstrar todas as forças atuantes de uma forma gráfica e simples. Abaixo o diagrama de corpo livre da viga biengastada da ponte rolante. Informações:

Massa da carga e acessórios: 9440,661kg;

Massa da viga: 72kg/m (valor arbitrado, para cálculo).



Com as informações obtidas até o momento, calcula-se os esforços e reações da viga.

$$\sum Fy = Ra - P + Rb$$

$$Ra + Rb = P$$

$$Ra + Rb = 9440,661 \text{ kg}$$

$$Mmáx = \frac{F \cdot L}{4}$$

$$Mmáx = \frac{9440,661 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 15 \text{ m}}{4}$$

$$Mmáx = 347298,32 \text{ Nm}$$

$$\sum Ma = 0$$

$$\sum Ma = -P \times 7,5 \text{ m} + Rb \times 15 \text{ m}$$

$$\sum Ma = -92612,88 \times 7,5 \text{ m} + Rb \times 15 \text{ m}$$

$$Rb = 46306,44 \text{ N}$$

$$Ra = 46306,44 \text{ N}$$

3.1.7 Verificação com relação ao limite elástico

De acordo com a ABNT NBR 8400-2 (2019, p.18), a tensão calculada σ não pode ultrapassar a tensão máxima admissível σ_a obtida ao dividir a tensão de escoamento σ_E pelo coeficiente v_E aplicado ao caso de solicitação. Assim, definimos o valor do coeficiente de segurança para cálculo de elementos estruturais dependendo do caso de solicitação, v_E , na Tabela 9 abaixo. Como já definido acima, o caso de solicitação trata-se de Caso I, serviço normal sem vento.

Tabela 9

	Caso I	Caso II	Caso III
Valores de v_E	1,5	1,33	1,1
Tensão admissível σ_a	$\sigma_E/1,5$	$\sigma_E/1,33$	$\sigma_E/1,1$

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 8400-1

Na sequência, seleciona-se o tipo de aço com base nos aços para os quais a relação entre a tensão de escoamento σ_E e a tensão de ruptura $\sigma_R < 0,7$. Assim, selecionou-se o aço S355, espessura da alma < 16 mm, tensão de escoamento igual a 355 MPa e tensão admissível de 237 MPa, de acordo com o Caso I de solicitação.

Tabela 10

Norma	Aço	Espessura t mm	Tensão de escoamento σ_E N/mm ²	Tensão de ruptura σ_R N/mm ²	Tensão admissível σ_a		
					Caso I	Caso II	Caso III
					N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
EN 10025-2	S235	< 16	235	340	157	177	214
		< 40	225	340	150	169	205
		< 100	215	340	143	162	195
		< 150	195	340	130	147	177
		< 200	185	320	123	139	168
		< 250	175	320	117	132	159
	S275	< 16	275	410	183	207	250
		< 40	265	410	177	199	241
		< 63	255	410	170	192	232
		< 80	245	410	163	184	223
		< 100	235	410	157	177	214
		< 150	225	400	150	169	205
		< 200	215	380	143	162	195
		< 250	205	380	137	154	186
EN 10025-2 e EN 10025-3	S355	< 16	355	490	237	267	323
		< 40	345	490	230	259	314
	S355N e S355NL aços até $t \leq 150$	< 63	335	490	223	252	305
		≤ 80	325	490	217	244	295
		≤ 100	315	490	210	237	286
		≤ 150	295	470	197	222	268
		≤ 200	285	450	190	214	259
< 250	275	450	183	207	250		

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 8400

A seleção do material acima é feita com base apenas na espessura < 16 mm da alma, pois são as dimensões de alma disponíveis comercialmente no catálogo técnico da GERDAU, conforme Anexo I. A partir disso, com a tensão admissível selecionada,

faz-se os cálculos com esses dados. Caso não se obtenha o resultado satisfatório, onde σ_x calculada for maior do que a σ_E selecionada, deverá ser selecionado outro material e refeito os cálculos.

Posterior, faz-se a análise com base no módulo resistente, para assim se ter uma propriedade mecânica para classificar no catálogo de perfis estruturais, vide Anexo I. Assim, define-se o módulo resistente com a equação abaixo, onde o momento máximo é calculado com base no ponto mais crítico e a tensão admissível é o valor selecionado na Tabela 10 acima.

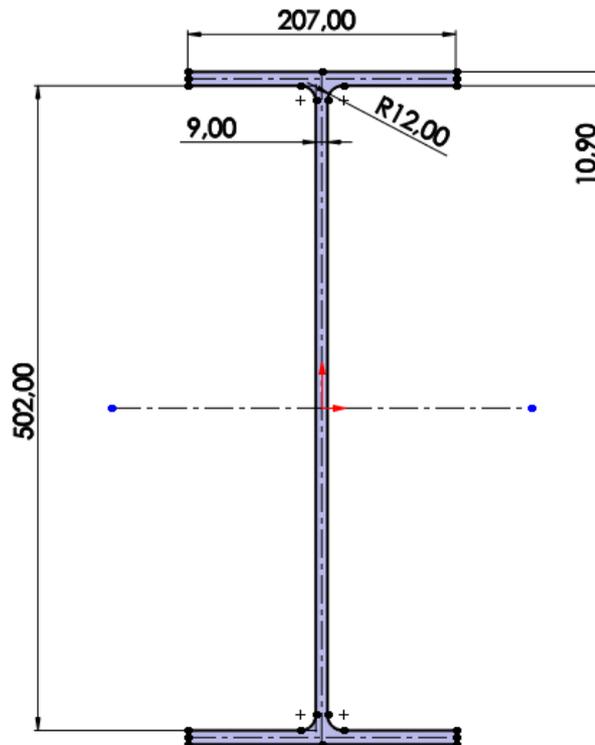
$$W_{mín} = \frac{M_{máx}}{\sigma_{adm}}$$

$$W_{mín} = \frac{347298,32 \text{ Nm}}{237 \text{ MPa}}$$

$$W_{mín} = 0,001467251 \text{ m}^3 = 1467 \text{ cm}^3$$

Com o módulo resistente, procura-se no Anexo I um perfil de viga que atenda esse valor. Desta forma, seleciona-se o perfil W 530 x 72, onde o 530 indica a bitola do perfil, o 72 indica a massa em quilograma por metro de viga e o valor do módulo resistente é 1525,5 cm³, um pouco superior ao valor calculado, logo, deverá atender à solicitação. Abaixo na Figura 16 mostra-se o desenho do perfil da viga calculada.

Figura 16 – Vista transversal da viga W (dimensões em milímetros)



Fonte: Autor (2022)

Agora podemos fazer a análise com base no dimensional da viga selecionada, calculando a tensão. Para isso, tem-se o momento já calculado, o centroide da viga $y = 261,9 \text{ mm}$ e o momento de inércia é fornecido na tabela do Anexo I, $I = 39.969 \text{ cm}^4$. Desta forma, temos a tensão representada abaixo.

$$\sigma_x = \frac{M_{max} \cdot y}{I}$$

$$\sigma_x = \frac{347298,32 \text{ Nm} \cdot 261,9 \text{ mm}}{399690000 \text{ mm}^4}$$

$$\sigma_x = 227,57 \text{ MPa}$$

Tabela 11

Tensão calculada, de acordo com esforço aplicado – σ [MPa]	Tensão admissível para Caso I – σ_a [MPa]	Resultado
227,57	237	227,57 < 237 OK

Fonte: Autor

O dimensionamento com a o perfil W 530 x 72 atende as solicitações de esforços de acordo com a norma, no entanto ficou muito próximo da tensão admissível para o Caso I. Desta forma, será simulada a análise com o perfil de viga ligeiramente superior ao W 530 x 72, buscando ter uma garantia maior quanto a tensão obtida, evitando que qualquer alteração ou erro no dimensionamento da massa dos acessórios, como talha, linga, corrente e balancim possa intervir no perfil selecionado.

Assim, como previsto no fluxograma na página 25, deve ser refeito os cálculos selecionando outro perfil. Abaixo simula-se com o perfil W 530 x 85, onde $y = 267,5 \text{ mm}$ e $I = 484530000 \text{ mm}^4$.

$$SG = 15m \times 85 \frac{kg}{m} + 1300kg$$

$$SG = 2575kg$$

$$P = Mx (SG + \Psi \times SL + SH)$$

$$P = 1,11 (2575 + 1,201 \times 5100)$$

$$P = 9.657,11 \text{ kg} = 94736,25 \text{ N}$$

$$\sigma_x = \frac{M_{max} \cdot y}{I}$$

$$\sigma_x = \frac{355260,97 \text{ Nm} \times 267,5 \text{ mm}}{484530000 \text{ mm}^4}$$

$$\sigma_x = 196,13 \text{ MPa}$$

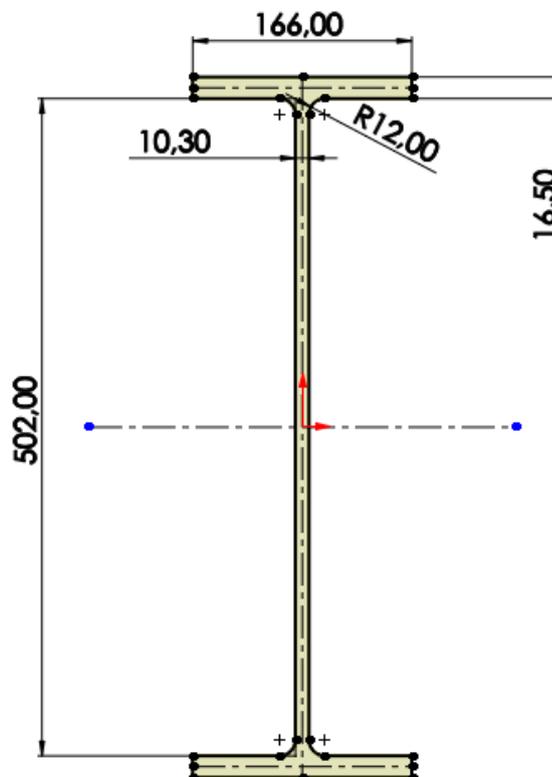
Tabela 12

Tensão calculada, de acordo com esforço aplicado – σ [MPa]	Tensão admissível para Caso I – σ_a [MPa]	Resultado
196,13	237	196,13 < 237 OK

Fonte: Autor

Com o redimensionamento da viga, temos uma maior garantia de que o projeto atenderá ao objetivo proposto, sem que se precise alterar o perfil da viga caso seja selecionada uma talha de mesma capacidade, mas de outro fornecedor por exemplo e seja de maior massa. Na Figura 17, vemos o dimensional do perfil de viga selecionada.

Figura 17 – Vista transversal da viga W (dimensões em milímetros)



Fonte: Autor (2022)

Agora, com o perfil selecionado pode ser feita a verificação quanto ao deslocamento indicado na ABNT NBR 8800 e as simulações e análises por intermédio do *software* CAD/CAE.

3.2 PROJETO E SIMULAÇÃO EM SOFTWARE CAD/CAE

3.2.1 Verificação com relação a tensão

Posterior aos cálculos desenvolvidos para o dimensionamento da viga principal da ponte rolante, objeto de estudo do presente trabalho, desenvolveu-se o desenho dos componentes da ponte rolante. O equipamento foi totalmente desenhado com o objetivo de contextualizar e evidenciar melhor todo estudo feito.

No entanto o dimensionamento e análise estrutural foram feitos apenas da viga principal do equipamento, garantindo conformidade com a ABNT NBR 8400. Abaixo, na Figura 18 vemos o desenho da viga principal da ponte rolante, com vão livre de quinze metros e capacidade de aplicação de carga de cinco toneladas.

Figura 18

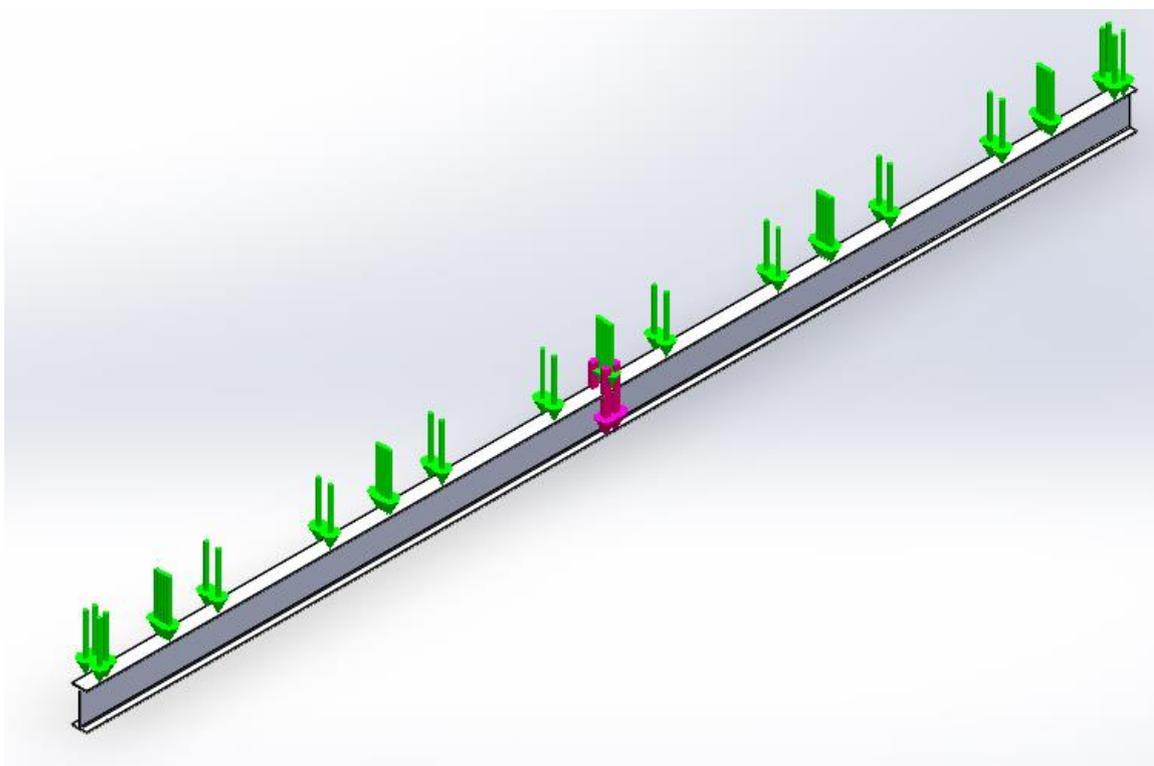


Fonte: Autor (2022)

O perfil foi projetado de acordo com as dimensões da Figura 17, material selecionado de acordo com a Tabela 10, aço S355, tensão admissível de 237 MPa e tensão de escoamento de 355 MPa.

Na simulação foi aplicada a carga calculada acima em P. Desta forma, como mostrado na Figura 19, a seta verde indica a carga distribuída do peso da viga, $P = 13883,6 \text{ N}$ e a seta rosa indica a carga da talha somada a carga da peça içada, $P = 80852,65 \text{ N}$, que quando somadas essas cargas, resultam em $94736,25 \text{ N}$.

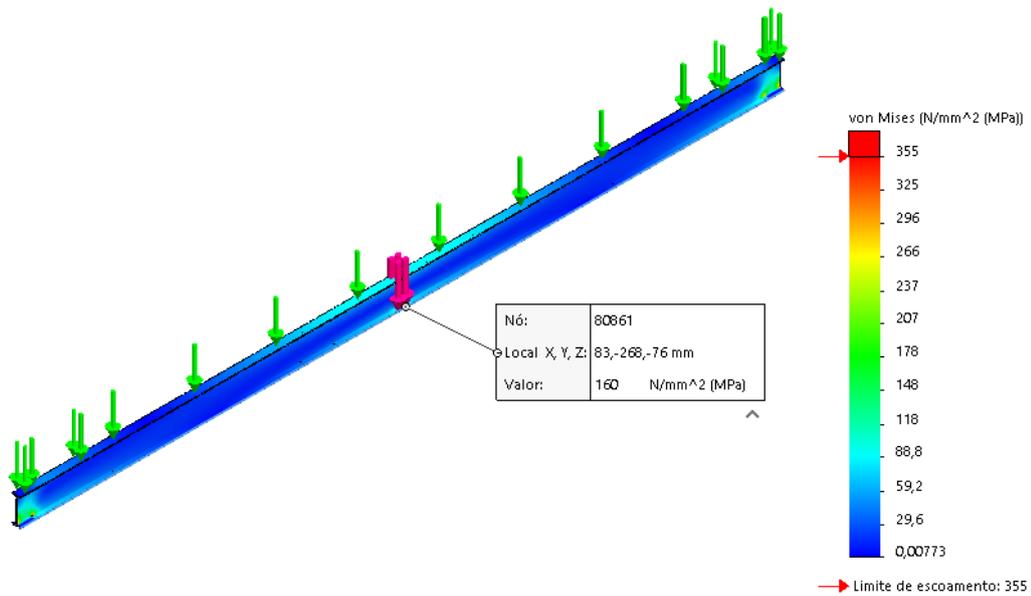
Figura 19



Fonte: Autor (2022)

Na Figura 20 abaixo, se vê a análise estática por meio de elementos finitos executada. A simulação teve resultado satisfatório, aproximando-se muito dos cálculos analíticos executados anteriormente.

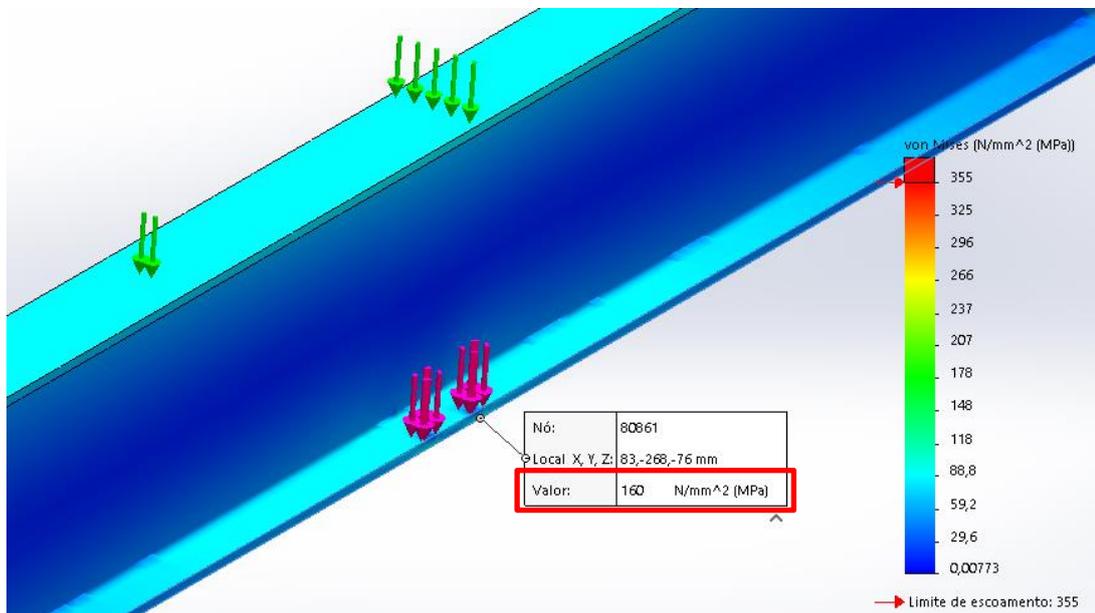
Figura 20



Fonte: Autor (2022)

Na Figura 21 vemos o detalhe do ponto central da viga, neste ponto tem-se a tensão local de 160 MPa.

Figura 21



Fonte: Autor (2022)

O resultado obtido na simulação de elementos finitos foi 160 MPa e o valor da tensão obtida nos cálculos de dimensionamento da viga foi de 196,13 MPa.

Tabela 13

Tensão calculada [MPa]	Tensão simulada [MPa]
196,13	160

Fonte: Autor (2022)

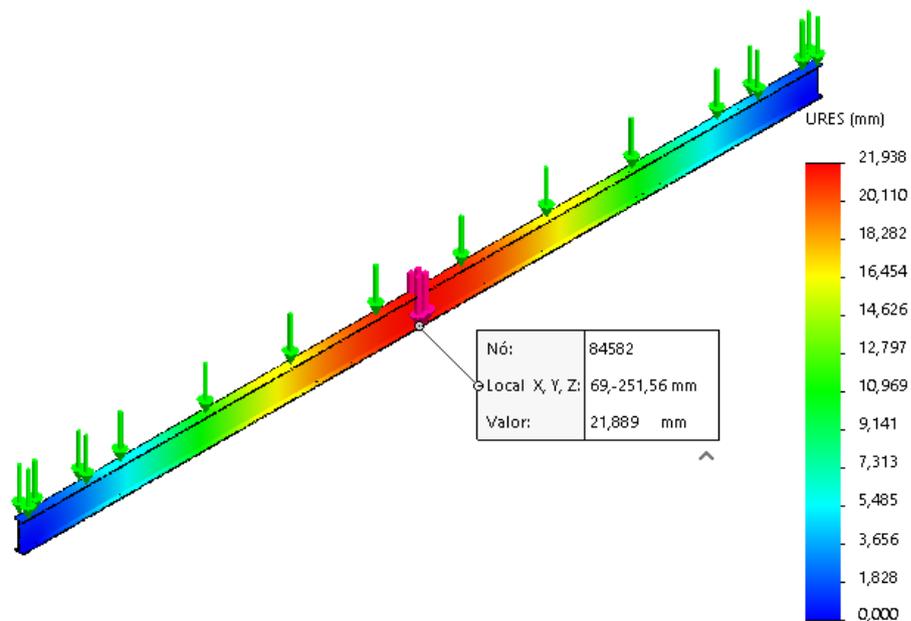
Os valores foram muito próximos, gerando uma divergência muito pequena entre cálculo analítico e simulação CAE, conferindo uma veracidade a metodologia de dimensionamento desenvolvida.

3.2.2 Verificação com relação ao deslocamento

Posterior a análise e verificação referente aos pontos indicados na ABNT NBR 8400, faz-se a verificação quanto ao deslocamento máximo permitido para viga da ponte rolante. Conforme a ABNT NBR 8800 (2008, p.117), para pontes rolantes com capacidade nominal inferior a 200 kN, a relação de deslocamento deve ser menor que $L/600$, onde L é o comprimento útil da viga.

Assim: $15000 \text{ mm} / 600 = 25 \text{ mm}$. Com isso, a deflexão não pode ser maior do que 25 milímetros. Na Figura 22, vemos o detalhe do deslocamento no ponto mais crítico de análise, onde se tem o valor máximo de 21,938 mm. Assim o perfil selecionado está atendendo também a ABNT NBR 8800.

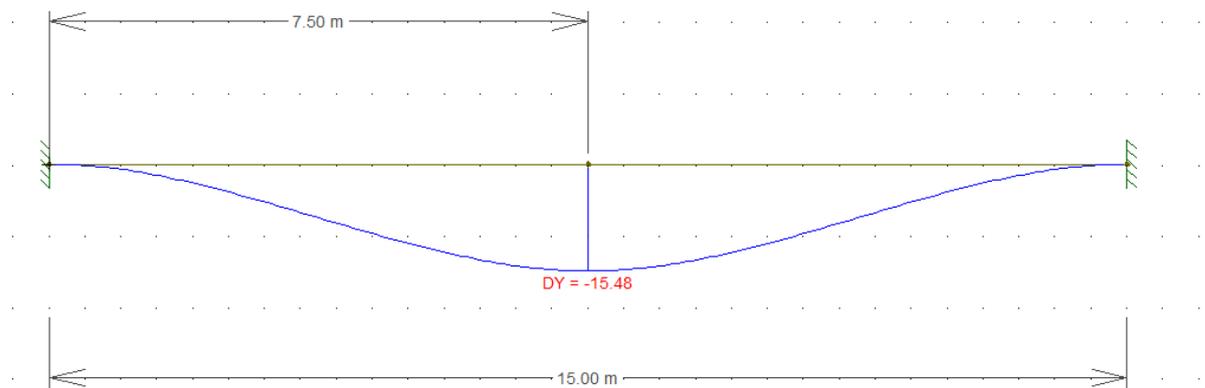
Figura 22



Fonte: Autor (2022)

Além da verificação feita por intermédio do *software* CAE, foi utilizado de um *software* gratuito para simulações de elementos estruturais, Ftool. Com isso, se verificou que o deslocamento obtido não diverge muito do resultado do *software* CAE, conforme Figura 23, conferindo veracidade a análise feita. A diferença entre os valores é possível de ser explicada em virtude de serem *softwares* diferentes, com parâmetros e configurações que não são exatamente iguais, no entanto, equivalentes.

Figura 23



Fonte: Autor (2022)

4 CONCLUSÃO

Com o desenvolvimento deste trabalho foi possível verificar a complexidade envolvida no projeto de um equipamento em conformidade com as normas aplicáveis. A metodologia de dimensionamento feita se mostrou eficiente para seleção do perfil da viga principal da ponte rolante. No entanto, todo desenvolvimento é aplicado para as condições de contorno do caso estudado.

A análise do local e das solicitações que o equipamento será colocado, é de suma importância definir no início do projeto, pois toda a análise se baseia nas condições definidas. Na norma, para cada consideração feita, uma forma de análise é seguida, ou seja, tudo se altera com as condições de contorno, como ambiente de instalação, esforços e indústria de aplicação.

O estudo desenvolvido foi pioneiro no assunto, levando em consideração que a norma ABNT NBR 8400 sofreu uma atualização em 2019, e os trabalhos desenvolvidos de dimensionamento publicados foram feitos até 2019 com a norma antiga. Assim, o estudo feito gerou resultados positivos, observando que além dos cálculos analíticos, foi feita a simulação por intermédio de elementos finitos, com material definido, e esforços equivalentes aos cálculos, resultando em valores de tensão no local de análise muito semelhantes. Além disso, conferiu-se também conformidade com a ABNT NBR 8800 com relação ao deslocamento máximo admissível.

Para desenvolvimento deste trabalho, utilizou-se do *software* excel para execução dos cálculos. Como melhoria, pode-se aprimorar a planilha de cálculos desenvolvida, tornando-a mais intuitiva, servindo como uma planilha de dimensionamento, onde se insere as informações básicas e essa selecionará o perfil com as informações fornecidas. Além disso, pode-se seguir com o dimensionamento de todo equipamento, analisando os perfis de rolamento, pilares e talha.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8400-1: Equipamentos de elevação e movimentação de carga: Regras para projeto Parte 1: Classificação e cargas sobre as estruturas e mecanismos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8400-2: Equipamentos de elevação e movimentação de carga: Regras para projeto Parte 2: Verificação das estruturas ao escoamento, fadiga e estabilidade.** Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8400-3: Equipamentos de elevação e movimentação de carga: Regras para projeto Parte 3: Verificação à fadiga e seleção de componentes dos mecanismos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8400-4: Equipamentos de elevação e movimentação de carga: Regras para projeto Parte 4: Equipamento elétrico.** Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8400-5: Equipamentos de elevação e movimentação de carga: Regras para projeto Parte 5: Cargas para ensaio e tolerâncias de fabricação.** Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

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

COLLINS, Jack A., **Projeto Mecânico de Elementos de Máquinas: uma perspectiva de prevenção de falha.** Rio de Janeiro: LTC, 2014.

DEMAG. **Talhas de cabo.** Disponível em: < <https://www.demagcranes.com/pt-br/produtos/equipamentos-de-elevacao/talhas-de-cabo>>. Acesso em 23 de agosto de 2022.

ENSUS. **Advanced Engineering**. Disponível em: <<https://ensus.com.br/>>. Acesso em 30 de agosto de 2022.

FILHO, Avelino Alves. **Elementos Finitos: A base da Tecnologia CAE**. São Paulo: Saraiva, 2013.

GERDAU. **Perfis estruturais**. Disponível em: <<https://api.aecweb.com.br/cls/catalogos/28792/22314/catalogo-gerdau-perfis-estruturais.pdf>>. Acesso em 2 de setembro de 2022.

GERDAU. **Perfis Estruturais Gerdau**. Disponível em: <<https://www2.gerdau.com.br/publicacao/perfis-estruturais-gerdau-informacoes-tecnicas/>>. Acesso em 20 de setembro de 2022.

HIBBELER, Russell Charles. **Resistência dos Materiais**. São Paulo: Pearson, 2010.
BEER, Ferdinand P., **Mecânica dos Materiais**. São Paulo: AMGH, 2015.

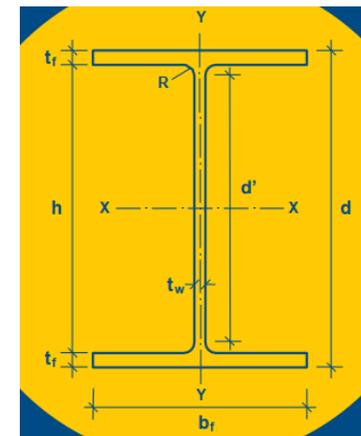
MINISTÉRIO DO TRABALHO E PREVIDÊNCIA. **Norma Regulamentadora: NR 17**. Disponível em: <<https://www.gov.br/trabalho-e-previdencia/pt-br/composicao/orgaos-especificos/secretaria-de-trabalho/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/ctpp-nrs/norma-regulamentadora-no-17-nr-17>>. Acesso em 14 de setembro de 2022.

NORTON, Robert. **Projeto de Máquinas: uma abordagem integrada**. Porto Alegre: Bookman Editora LTDA, 2013.

STAHL. Pontes Rolantes. Disponível em: <<http://www.stahl-talhas.com.br/pontes-rolantes>>. Acesso em 01 junho de 2022.

ZUMAK. **Equipamento de elevação**. Disponível em: <<http://www.zumaq.com/cabeceira-ponte-rolante.php>>. Acesso em 10 de agosto de 2022.

ANEXO I



Fonte: Gerdau

BITOLA m m x k g / m	Massa Linear k g / m	d m m	bf m m	espessura		h m m	d' m m	Área c m 2	EIXO X - X			EIXO Y - Y			u m 2/m	Bitola in x lb/ft
				tw m m	tf m m				I x c m 4	W x c m 3	rx c m	Iy c m 4	Wy c m 3	ry c m		
W 150 x 13,0	13,0	148	100	4,3	4,9	138	118	16,6	635	85,8	6,18	82	16,4	2,22	0,67	W 6 x 8,5
W 150 x 18,0	18,0	153	102	5,8	7,1	139	119	23,4	939	122,8	6,34	126	24,7	2,32	0,69	W 6 x 12
W 150 x 22,5 (H)	22,5	152	152	5,8	6,6	139	119	29,0	1.229	161,7	6,51	387	50,9	3,65	0,88	W 6 x 15
W 150 x 24,0	24,0	160	102	6,6	10,3	139	115	31,5	1.384	173,0	6,63	183	35,9	2,41	0,69	W 6 x 16
W 150 x 29,8 (H)	29,8	157	153	6,6	9,3	138	118	38,5	1.739	221,5	6,72	556	72,6	3,80	0,90	W 6 x 20
W 150 x 37,1 (H)	37,1	162	154	8,1	11,6	139	119	47,8	2.244	277,0	6,85	707	91,8	3,84	0,91	W 6 x 25
W 200 x 15,0	15,0	200	100	4,3	5,2	190	170	19,4	1.305	130,5	8,20	87	17,4	2,12	0,77	W 8 x 10
W 200 x 19,3	19,3	203	102	5,8	6,5	190	170	25,1	1.686	166,1	8,19	116	22,7	2,14	0,79	W 8 x 13
W 200 x 22,5	22,5	206	102	6,2	8,0	190	170	29,0	2.029	197,0	8,37	142	27,9	2,22	0,79	W 8 x 15
W 200 x 26,6	26,6	207	133	5,8	8,4	190	170	34,2	2.611	252,3	8,73	330	49,6	3,10	0,92	W 8 x 18

W 200 x 31,3	31,3	210	134	6,4	10,2	190	170	40,3	3.168	301,7	8,86	410	61,2	3,19	0,93	W 8 x21
W 200 x 35,9 (H)	35,9	201	165	6,2	10,2	181	161	45,7	3.437	342,0	8,67	764	92,6	4,09	1,03	W 8 x24
W 200 x 41,7 (H)	41,7	205	166	7,2	11,8	181	157	53,5	4.114	401,4	8,77	901	108,5	4,10	1,04	W 8 x28
W 200 x 46,1 (H)	46,1	203	203	7,2	11,0	181	161	58,6	4.543	447,6	8,81	1.535	151,2	5,12	1,19	W 8 x31
W 200 x 52,0 (H)	52,0	206	204	7,9	12,6	181	157	66,9	5.298	514,4	8,90	1.784	174,9	5,16	1,19	W 8 x35
HP 200 x 53,0 (H)	53,0	204	207	11,3	11,3	181	161	68,1	4.977	488,0	8,55	1.673	161,7	4,96	1,20	HP 8 x 36
W 200 x 59,0 (H)	59,0	210	205	9,1	14,2	182	158	76,0	6.140	584,8	8,99	2.041	199,1	5,18	1,20	W 8 x40
W 200 x 71,0 (H)	71,0	216	206	10,2	17,4	181	161	91,0	7.660	709,2	9,17	2.537	246,3	5,28	1,22	W 8 x48
W 200 x 86,0 (H)	86,0	222	209	13,0	20,6	181	157	110,9	9.498	855,7	9,26	3.139	300,4	5,32	1,23	W 8 x58
W 250 x 17,9	17,9	251	101	4,8	5,3	240	220	23,1	2.291	182,6	9,96	91	18,1	1,99	0,88	W 10 x 12
W 250 x 22,3	22,3	254	102	5,8	6,9	240	220	28,9	2.939	231,4	10,09	123	24,1	2,06	0,89	W 10 x 15
W 250 x 25,3	25,3	257	102	6,1	8,4	240	220	32,6	3.473	270,2	10,31	149	29,3	2,14	0,89	W 10 x 17
W 250 x 28,4	28,4	260	102	6,4	10,0	240	220	36,6	4.046	311,2	10,51	178	34,8	2,20	0,90	W 10 x 19
W 250 x 32,7	32,7	258	146	6,1	9,1	240	220	42,1	4.937	382,7	10,83	473	64,8	3,35	1,07	W 10 x 22
W 250 x 38,5	38,5	262	147	6,6	11,2	240	220	49,6	6.057	462,4	11,05	594	80,8	3,46	1,08	W 10 x 26
W 250 x 44,8	44,8	266	148	7,6	13,0	240	220	57,6	7.158	538,2	11,15	704	95,1	3,50	1,09	W 10 x 30
HP 250 x 62,0 (H)	62,0	246	256	10,5	10,7	225	201	79,6	8.728	709,6	10,47	2.995	234,0	6,13	1,47	HP 10 x 42
W 250 x 73,0 (H)	73,0	253	254	8,6	14,2	225	201	92,7	11.257	889,9	11,02	3.880	305,5	6,47	1,48	W 10 x 49
W 250 x 80,0 (H)	80,0	256	255	9,4	15,6	225	201	101,9	12.550	980,5	11,10	4.313	338,3	6,51	1,49	W 10 x 54
HP 250 x 85,0 (H)	85,0	254	260	14,4	14,4	225	201	108,5	12.280	966,9	10,64	4.225	325,0	6,24	1,50	HP 10 x 57
W 250 x 89,0 (H)	89,0	260	256	10,7	17,3	225	201	113,9	14.237	1.095,1	11,18	4.841	378,2	6,52	1,50	W 10 x 60
W 250 x101,0 (H)	101,0	264	257	11,9	19,6	225	201	128,7	16.352	1.238,8	11,27	5.549	431,8	6,57	1,51	W 10 x 68
W 250 x 115,0 (H)	115,0	269	259	13,5	22,1	225	201	146,1	18.920	1.406,7	11,38	6.405	494,6	6,62	1,53	W 10 x 77
W 310 x 21,0	21,0	303	101	5,1	5,7	292	272	27,2	3.776	249,2	11,77	98	19,5	1,90	0,98	W 12 x 14
W 310 x 23,8	23,8	305	101	5,6	6,7	292	272	30,7	4.346	285,0	11,89	116	22,9	1,94	0,99	W 12 x 16
W 310 x 28,3	28,3	309	102	6,0	8,9	291	271	36,5	5.500	356,0	12,28	158	31,0	2,08	1,00	W 12 x 19
W 310 x 32,7	32,7	313	102	6,6	10,8	291	271	42,1	6.570	419,8	12,49	192	37,6	2,13	1,00	W 12 x 22
W 310 x 38,7	38,7	310	165	5,8	9,7	291	271	49,7	8.581	553,6	13,14	727	88,1	3,82	1,25	W 12 x 26
W 310 x 44,5	44,5	313	166	6,6	11,2	291	271	57,2	9.997	638,8	13,22	855	103,0	3,87	1,26	W 12 x 30

W 310 x 52,0	52,0	317	167	7,6	13,2	291	271	67,0	11.909	751,4	13,33	1.026	122,9	3,91	1,27	W 12 x 35
HP 310 x 79,0 (H)	79,0	299	306	11,0	11,0	277	245	100,0	16.316	1.091,3	12,77	5.258	343,7	7,25	1,77	HP 12 x 53
HP 310 x 93,0 (H)	93,0	303	308	13,1	13,1	277	245	119,2	19.682	1.299,1	12,85	6.387	414,7	7,32	1,78	HP 12 x 63
W 310 x 97,0 (H)	97,0	308	305	9,9	15,4	277	245	123,6	22.284	1.447,0	13,43	7.286	477,8	7,68	1,79	W 12 x 65
W 310 x107,0 (H)	107,0	311	306	10,9	17,0	277	245	136,4	24.839	1.597,3	13,49	8.123	530,9	7,72	1,80	W 12 x 72
HP 310 x 110,0 (H)	110,0	308	310	15,4	15,5	277	245	141,0	23.703	1.539,1	12,97	7.707	497,3	7,39	1,80	HP 12 x 74
W 310 x 117,0 (H)	117,0	314	307	11,9	18,7	277	245	149,9	27.563	1.755,6	13,56	9.024	587,9	7,76	1,80	W 12 x 79
HP 310 x 125,0 (H)	125,0	312	312	17,4	17,4	277	245	159,0	27.076	1.735,6	13,05	8.823	565,6	7,45	1,81	HP 12 x 84
W 360 x 32,9	32,9	349	127	5,8	8,5	332	308	42,1	8.358	479,0	14,09	291	45,9	2,63	1,17	W 14 x 22
W 360 x 39,0	39,0	353	128	6,5	10,7	332	308	50,2	10.331	585,3	14,35	375	58,6	2,73	1,18	W 14x 26
W 360 x 44,6	44,6	352	171	6,9	9,8	332	308	57,7	12.258	696,5	14,58	818	95,7	3,77	1,35	W 14 x 30
W 360 x 51,0	51,0	355	171	7,2	11,6	332	308	64,8	14.222	801,2	14,81	968	113,3	3,87	1,36	W 14 x 34
W 360 x 58,0	58,0	358	172	7,9	13,1	332	308	72,5	16143	901,8	14,92	1113	129,4	3,92	1,37	W 14 x 38
W 360 x 64,0	64,0	347	203	7,7	13,5	320	288	81,7	17.890	1.031,1	14,80	1.885	185,7	4,80	1,46	W 14 x 43
W 360 x 72,0	72,0	350	204	8,6	15,1	320	288	91,3	20.169	1.152,5	14,86	2.140	209,8	4,84	1,47	W 14 x 48
W 360 x 79,0	79,0	354	205	9,4	16,8	320	288	101,2	22.713	1.283,2	14,98	2.416	235,7	4,89	1,48	W 14 x 53
W 360 x 91,0 (H)	91,0	353	254	9,5	16,4	320	288	115,9	26.755	1.515,9	15,19	4.483	353,0	6,22	1,68	W 14 x 61
W 360 x101,0 (H)	101,0	357	255	10,5	18,3	320	286	129,5	30.279	1.696,3	15,29	5.063	397,1	6,25	1,68	W 14 x 68
W 360 x 110,0 (H)	110,0	360	256	11,4	19,9	320	288	140,6	33.155	1.841,9	15,36	5.570	435,2	6,29	1,69	W 14 x 74
W 360 x122,0 (H)	122,0	363	257	13,0	21,7	320	288	155,3	36.599	2.016,5	15,35	6.147	478,4	6,29	1,70	W 14 x 82
W 410 x 38,8	38,8	399	140	6,4	8,8	381	357	50,3	12.777	640,5	15,94	404	57,7	2,83	1,32	W 16 x 26
W 410 x 46,1	46,1	403	140	7,0	11,2	381	357	59,2	15.690	778,7	16,27	514	73,4	2,95	1,33	W 16 x 31
W 410 x 53,0	53,0	403	177	7,5	10,9	381	357	68,4	18.734	929,7	16,55	1.009	114,0	3,84	1,48	W 16 x 36
W 410 x 60,0	60,0	407	178	7,7	12,8	381	357	76,2	21.707	1.066,7	16,88	1.205	135,4	3,98	1,49	W 16 x 40
W 410 x 67,0	67,0	410	179	8,8	14,4	381	357	86,3	24.678	1.203,8	16,91	1.379	154,1	4,00	1,50	W 16 x 45
W 410 x 75,0	75,0	413	180	9,7	16,0	381	357	95,8	27.616	1.337,3	16,98	1.559	173,2	4,03	1,51	W 16 x 50
W 410 x 85,0	85,0	417	181	10,9	18,2	381	357	108,6	31.658	1.518,4	17,07	1.804	199,3	4,08	1,52	W 16 x 57
W 460 x 52,0	52,0	450	152	7,6	10,8	428	404	66,6	21.370	949,8	17,91	634	83,5	3,09	1,47	W 18 x 35
W 460 x 60,0	60,0	455	153	8,0	13,3	428	404	76,2	25.652	1.127,6	18,35	796	104,1	3,23	1,49	W 18 x 40

W 460 x 68,0	68,0	459	154	9,1	15,4	428	404	87,6	29.851	1.300,7	18,46	941	122,2	3,28	1,50	W 18 x 46
W 460 x 74,0	74,0	457	190	9,0	14,5	428	404	94,9	33.415	1.462,4	18,77	1.661	174,8	4,18	1,64	W 18 x 50
W 460 x 82,0	82,0	460	191	9,9	16,0	428	404	104,7	37.157	1.615,5	18,84	1.862	195,0	4,22	1,64	W 18 x 55
W 460 x 89,0	89,0	463	192	10,5	17,7	428	404	114,1	41.105	1.775,6	18,98	2.093	218,0	4,28	1,65	W 18 x 60
W 460 x 97,0	97,0	466	193	11,4	19,0	428	404	123,4	44.658	1.916,7	19,03	2.283	236,6	4,30	1,66	W 18 x 65
W 460 x 106,0	106,0	469	194	12,6	20,6	428	404	135,1	48.978	2.088,6	19,04	2.515	259,3	4,32	1,67	W 18 x 71
W 530 x 66,0	66,0	525	165	8,9	11,4	502	478	83,6	34.971	1.332,2	20,46	857	103,9	3,20	1,67	W 21 x 44
W 530 x 72,0	72,0	524	207	9,0	10,9	502	478	91,6	39.969	1.525,5	20,89	1.615	156,0	4,20	1,84	W 21 x 48
W 530 x 74,0	74,0	529	166	9,7	13,6	502	478	95,1	40.969	1.548,9	20,76	1.041	125,5	3,31	1,68	W 21 x 50
W 530 x 82,0	82,0	528	209	9,5	13,3	501	477	104,5	47.569	1.801,8	21,34	2.028	194,1	4,41	1,85	W 21 x 55
W 530 x 85,0	85,0	535	166	10,3	16,5	502	478	107,7	48.453	1.811,3	21,21	1.263	152,2	3,42	1,69	W 21 x 57
W 530 x 92,0	92,0	533	209	10,2	15,6	502	478	117,6	55.157	2.069,7	21,65	2.379	227,6	4,50	1,86	W 21 x 62
W 530 x 101,0	101,0	537	210	10,9	17,4	502	470	130,0	62.198	2.316,5	21,87	2.693	256,5	4,55	1,86	W 21 x 68
W 530 x 109,0	109,0	539	211	11,6	18,8	501	469	139,7	67.226	2.494,5	21,94	2.952	279,8	4,60	1,87	W 21 x 73
W 610 x 101,0	101,0	603	228	10,5	14,9	573	541	130,3	77.003	2.554,0	24,31	2.951	258,8	4,76	2,07	W 24 x 68
W 610 x 113,0	113,0	608	228	11,2	17,3	573	541	145,3	88.196	2.901,2	24,64	3.426	300,5	4,86	2,08	W 24 x 76
W 610 x 125,0	125,0	612	229	11,9	19,6	573	541	160,1	99.184	3.241,3	24,89	3.933	343,5	4,96	2,09	W 24 x 84
W 610 x 140,0	140,0	617	230	13,1	22,2	573	541	179,3	112.619	3.650,5	25,06	4.515	392,6	5,02	2,10	W 24 x 94
W 610 x 155,0	155,0	611	324	12,7	19,0	573	541	198,1	129.583	4.241,7	25,58	10.783	665,6	7,38	2,47	W 24 x 104
W 610 x 174,0	174,0	616	325	14,0	21,6	573	541	222,8	147.754	4.797,2	25,75	12.374	761,5	7,45	2,48	W 24 x 117

Fonte: Adaptado de GERDAU