

**AMANDA SILVÉRIO PEREIRA**

**Estudo de comparação de modelos de elementos finitos de uma ponte rolante**

Guaratinguetá - SP

2022

**Amanda Silvério Pereira**

**Estudo de comparação de modelos de elementos finitos de uma ponte rolante**

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

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins

Coorientador: Dr. Willy Roger de Paula  
Mendonça

Guaratinguetá - SP

2022

Pereira, Amanda Silvério  
P436e      Estudo de comparação de modelos de elementos finitos de uma ponte rolante  
/ Amanda Silvério Pereira. – Guaratinguetá, 2022.  
56 f. : il.  
Bibliografia: f. 55-56

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual  
Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2024.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins  
Coorientador: Prof. Dr. Willy Roger de Paula Mendonça

1. Pontes. 2. Análise de elementos finitos. 3. Métodos de simulação. I. Título.

CDU 625.745.1

Luciana Máximo  
Bibliotecária CRB-8/3595

**AMANDA SILVÉRIO PEREIRA**

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

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

Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna  
Coordenador

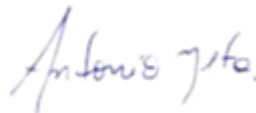
**BANCA EXAMINADORA:**



Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS  
Orientador/UNESP-FEG



Prof. Dr. EVERTON COELHO DE MEDEIROS  
UNESP-FEG



Prof. Me. ANTONIO DOS REIS FARIA NETO  
UNESP-FEG

## **DADOS CURRICULARES**

### **AMANDA SILVÉRIO PEREIRA**

**NASCIMENTO** 20.06.1997 – Cruzeiro/SP

**FILIAÇÃO** Rogério Silvério Pereira  
Filomena Dalva da Silva Pereira

**2016/2021** Formação acadêmica bacharelado em engenharia mecânica  
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - UNESP

Dedico este trabalho,  
de modo especial, à minha família

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos;

ao meu orientador, *Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins* que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível;

ao meu coorientador *Dr. Willy Roger de Paula Mendonça* que me auxiliou e acompanhou no desenvolvimento do estudo apresentado de uma maneira extremamente solícita e amigável;

aos meus pais *Rogério e Filomena* que sempre me incentivaram a estudar apesar das diversas adversidades vividas;

aos meus colegas de faculdade, em especial *Leandro Messias Pereira, João Marcos de Toledo Silva e Lucas de Sant'Anna Silva* por todo o auxílio e companheirismo ao longo do curso;

às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar;

aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campos de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento.

## RESUMO

Com o intuito de visualizar diferentes representações de modelos elementos finitos de uma ponte rolante calculada analiticamente com uso das normas NBR 8400 e NBR 8800, estudou-se três diferentes propostas de modelos virtuais. Primeiramente, foi apresentada uma revisão teórica do histórico de pontes rolantes, suas aplicações, seus componentes e os principais itens abordados nas normas aplicáveis. Foram elaborados três modelos virtuais de elementos finitos: em elementos de viga, em casca com carga distribuída e em casca com carga concentrada. Para a geração da malha dos modelos em casca, gerou-se um modelo em 3D da ponte rolante estudada. Analisando os resultados de tensão normal de flexão e deflexão máxima, comparou-se os diferentes modelos e suas particularidades. O modelo em vigas se apresentou o mais próximo do modelo analítico e os modelos em cascas, por serem mais representativos do modelo físico, apresentaram maiores divergências dos resultados analíticos. Os resultados foram interpretados, possibilitando o entendimento de especificidades de cada modelo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Elementos Finitos; Ponte Rolante; Simulação; Tensão; Deflexão.

## **ABSTRACT**

In order to visualize different presentations of finite elements models of an overhead crane analytically calculated using the NBR 8400 and NBR 8800 standards, three different proposals for virtual models were studied. First, a theoretical review of the history of overhead cranes, their applications, their components and the main items covered in the applicable standards was presented. Three virtual finite element models were built: in beam elements, in shell with distributed load and in shell with concentrated load. To generate the mesh of the shell models, a 3D model of the crane studied was generated. Analyzing the results of normal bending stress and maximum deflection, the different models and their particularities were compared. The beam model was the closest to the analytical model and the shell models, as they are more representative of the physical model, presented greater divergences from the analytical results. The results were interpreted, making it possible to understand the specifics of each model.

**KEYWORDS:** Finite Elements; Overhead Crane; Simulation; Stress; Deflection.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ponte rolante utilizada na Usina Hidrelétrica de Belo Monte.....	15
Figura 2 - Ponte Rolante Univiga Apoiada .....	18
Figura 3 - Ponte Rolante Univiga Suspensa .....	19
Figura 4 - Ponte Rolante Univiga.....	19
Figura 5 - Ponte Rolante Dupla Viga .....	20
Figura 6 - Principais Componentes de uma Ponte Rolante Dupla Viga.....	21
Figura 7 - Ponte Rolante para Fundação .....	21
Figura 8 - Ponte Rolante com Aplicação em Indústria Siderúrgica .....	22
Figura 9 - Ponte Rolante utilizada no manuseio de rolos de papel.....	23
Figura 10 - Exemplo de utilização de ponte rolante na indústria aeronáutica.....	23
Figura 11 - Pórticos utilizados na Usina de Itaipu.....	24
Figura 12 - Interface do Software Solidworks em um aplicação industrial .....	26
Figura 13 - Interface do software HyperWorks.....	27
Figura 14 - Método das Seções aplicado a uma treliça .....	28
Figura 15 - Barra submetida a tensão normal.....	29
Figura 16 - Aplicação de forças transversais.....	30
Figura 17 - Modelo 3D da ponte rolante .....	35
Figura 18 - Fluxograma de dimensionamento de ponte rolante .....	36
Figura 19 - Diagrama de corpo livre do carro ponte .....	38
Figura 20 - Diagrama de Corpo Livre com carro ponte na máxima aproximação.....	39
Figura 21 - Características do carregamento no rebaixo da viga .....	40
Figura 22 - Diagrama de Corpo Livre na posição de máximo momento .....	40
Figura 23 - Seção transversal da viga tipo "caixão" .....	41
Figura 24 - Gráfico de Tensores .....	44
Figura 25 - Modelo 1D em vigas para máxima aproximação .....	45
Figura 26 – Modelo em elementos 1D em vigas para máximo momento.....	45
Figura 27 - Modelo em elementos de casca (2D) com carregamento distribuído para máxima aproximação.....	46
Figura 28 - Modelo em elementos de casca (2D) com carregamento distribuído para máximo momento .....	46
Figura 29 - Modelo em elementos de casca (2D) com carregamento concentrado para máxima aproximação.....	47

Figura 30 - Modelo em elementos de casca (2D) com carregamento concentrado para máximo momento .....	47
--	----

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\vec{F}$	Força vetorial
$m$	Massa do sistema
$\vec{a}$	Aceleração vetorial
$\vec{M}_G$	Momento vetorial em relação ao centro de gravidade
$\vec{H}_G$	Derivada temporal da quantidade de movimento angular
$P$	Força normal interna resultante
$A$	Área seção transversal
$S_G$	Solicitações estáticas devido ao peso próprio
$S_L$	Solicitações devidas à carga de serviço
$\psi$	Coefficiente dinâmico
$S_H$	Efeitos horizontais mais desfavoráveis
$M_X$	Coefficiente de majoração
$P_C$	Carga nominal
$P_m$	Peso do moitão
$P_{cb}$	Peso do cabo de aço
$P_{cr}$	Peso do carro
$P_{est}$	Peso da estrutura
$L$	Vão da ponte
$v_L$	Velocidade de levantamento
$ac$	Aceleração do equipamento
$N_{rp}$	Número de rodas da ponte rolante
$y$	Posição de máxima aproximação
$P_1$	Reação na roda do carro
$P_2$	Reação na roda do carro
$a$	Distância entre rodas do carro
$P_{1c}$	Carga por roda do carro sobre a viga devido carga nominal, moitão e cabo de aço
$P_{2c}$	Carga por roda do carro sobre a viga devido carga nominal, moitão e cabo de aço
$P_{1cr}$	Carga por roda do carro sobre a viga devido ao peso do carro
$P_{2cr}$	Carga por roda do carro sobre a viga devido ao peso do carro
$Ra_{x1}$	Reação vertical no apoio A do carro na posição de máxima aproximação
$M_{x1}$	Momento fletor na seção de máxima aproximação

$x_1$	Distância entre a reação vertical no apoio e o início do rebaixo
$x$	Posição de máximo momento
$R_{a_x}$	Reação vertical no apoio A do carro na posição de máximo momento
$M_x$	Momento fletor na seção de máximo momento
$\tau_{máx}$	Tensão de cisalhamento máxima
$V_{máx}$	Força cortante máxima
$Q$	Momento estático da seção transversal em relação à linha neutra
$I$	Momento de inércia da viga em relação ao eixo do giro devido a flexão
$t$	Largura da área da seção transversal inteira
$\sigma_{máx}$	Tensão normal de flexão máxima
$M_{máx}$	Momento fletor máximo
$c$	Posição do ponto em relação à linha neutra da seção transversal
$f_{adm}$	Flecha máxima admissível
$f_{p1}$	Flecha devido a carga da roda esquerda do carro
$f_{p2}$	Flecha devido a carga da roda direita do carro
$E$	Módulo de elasticidade do material
$I_x$	Momento de inércia da viga em reação ao eixo x
$f_q$	Flecha devido peso próprio da viga
$f_{tot}$	Flecha total

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
1.1.	OBJETIVO	16
<b>2.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>17</b>
2.1.	O USO DE PONTES ROLANTES	17
2.2.	TIPOS DE PONTES ROLANTES NO MERCADO	17
2.2.1.	Classificação de pontes rolantes	17
2.2.2.	Tipos de ponte rolante em relação a viga	18
2.2.3.	Componentes da ponte rolante	20
2.3.	APLICAÇÃO DE PONTE ROLANTES	21
2.3.1.	Pontes rolantes com aplicação em siderúrgicas	21
2.3.2.	Pontes rolantes com aplicação na indústria do papel	22
2.3.3.	Pontes rolantes com aplicação na indústria de aviação	23
2.3.4.	Pontes rolantes com aplicação em hidrelétricas	24
2.4.	NORMAS APLICÁVEIS	24
2.5.	SOFTWARES UTILIZADOS	26
2.5.1.	Solidworks	26
2.5.2.	Hyperworks	26
2.6.	EQUILÍBRIO ESTÁTICO E TENSÕES	27
2.6.1.	Carregamento estático	27
2.6.2.	Conceito e tipos de tensão	28
2.7.	MÉTODO DE CÁLCULO SEGUNDO NBR 8400 e NBR 8800	30
2.7.1.	Características da ponte rolante	30
2.7.2.	Classificação da estrutura	30
2.7.3.	Solicitações atuantes na estrutura	31
2.7.3.1.	<i>Solicitações estáticas</i>	32
2.7.3.2.	<i>Solicitações devido aos movimentos verticais</i>	32
2.7.3.3.	<i>Solicitações devido aos movimentos horizontais</i>	33
2.7.3.4.	<i>Solicitações por efeitos climáticos e solicitações diversas</i>	33
2.7.3.5.	<i>Flecha máxima admissível</i>	34
<b>3.</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>35</b>
3.1.	MATERIAIS	35
3.2.	MÉTODOS	35
3.2.1.	Método Analítico	35
3.2.1.1.	<i>Características da ponte rolante</i>	37
3.2.1.2.	<i>Classificação da ponte rolante segundo a NBR 8400</i>	37

3.2.1.3.	<i>Diagramas de Corpo Livre e Momento Fletor</i>	38
3.2.1.4.	<i>Solicitações</i>	41
3.2.1.5.	<i>Seção Transversal</i>	41
3.2.1.6.	<i>Cálculo de Tensões</i>	42
3.2.1.7.	<i>Deflexão Máxima</i>	43
3.2.2.	Método Numérico	43
3.2.2.1.	<i>Tensões Normais de Flexão</i>	43
3.2.2.2.	<i>Modelos Virtuais de Elementos Finitos</i>	44
3.2.2.2.1.	<i>Modelo em vigas</i>	44
3.2.2.2.2.	<i>Modelo em casca com carregamento distribuído</i>	45
3.2.2.2.3.	<i>Em casca com carregamento concentrado</i>	46
4.	<b>RESULTADOS</b>	48
4.1.	Tensões normais de flexão	48
4.2.	Deflexão Máxima	51
5.	<b>DISCUSSÃO</b>	53
6.	<b>CONCLUSÃO</b>	55
	<b>REFERÊNCIAS</b>	56

## 1. INTRODUÇÃO

No presente trabalho, foi apresentada metodologia de cálculo para projeto de ponte rolante para uma usina hidrelétrica e a análise numérica estática de modelos virtuais em elementos finitos com diferentes condições de carregamento e condições de contorno. Para o seu dimensionamento analítico, foi necessário o conhecimento das normas requeridas. As normas utilizadas foram a NBR 8400, sobre equipamentos de elevação e movimentação de carga, e a NBR 8800, trata de projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Aquela dispõe de conceitos e cálculos que devem constar na documentação memorial de cálculo do equipamento.

Para o entendimento das normas e as aplicações das pontes rolantes, é imprescindível o entendimento da base dos conhecimentos utilizados. Para isso, realizou-se revisão de literatura. Além disso, é apresentado os tipos de ponte rolante, aplicações e suas especificações.

O estudo de caso foi fornecido pela empresa Alstom para a aplicação na movimentação de carga nominal de 1500 kN. Dadas as características e as condições de trabalho da ponte dimensionada, os dados de tensão normal de flexão ao longo da estrutura foram utilizados para a comparação dos diferentes modelos virtuais gerados.

Com o intuito de gerar o modelo virtual 3D da ponte rolante dimensionada analiticamente através das normas pertinentes, fez-se a modelagem dos elementos estruturais que compõem a estrutura e a sua montagem no software *SolidWorks*. Então, realizou-se a análise numérica estática em elementos finitos da estrutura em três modelos virtuais: em barras, casca com carregamento distribuído e casca com carregamento diretamente no trilho. A Figura 1 apresenta um exemplo de ponte rolante com aplicação em hidrelétrica.

Figura 1 – Ponte rolante utilizada na Usina Hidrelétrica Sinop



Fonte: GC Notícias (2017)

## 1.1. OBJETIVO

Uma das atribuições do engenheiro mecânico é o projeto e especificação de instalações mecânicas. Portanto, é necessário entendimento das etapas necessárias para sua elaboração. Sendo o trabalho de graduação uma excelente oportunidade para visualizar a aplicação prática de diversas disciplinas ministradas na graduação em um projeto de engenharia, o tema deste possibilitará a solidificação de conhecimentos como resistência dos materiais, métodos numéricos e desenho técnico mecânico, por exemplo.

O presente trabalho tem como objetivo comparar diferentes modelos virtuais de elementos finitos de uma ponte rolante projetada analiticamente através das normas NBR 8400 e 8800. Onde pretende-se realizar o estudo de caso junto de um memorial de cálculo. Utilizando-se, também, de uma abordagem numérica a partir de softwares de elementos finitos para diferentes modelos virtuais. Sendo feita a comparação entre resultados de tensão e deflexão.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. O USO DE PONTES ROLANTES

Segundo Mazzela (2017), as pontes rolantes podem ser projetadas em diversos tipos de configurações e seus diferentes componentes são projetados e alterados para melhorar o desempenho e a capacidade destas. Dada a versatilidade em seu manuseio e seus diferentes tipos de aplicações, seu uso se tornou amplamente difundido em diversos setores industriais.

Na produção industrial, a introdução de pontes rolantes na movimentação de materiais, por exemplo, pode levar a melhoria da segurança do trabalho, redução do estoque em processo, redução do tempo de trabalho, redução de área fabril e melhoria no layout (Langui, 2001). A alteração desses fatores eleva a produtividade da empresa, tornando-se um investimento atrativo e necessário para a indústria.

### 2.2. TIPOS DE PONTES ROLANTES NO MERCADO

#### 2.2.1. Classificação de pontes rolantes

Segundo Greiner (1967) e Mazzela (2017), as pontes rolantes podem ser classificadas em seis categorias segundo velocidade de manuseio e aplicação:

- Classe A (*Standby Service*): manuseada em baixas velocidades com longos períodos ociosos entre elevações de carga. Os movimentos devem permitir a variação da velocidade para garantir velocidade baixa, de forma a garantir um manuseio preciso. Suas aplicações incluem sala de bombas, sala de turbinas, casas de força e utilidades públicas.
- Classe B (*Light Service*): utilizada onde os requerimentos de serviço são leves e a velocidade é baixa. Com capacidade 5 a 10 elevações por hora, podem estar ociosas por longos períodos e em outros momentos, podem ser usadas uma operação constante. Para seu uso, pode-se citar oficinas de reparações, operações leves de montagem e armazenamento leve.
- Classe C (*Moderate Service*): aplicada onde as exigências da operação são moderadas. Com cargas de 50% ou menos da capacidade nominal. Além disso, possuem capacidade de 5 a 15 elevações por hora e velocidades médias. Em suas aplicações, constam oficina de máquinas, setores de montagem e fundições.

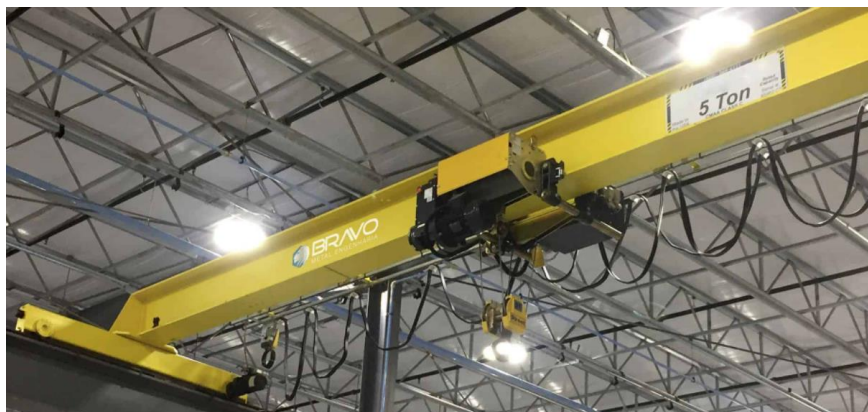
- Classe D (*Heavy Duty Service*): utilizada em aplicações em que altas velocidades são desejadas com uma capacidade de 10 a 20 elevações. No que diz respeito ao seu uso, são utilizadas em oficina de máquinas pesadas, fundições, fábricas de estruturas metálicas pesadas e armazenamento de aço.
- Classe E (*Severe Duty Cycle Service*): empregadas onde deve-se ter alta velocidade com repetições durante todo o período, exigindo alta durabilidade de seus componentes. As aplicações incluem caçambas, eletroímãs e combinações de eletroímã e caçambas.
- Classe F (*Steel Mill*): onde exige-se capacidade de manuseio contínuo de cargas próximo da carga nominal sob condições severas de operação. São projetadas para desenvolver tarefas que afetam a produção total. Portanto, devem fornecer alta confiabilidade. De aplicação em siderúrgicas, estas são abrangidas pela *Association of Iron and Steel Engineers (AISE)*.

### 2.2.2. Tipos de ponte rolante em relação a viga

Segundo Sordi (2016), podemos dividir as pontes rolantes em apoiada ou suspensa e univiga ou dupla viga.

O deslocamento da ponte rolante apoiada se dá por cima de trilhos no caminho de rolamento. Onde estes são sustentados pelas colunas ou viga dos prédios. A Figura 2 apresenta um exemplo desse tipo de ponte rolante.

Figura 2 - Ponte Rolante Univiga Apoiada



Fonte: Omega Cranes (2017)

Já em uma ponte suspensa, a viga principal se desloca por baixo do caminho de rolamento. Utilizada em locais onde a altura do pé direito é reduzida. Um exemplo de ponte rolante suspensa é mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Ponte Rolante Univiga Suspensa



Fonte: Beta Educação (2021)

Em relação a quantidade de vigas utilizada, a ponte rolante univiga possui uma única viga, conforme Figura 4.

Figura 4 - Ponte Rolante Univiga



Fonte: Bravo Metal Engenharia (2017)

Em uma ponte rolante dupla viga, existem duas vigas. Possuem uma capacidade de carregamento maior, uma vez que o carregamento será distribuído entre as vigas. No que diz respeito a sua capacidade de carga, pode chegar até 300 toneladas (SORDI, 2016). A Figura 5 demonstra a configuração de uma ponte rolante dupla viga.

Figura 5 - Ponte Rolante Dupla Viga



Fonte: ltm Consultoria (2021)

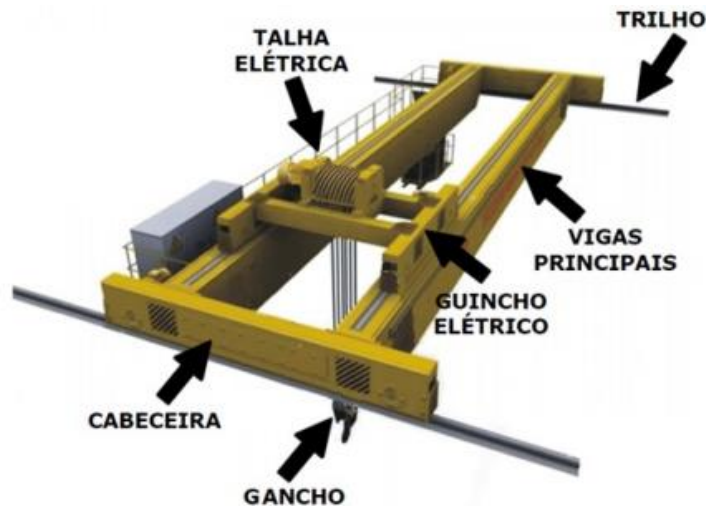
### 2.2.3. Componentes da ponte rolante

Os componentes de uma ponte rolante são, segundo Sordi (2016):

- Viga: a ponte rolante pode ter uma ou duas vigas e é onde se realiza o movimento de translação do carro ponte;
- Cabeceiras: estas estão localizadas nas extremidades das vigas, onde são fixadas as rodas para o movimento de translação;
- Carro ponte/guincho ou Talha: este executa o movimento vertical e transversal da carga;
- *Trolley*: quando a talha é montada sob a viga, a necessidade de carro ponte é descartada e quem conduz a movimentação transversal da carga é o *trolley*.

A Figura 6 mostra os principais componentes de uma ponte rolante.

Figura 6 - Principais Componentes de uma Ponte Rolante Dupla Viga



Fonte: Shcardong (2018)

### 2.3. APLICAÇÃO DE PONTE ROLANTES

#### 2.3.1. Pontes rolantes com aplicação em siderúrgicas

A aplicação de pontes rolantes em siderúrgicas exige boa performance em ambientes com condições difíceis. A empresa fabricante DEMAG cita como aplicações na indústria siderúrgica o uso de pontes para transportar rolos de oficinas de lapidação de rolos, em instalações de recozimento e decapagem e no armazém de expedição, magnéticas para transportar bilhetes, de carga e para junção do material de fundição e finalmente, pontes rolantes de oficina. A Figura 7 mostra uma aplicação de ponte rolante para fundição.

Figura 7 - Ponte Rolante para Fundição



Fonte: KuangShan [s. d.]

Em relação as especificações a empresa fabricante Ferro cita que suas pontes rolantes para aplicações siderúrgicas sempre serão controladas de maneira motorizada, semi automática ou completamente automática, com opção de carro guincho ou carro guincho giratório e sempre são de viga dupla. A Figura 8 mostra uma aplicação para indústria siderúrgica.

Figura 8 - Ponte Rolante com Aplicação em Indústria Siderúrgica



Fonte: Ferro [s. d]

### **2.3.2. Pontes rolantes com aplicação na indústria do papel**

Na indústria do papel, os rolos de papel têm de ser armazenados e desarmazenados de forma a não danificar o material, ou seja, é requerido precisão e eficácia. A fabricante DEMAG cita entre as pontes rolantes fornecidas para esse setor a para máquinas de papel, cortadores de rolos e pontes rolantes de processo automatizadas para armazéns de rolos de papel. A Figura 9 apresenta a utilização de ponte rolante na indústria de papel.

Figura 9 - Ponte Rolante utilizada no manuseio de rolos de papel



Fonte: Konecranes [s. d.]

### 2.3.3. Pontes rolantes com aplicação na indústria de aviação

Na indústria de aviação, as pontes rolantes utilizadas devem ter produtividade elevada e com adaptações necessárias para os requisitos exigidos na operação. Segundo a empresa fabricante DEMAG, nesta indústria, subcomponentes de grande dimensão são elevados, virados e posicionados. Dentre os produtos fornecidos nessa aplicação, a empresa Demag cita pontes rolantes suspensas com pontos múltiplos de suspensão para abranger grandes amplitudes de galpão, com sistemas de bloqueio para transferências de carrinho e pontes rolantes com carros giratórios para um aproveitamento ideal da área. A Figura 10 mostra um exemplo de utilização na indústria aeronáutica.

Figura 10 - Exemplo de utilização de ponte rolante na indústria aeronáutica



Fonte: Demag [s. d.]

### 2.3.4. Pontes rolantes com aplicação em hidrelétricas

Em usinas hidrelétricas, as pontes rolantes utilizadas devem ter controles precisas e serem capazes de suportar altas cargas de alto valor. No catálogo Konecrane (2016) para equipamentos na indústria de energia, entre as aplicações possíveis citadas para pontes rolantes em usinas hidrelétricas, estão:

- Pórticos para comportas: elevação de comportas e manutenção para equipamentos de barragem.
- Pórticos rolantes para transporte de turbina: utilizado para a montagem da turbina e outros equipamentos da casa de máquinas.
- Talhas de manutenção

A Figura 11 mostra a utilização de pórticos na Usina de Itaipu

Figura 11 - Pórticos utilizados na Usina de Itaipu



Fonte: Itaipu (2019)

## 2.4. NORMAS APLICÁVEIS

No projeto de pontes rolantes, utiliza-se normas padronizadas para seu desenvolvimento. No Brasil, a NBR 8400:1984, sob o título Cálculo de equipamentos para elevação e movimentação de cargas, estabelece as combinações de solicitações a serem consideradas e a NBR 8800:2008, sob o título Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios, define os requisitos básicos que devem ser obedecidos no projeto de estruturas de aço.

A NBR 8400:1984 dispõe sobre as classes de utilização do equipamento, segundo a Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação de Utilização do Equipamento

<b>Classe de Utilização</b>	<b>Frequência de utilização do movimento de levantamento</b>	<b>Número Convencional de ciclos de levantamento</b>
A	Utilização ocasional não regular, seguida de longos períodos de repouso	$6,3 \times 10^4$
B	Utilização regular em serviço intermitente	$2,0 \times 10^5$
C	Utilização regular em serviço intensivo	$6,3 \times 10^5$
D	Utilização em serviço intensivo severo, efetuado, por exemplo, em mais de um turno	$2,0 \times 10^6$

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 8400 (1984)

Além disso, classifica, Tabela 2, segundo o estado de carga, este caracteriza qual a proporção de carga máxima que o equipamento irá elevar ao longo de sua vida útil (NBR 8400, 1984).

Tabela 2 - Estado de tensão de um elemento

<b>Estado de tensões</b>	<b>Definição</b>	<b>Fração mínima de tensão máxima</b>
0 (muito leve)	Elemento submetido excepcionalmente à sua tensão máxima e comumente a tensões muito reduzidas	$P = 0$
1 (leve)	Elemento submetido raramente à sua tensão máxima, mas comumente a tensões da ordem de 1/3 da tensão máxima	$P = 1/3$
2 (médio)	Elemento frequentemente submetido à sua tensão máxima e comumente a tensões compreendidas entre 1/3 a 2/3 da tensão máxima	$P = 2/3$
3 (pesado)	Elemento regularmente submetido à sua tensão máxima	$P = 1$

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 8400 (1984)

Segundo Neto (2018), a NBR 8400 é semelhante às normas internacionais reconhecidas, como a *Crane Manufactures Association of America* (CMAA) e a francesa *Fédération Européenne de La Manutention* (FEM).

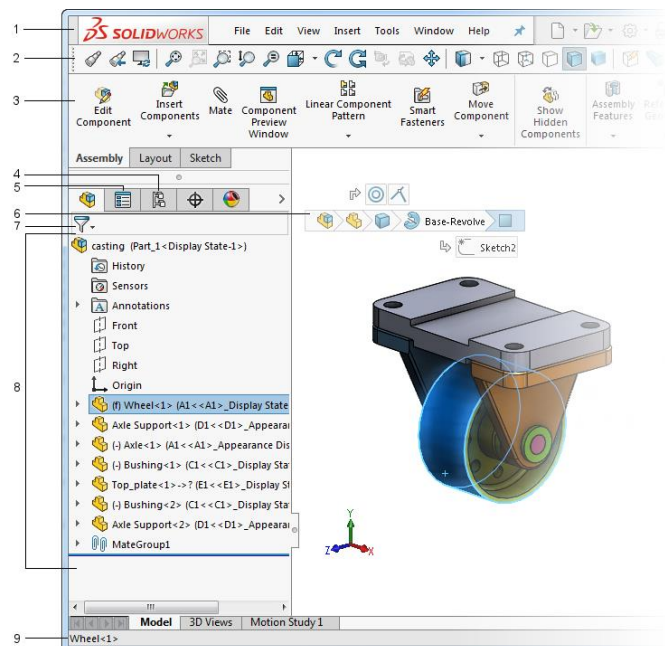
## 2.5. SOFTWARES UTILIZADOS

### 2.5.1. *Solidworks*

O software CAD *Solidworks* é uma aplicação automatizada de projetos mecânicos. Este possibilita que projetistas esbocem rapidamente suas ideias. A sua abordagem é o design 3D (DASSAULT SYSTÈMES, 2015).

Segundo a *Dassault Systèmes*, empresa fornecedora do software, o *Solidworks* tem aplicações em indústrias como aeroespacial e defesa, automotivo, eletrônicos, construção, energia e materiais, marinha e *offshore*, transporte e mobilidade, saúde e projeto de equipamento industrial. A Figura 12 mostra a interface do software.

Figura 12 - Interface do Software *Solidworks*



Fonte: *Solidworks* (2018)

### 2.5.2. *Hyperworks*

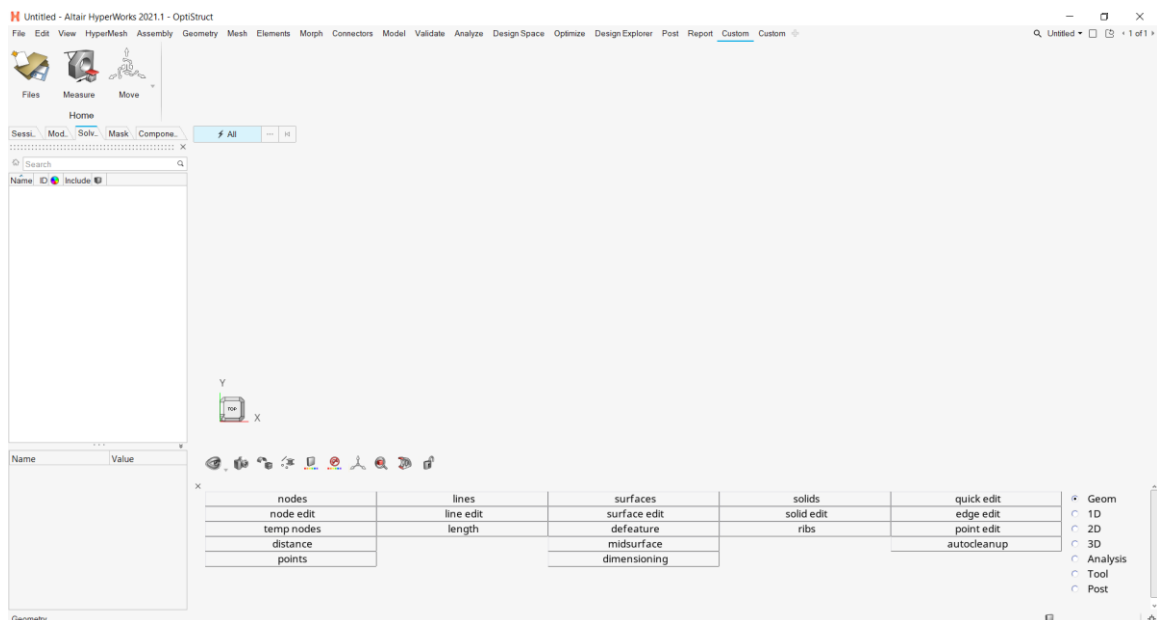
O software *HyperWorks* é uma plataforma multifísica de CAE (Computer Aided Engineering). As ferramentas CAE podem utilizar diferentes métodos de análise. As mais utilizadas são a Análise por Elementos Finitos (FEA) e Fluidodinâmica Computacional (CFD).

Há 60 anos, a Análise de Elementos Finitos foi desenvolvida como um método capaz de prever a reação de partes complexas, impossível de serem analisadas analiticamente, a vários

tipos de entrada. Atualmente, esse método é insubstituível em indústrias como a automotiva, aeroespacial, defesa, saúde e óleo e gás (PONGINAN, 2015). Esta análise é realizada em três etapas: pré-processamento, processamento e pós-processamento

O pré-processamento consiste em preparar o modelo para análise: alterações na geometria, geração de malha e entrada de forças e restrições. Essa etapa é realizada pelo *HyperMesh* na plataforma mencionada. O processamento é realizado por um software desenvolvido para fazer uma Análise de Elementos Finitos. Essa etapa é realizada pelo *OptiStruct*. Finalmente, o pós-processamento é realizado onde os resultados obtidos pela etapa de processamento podem ser revisados e analisados. Essa etapa é realizada pelo *HyperView*. A Figura 13 mostra mais detalhes da interface do software.

Figura 13 - Interface do software *HyperWorks*



Fonte: Autor (2022)

## 2.6. EQUILÍBRIO ESTÁTICO E TENSÕES

### 2.6.1. Carregamento estático

Um componente pode estar sujeito a diversas forças externas e internas. Da segunda lei de Newton, tem-se as equações 1 e 2 (NORTON, 2013).

$$\sum \vec{F} = m\vec{a} \quad (1)$$

$$\sum \vec{M}_G = \dot{H}_G \quad (2)$$

Sendo que  $\vec{F}$  é força vetorial atuante,  $m$  é a massa do sistema,  $\vec{a}$  é aceleração vetorial do sistema. E  $\vec{M}_G$  é momento vetorial em relação ao centro de gravidade e  $\vec{H}_G$  é a derivada temporal da quantidade de movimento angular.

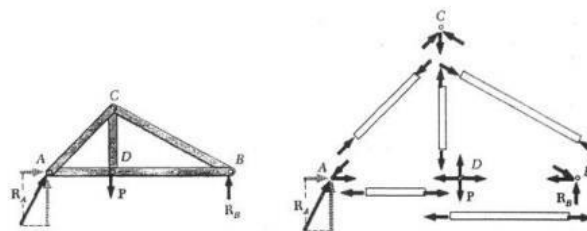
Uma análise de carregamento estático considera que as acelerações do sistema são nulas. Logo, o sistema se encontra em equilíbrio. Em equilíbrio de forças, impedindo translação ou movimento acelerado do sistema e em equilíbrio de momentos, impedindo a rotação do sistema. Portanto, as equações 1 e 2, em um carregamento estático, se reduzem as equações 3 e 4 (HIBBELER, 2010).

$$\sum \vec{F} = 0 \quad (3)$$

$$\sum \vec{M}_G = 0 \quad (4)$$

Quando submetido a cargas externas, surgem, dentro do componente, forças internas (resultantes). Estas são necessárias para manter a integridade do corpo. Para obter as cargas internas, é necessário utilizar o método das seções. O método consiste em fazer uma seção na área que deseja ser estudada e realizar o diagrama de corpo livre do componente, conforme demonstra a Figura 14, onde uma treliça foi seccionada (HIBBELER, 2010).

Figura 14 - Método das Seções aplicado a uma treliça

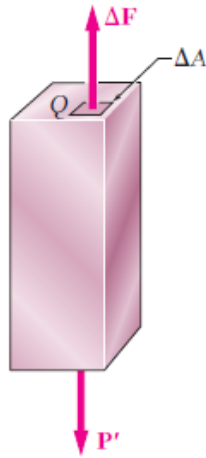


Fonte: Beer (2006)

### 2.6.2. Conceito e tipos de tensão

A tensão descreve a intensidade da força interna sobre um plano específico que passa por um ponto. A intensidade da força que age perpendicularmente (força normal) à área de aplicação é conhecida como tensão normal. A Figura 15 ilustra um exemplo onde a tensão normal está presente.

Figura 15 - Barra submetida a tensão normal



Fonte: BEER (2011)

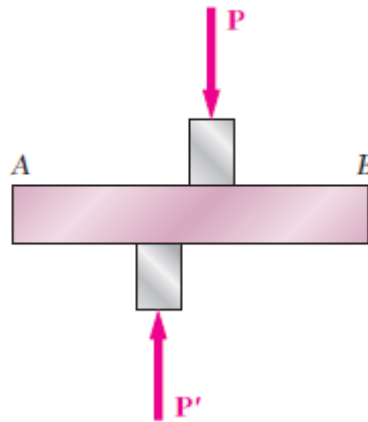
Considerando que a barra é submetida a uma deformação uniforme e constante, a tensão normal será constante e pode ser obtida pela equação 5 (HIBBELER, 2010).

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (5)$$

Onde  $\sigma$  é a tensão normal média em qualquer ponto na área da seção transversal,  $P$  é força normal interna resultante aplicada no centroide da área da seção transversal  $A$ .

Se forças são transversais, como na Figura 16, temos a tensão de cisalhamento. Esta consiste na intensidade da força que age tangente a uma área. E a força interna resultante, obtida pelo método das seções, é chamada de força cortante (BEER, 2011).

Figura 16 - Aplicação de forças transversais



Fonte: BEER (2011)

A tensão média de cisalhamento na seção é calculada pela equação 6 (BEER, 2011).

$$\tau_{méd} = \frac{P}{A} \quad (6)$$

## 2.7. MÉTODO DE CÁLCULO SEGUNDO NBR 8400 e NBR 8800

Para o dimensionamento da viga de ponte rolante, é necessário seguir os passos estabelecidos pela NBR 8400 e critérios da NBR 8800 que são detalhados nas seções seguintes.

### 2.7.1. Características da ponte rolante

Algumas características da ponte rolante a ser dimensionada são limitadas e estabelecidas pelo local de instalação e demanda de serviço. Então, antes de iniciar o dimensionamento, é necessário estabelecer informações como: carga nominal, peso de componentes, peso da estrutura, vão da ponte, aceleração do equipamento e etc (NBR 8400, 1984).

### 2.7.2. Classificação da estrutura

De forma a realizar os cálculos de dimensionamento da ponte rolante estabelecidos pela NBR 8400:1984, deve-se classificar a estrutura. Para isso, seleciona-se sua classe de utilização e seu estado de carga. Então, o grupo da ponte rolante é determinado.

Tendo selecionado a classe de utilização conforme a Tabela 1 e o estado de carga de acordo com a Tabela 2, define-se o grupo da classificação de utilização da estrutura. Isso é feito através da Tabela 3.

Tabela 3 - Classificação da estrutura dos equipamentos (ou elementos da estrutura) em grupos

Estado de cargas (ou estado de tensões para um elemento)	Classe de utilização e número convencional de ciclos de levantamento (ou de tensões para um elemento)			
	A $6,3 \times 10^4$	B $2,0 \times 10^5$	C $6,3 \times 10^5$	D $2,0 \times 10^6$
0 (muito leve) P=0	1	2	3	4
1 (leve) P = 1/3	2	3	4	5
2 (médio) P = 2/3	3	4	5	6
3 (pesado) P=1	4	5	6	6

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 8400 (1984)

### 2.7.3. Solicitações atuantes na estrutura

A NBR 8400:1984 estabelece que para o cálculo da estrutura, é necessário determinar as tensões atuantes durante o funcionamento desta. As seguintes solicitações são utilizadas como base das tensões.

- Solicitações principais exercidas sobre a estrutura do equipamento suposto imóvel, no estado de carga mais desfavorável;
- Solicitações devidas aos movimentos verticais;
- Solicitações devidas aos movimentos horizontais;
- Solicitações devidas aos efeitos climáticos;
- Solicitações diversas.

Ainda segundo norma NBR 8400:1984, há três casos de solicitações

- Caso I: Equipamento em serviço normal sem vento;
- Caso II: Equipamento em serviço normal com vento limite de serviço;
- Caso III: Equipamento submetido a solicitações excepcionais.

De acordo com a NBR 8400, no caso mais simples, caso I, considera-se as solicitações estáticas devido ao peso próprio  $S_G$ , as solicitações devidas à carga de serviço  $S_L$  multiplicadas pelo coeficiente dinâmico  $\psi$ , e os efeitos horizontais mais desfavoráveis  $S_H$  com exclusão dos

efeitos do choque. Então, multiplica-se esse conjunto de solicitações pelo coeficiente de majoração  $M_x$ . Este depende do grupo no qual está classificado o equipamento, conforme Tabela 4.

Tabela 4 - Coeficiente de majoração

Grupos	1	2	3	4	5	6
$M_x$	1	1	1	1,06	1,12	1,20

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 8400 (1984)

O grupo da estrutura define a tensão admissível à tração (ou compressão) simples, conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Tensão Admissível

Casos de solicitação	Caso I	Caso II	Caso III
Tensão Admissível $\sigma_a$	$\frac{\sigma_e}{1,5}$	$\frac{\sigma_e}{1,33}$	$\frac{\sigma_e}{1,1}$

Fonte: NBR Adaptado de ABNT NBR 8400 (1984)

### 2.7.3.1. Solicitações estáticas

As solicitações estáticas significativas são:

- Devidas aos pesos próprios dos elementos,  $S_G$ ;
- Devidas à carga de serviço,  $S_L$ .

A NBR 8400 estabelece que o cálculo deve ser feito com os elementos móveis nas posições mais desfavoráveis, ou seja, onde as tensões exercidas sobre os elementos são máximas. De acordo com Hiebler (2010), as vigas desenvolvem uma força de cisalhamento interna e um momento fletor. Estes variam ao longo do eixo da viga. Portanto, para considerar as situações mais desfavoráveis, determina-se a força cortante máxima e o momento fletor máximo que agem na viga. A força cortante máxima ocorre na posição mais próxima possível do apoio, máxima aproximação. Essa aproximação é delimitada pela configuração espacial do carro ponte.

Logo, o cálculo é feito para onde há o máximo momento fletor e onde há a máxima força cortante (máxima aproximação).

### 2.7.3.2. Solicitações devido aos movimentos verticais

Originadas do içamento brusco da carga de serviço e de choques verticais devido ao movimento sobre o caminho de rolamento, as solicitações verticais são calculadas a partir da

multiplicação das solicitações devida à carga de serviço pelo coeficiente dinâmico ( $\psi$ ). A seleção do coeficiente é feita através da Tabela 6.

Tabela 6 - Coeficiente Dinâmico

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

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 8400 (1984)

### 2.7.3.3. Solicitações devido aos movimentos horizontais

Segundo a NBR 8400, as solicitações por movimentos horizontais são:

- Os efeitos da inércia devido a aceleração e desacelerações proveniente ao movimento de translação e levantamento da carga;
- As reações horizontais transversais provocadas pela translação direta;
- Os efeitos de choque.

O cálculo das forças horizontais resultantes como efeito da inércia devido a aceleração e desaceleração é baseado no movimento do carro e do movimento da ponte rolante. Segundo Schardong (2018), atualmente, os equipamentos modernos possuem controles de acelerações. Isso permite que o movimento seja suavizado. Portanto, nesses casos, podem ser desconsiderados os efeitos de aceleração e desaceleração e os efeitos de choque.

### 2.7.3.4. Solicitações por efeitos climáticos e solicitações diversas

A NBR 8400 estabelece que as solicitações devidas aos efeitos climáticos são as resultantes das seguintes causas:

- Ação do vento;
- Variação de temperatura

E as solicitações diversas se aplicam para o dimensionamento de acessos e passadiços, cabinas e plataformas.

### 2.7.3.5. Flecha máxima admissível

De forma a evitar falha por deformação elástica excessiva, estabelece-se valores máximos para flechas das vigas de equipamentos de elevação de carga. A NBR 8800:2008 estabelece critérios que devem ser aplicados em estruturas de aço. Sendo L o vão da ponte, o fator de flecha admissível para pontes rolantes é calculado através das equações da Tabela 7.

Tabela 7 - Deflexão Máxima da Viga

<b>Descrição</b>	<b><math>\delta</math> (m)</b>
Deslocamento vertical para pontes rolantes com capacidade nominal inferior a 200 kN	L/600
Deslocamento vertical para pontes rolantes com capacidade nominal igual ou superior a 200 kN, exceto ponte siderúrgicas	L/800
Deslocamento vertical para pontes rolantes siderúrgicas com capacidade nominal igual o superior a 200 kN	L/100

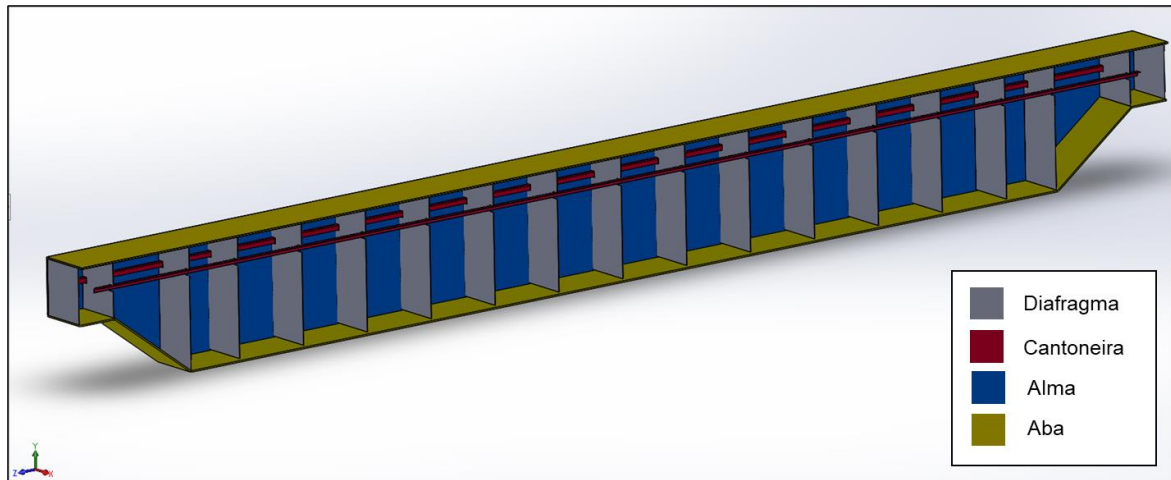
Fonte: Adaptado de ABNT NBR 8800 (2008)

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. MATERIAIS

Para o desenvolvimento da análise numérica, somente uma viga foi modelada, uma vez que os carregamentos serão simétricos para uma ponte rolante dupla viga. O modelo 3D gerado no SolidWorks se encontra na Figura 17.

Figura 17 - Modelo 3D da ponte rolante



Fonte: Autor (2022)

Todos componentes da Figura 17 são feitos de ASTM A36. As características desse material estão dispostas na Tabela 8.

Tabela 8 - Propriedades do aço ASTM A36

Densidade ( $\text{g/cm}^3$ )	Módulo de Elasticidade (GPa)	Coefficiente de Poisson
7,85	200	0,26

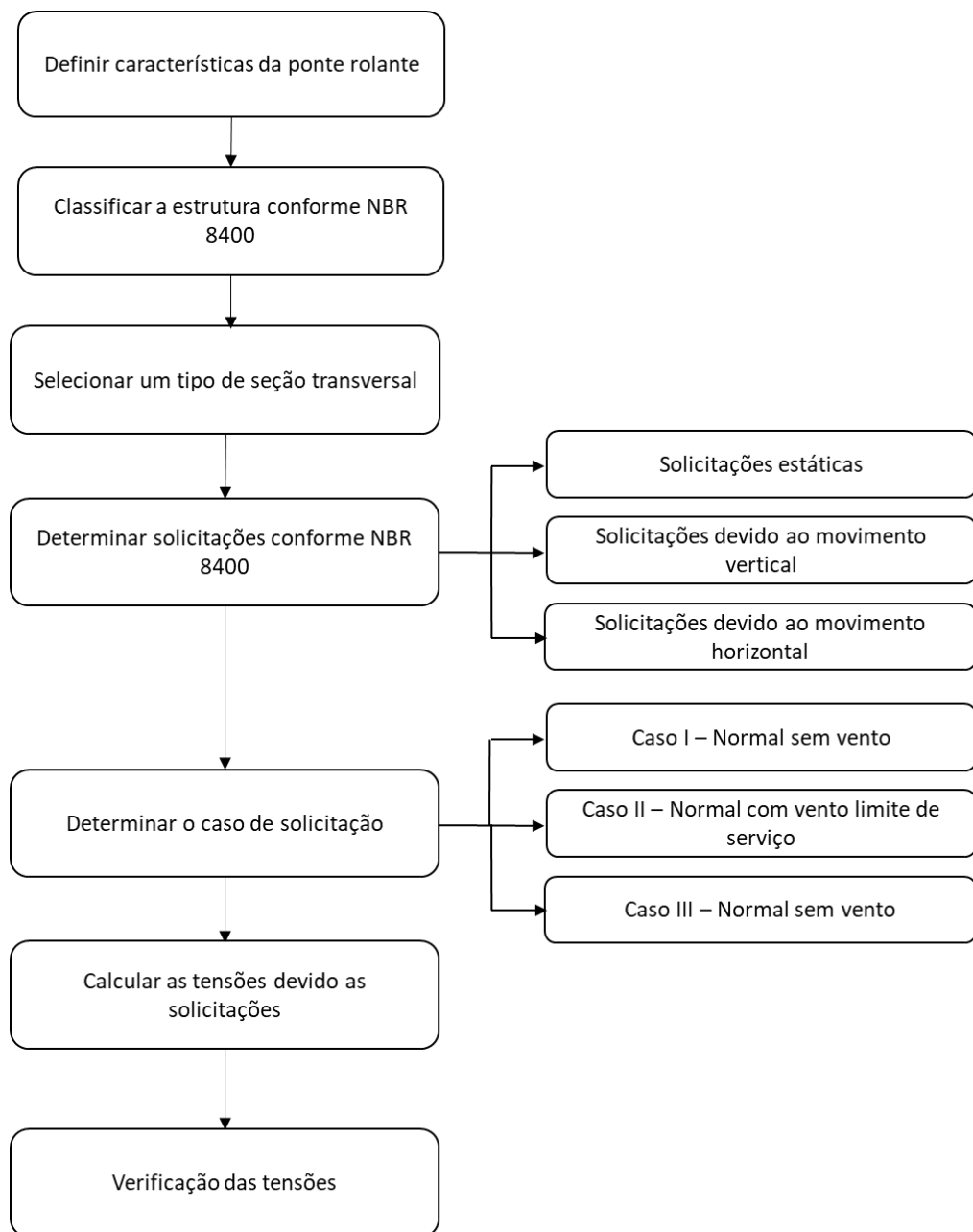
Fonte: Adaptado pelo MatWeb

#### 3.2. MÉTODOS

##### 3.2.1. Método Analítico

A Figura 18 mostra um fluxograma das etapas que são geralmente executadas na indústria para o dimensionamento de ponte rolantes.

Figura 18 - Fluxograma de dimensionamento de ponte rolante



Fonte: Autor (2022)

O dimensionamento analítico da ponte rolante a ser estudada numericamente através do método de elementos finitos foi fornecido pela empresa Alstom e segue o procedimento descrito na Figura 18.

Para o desenvolvimento do método analítico, segue o método de cálculo descrito pela NBR 8400 e NBR 8800. Inicialmente, classifica-se a estrutura de acordo com as características pré-estabelecidas. Realiza-se o diagrama de corpo livre da estrutura de acordo com solicitações,

que nesse estudo serão consideradas somente as solicitações estáticas e verticais no cálculo analítico. Determina-se então o caso de solicitação, que nesse caso é o serviço normal sem vento para saber o cálculo da tensão admissível. Com isso, adota-se uma seção transversal e suas medidas, que neste caso é uma viga do tipo “caixão”. Então, calcula-se as tensões normais devido a flexão em pontos selecionados e as tensões cisalhantes máximas na seção transversal.

Finalmente, os valores das tensões são verificados pelo critério de falha de von Mises, verificando se estão dentro do limite da tensão admissível. O projeto já foi verificado pela empresa Alstom, onde as tensões de von Mises ficaram abaixo da tensão admissível de 165,53 MPa. Portanto, no presente trabalho, não serão apresentados resultados no que diz respeito a essa etapa de verificação.

### 3.2.1.1. Características da ponte rolante

As características da ponte rolante dupla viga dimensionada são:

- Carga nominal ( $P_C$ ): 1500000 N
- Peso do Moitão ( $P_m$ ): 44145 N
- Peso do Cabo de Aço ( $P_{cb}$ ): 18639 N
- Peso do Carro ( $P_{cr}$ ): 329616 N
- Peso da Estrutura ( $P_{est}$ ): 152545,5 N (o peso de somente uma viga principal, pois só uma será utilizada no cálculo, considerando a simetria)
- Vão da Ponte ( $L$ ): 19,15 m
- Velocidade de levantamento ( $v_L$ ): 1 m/min
- Aceleração do equipamento ( $ac$ ): 0,078 m/s<sup>2</sup>
- Altura em relação ao solo: 0 a 20 m
- Número de rodas da ponte rolante ( $N_{rp}$ ): 16 rodas
- Máxima aproximação do carro na viga: 40 cm

### 3.2.1.2. Classificação da ponte rolante segundo a NBR 8400

A classe de utilização no caso estudado é A, de acordo com a Tabela 1. E de acordo com a Tabela 2, tem-se o estado de carga 1. Com a combinação das duas classificações, determina-se o grupo da estrutura como 2, segundo a Tabela 3.

O coeficiente de majoração é igual a 1, conforme grupo de estrutura na Tabela 4. E o coeficiente dinâmico, Tabela 6, segundo a velocidade de levantamento utilizada, é igual 1,15.

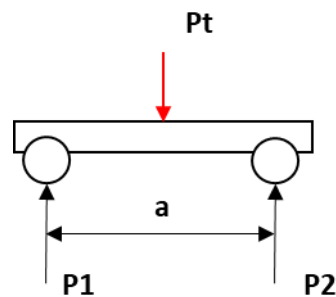
### 3.2.1.3. Diagramas de corpo livre e momento fletor

O peso das duas vigas, da carga nominal e do carro ponte geram solicitações na estrutura. Foram desconsiderados os pesos de armários, passarelas e armários elétricos.

Inicialmente, adota-se um peso limite para a viga de acordo com a experiência da empresa em projetos anteriores e calcula-se o peso distribuído ao longo da viga. Para determinação das reações nas rodas do carro carga por roda, considera-se o peso da carga nominal, peso do moitão e o peso do cabo de aço.

O diagrama de corpo livre do carro ponte fica conforme Figura 19. Considerando quatro rodas no total, duas em cada viga.

Figura 19 - Diagrama de corpo livre do carro ponte



Fonte: Autor (2022)

Onde  $P_1$  e  $P_2$  as reações nas rodas do carro e  $P_t$  é a carga total.

Considerando  $P_{1c}$  e  $P_{2c}$  as cargas por roda do carro sobre a viga devido a carga nominal, bloco do gancho e cabo de aço, calculamos seus valores através da equação 5 e equação 6. Estas são derivadas das fórmulas para equilíbrio estático.

$$P_{1c} = ((P_c + P_m + P_{cb}) * (a/2)) / (2 * a) \quad (5)$$

$$P_{2c} = ((P_c + P_m + P_{cb}) * (a/2)) / (2 * a) \quad (6)$$

Calcula-se, então, a carga por roda do carro sobre a viga devido ao peso do carro,  $P_{1cr}$  e  $P_{2cr}$ , conforme equação 7.

$$P_{1cr} = P_{2cr} = P_{cr} / 4 \quad (7)$$

Então, pode-se calcular as reações nas rodas do carro com a equação 8 e equação 9.

$$P_1 = P_{1cr} + P_{1c} \quad (8)$$

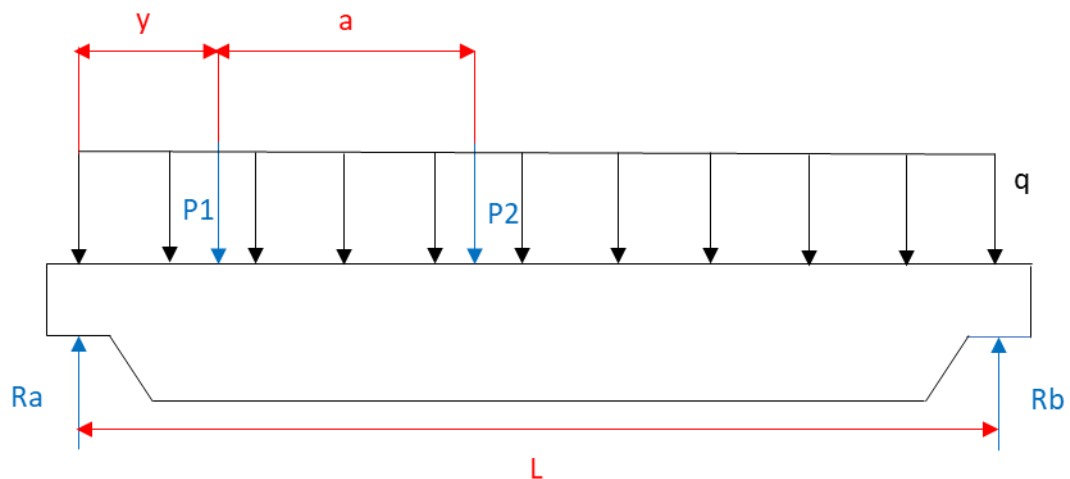
$$P_2 = P_{2cr} + P_{2c} \quad (9)$$

Além disso, tem-se o carregamento devido ao peso distribuído da viga, conforme equação 10.

$$q = Pest/L \quad (10)$$

Considerando a configuração de máxima aproximação, temos o diagrama de corpo livre de uma das vigas da ponte dupla viga conforme Figura 20.

Figura 20 - Diagrama de Corpo Livre com carro ponte na máxima aproximação



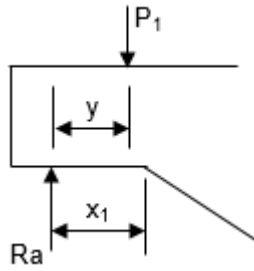
Fonte: Autor (2022)

Através do uso das equações de equilíbrio estático 3 e 4, pode-se calcular a reação vertical no apoio A, incluindo o coeficiente dinâmico  $\psi$ , na posição de máxima aproximação, resultando na equação 11.

$$Ra_{x1} = ((P1c * \psi + P1cr) * (L - y) + (P2c * \psi + P2cr) * (L - y - a)) / (L) \quad (11)$$

Logo, sabendo que o rebaixo da alma na extremidade da viga principal tem as características da Figura 21, tem-se que o momento fletor no rebaixo da viga é calculado pela equação 12.

Figura 21 - Características do carregamento no rebaixo da viga

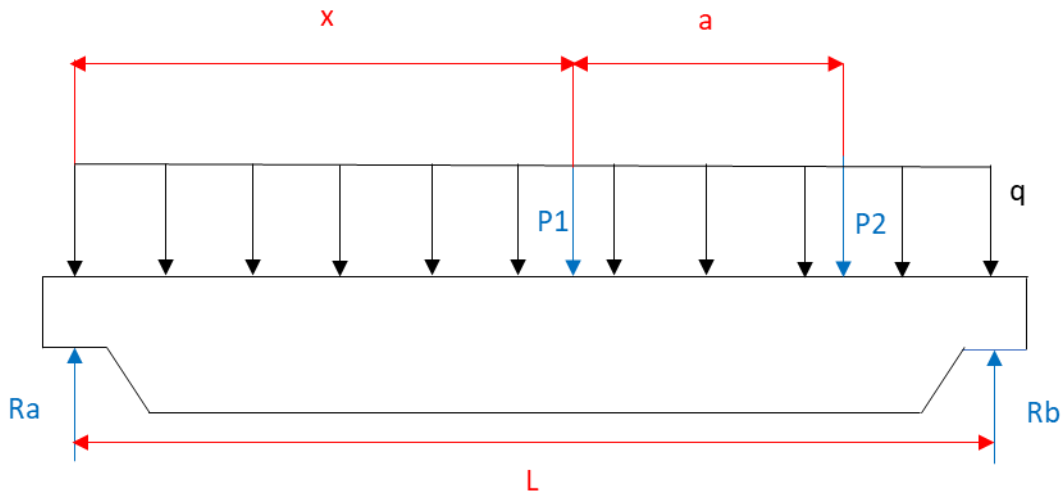


Fonte: Alstom (2006)

$$M_{x1} = Ra_{x1} * x_1 - (P_{1c} * \psi + P_{1cr}) * (x_1 - y) \tag{12}$$

Na posição de máximo momento, temos o diagrama de corpo livre esquematizado na Figura 22. Onde a posição de máximo momento é calculado pela equação 13.

Figura 22 - Diagrama de Corpo Livre na posição de máximo momento



Fonte: Autor (2022)

$$x = \frac{L}{2} - \frac{P_2 * a}{2 * (P_1 + P_2)} \tag{13}$$

A reação vertical no apoio A, incluindo o coeficiente dinâmico  $\psi$ , na posição de máximo momento é calculada pela equação 14.

$$Rax = ((P_{1c} * \psi + P_{1cr}) * (L - x) + (P_{2c} * \psi + P_{2cr}) * (L - x - a))/L \tag{14}$$

O momento fletor máximo na posição x é calculado pela equação 15.

$$M_x = Rax * x \tag{15}$$

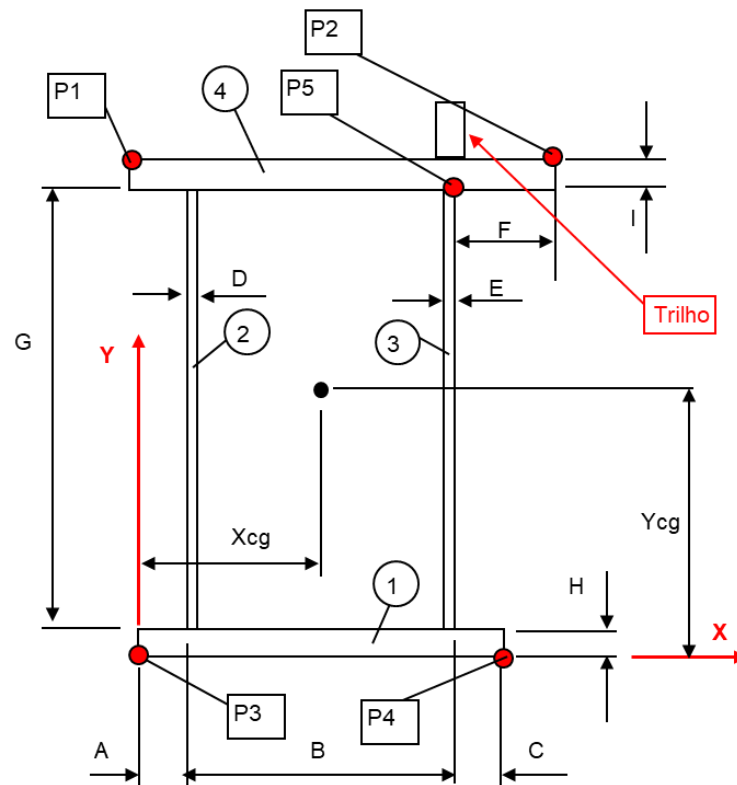
### 3.2.1.4. Solicitações

Uma vez gerados os diagramas de corpo livre nas condições mais desfavoráveis, calcula-se as reações nos apoios e com isso, os momentos fletores nas seções transversais das duas condições. A força cortante não é apresentada, pois não são calculadas as tensões de cisalhamento.

### 3.2.1.5. Seção transversal

A viga utilizada é do tipo caixão e os pontos mais críticos para o cálculo das tensões atuantes são os pontos destacados na Figura 23. Os pontos 1, 2 e 5 correspondem aos pontos da região compressiva e os pontos 3 e 4, região trativa.

Figura 23 - Seção transversal da viga tipo "caixão"



Fonte: Alstom (2006)

As dimensões da seção transversal de máximo momento são demonstradas na Tabela

9.

Tabela 9 - Dimensões da seção transversal de máximo momento

Item	Dimensão (m)
A	0,0135
B	0,723
C	0,0135
D	0,0125
E	0,0125
F	0,0735
G	2
H	0,025
I	0,025

Fonte: Autor (2022)

As dimensões da seção transversal de máxima aproximação são demonstradas na Tabela 10.

Tabela 10 - Dimensões da seção transversal na máxima aproximação

Item	Dimensão (m)
A	0,0135
B	0,723
C	0,0135
D	0,0125
E	0,0125
F	0,0735
G	2
H	0,025
I	0,025

Fonte: Autor (2022)

### 3.2.1.6. Cálculo de tensões

De posse dos valores dessas solicitações e pontos críticos, calcula-se as tensões normais devido a flexão e a tensão de cisalhamento devido a força cortante nesses pontos, conforme equações 12 e 13.

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{V_{m\acute{a}x} * Q}{I * t} \quad (12)$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M_{m\acute{a}x} * c}{I} \quad (13)$$

A tensão de cisalhamento, equação 13, não será apresentada, uma vez que o modelo analítico pressupõe que as tensões na seção transversal são uniformes. Diferentemente dos modelos de elementos finitos.

### 3.2.1.7. Deflexão máxima

Conforme Tabela 7, temos que a deflexão máxima permitida para o caso estudado é calculada pela equação 14.

$$f_{adm} = L/800 \quad (14)$$

A flecha máxima devido a carga nominal e peso carro são calculadas equações 15 e 16.

$$f_{p1} = -P_1(L - x) * x * (L^2 - (L - x)^2 - x^2)/(6 * E * I_x * L) \quad (15)$$

$$f_{p2} = -P_2(L - x - a) * x * (L^2 - (L - x - a)^2 - x^2)/(6 * E * I_x * L) \quad (16)$$

E a flecha devido ao peso próprio da viga é calculada pela equação 17.

$$f_q = (-5 * q * L^4)/(6 * E * I_x * L) \quad (17)$$

A flecha total na viga é calculada pela equação 18.

$$f_{tot} = f_{p1} + f_{p2} + f_q \quad (18)$$

## 3.2.2. Método numérico

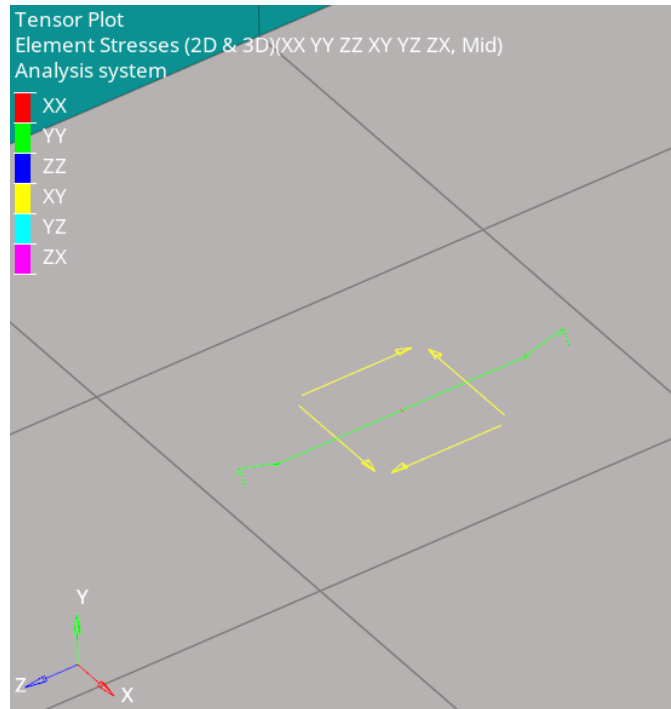
De forma a realizar o modelo virtual utilizando elementos de casca, gerou-se o modelo 3D da ponte dimensionada pelo método analítico. A modelagem do modelo foi feita no software *SolidWorks*.

Os modelos virtuais de elementos finitos foram criados para que fossem feitas análises estáticas destes no *HyperWorks*, gerando valores de tensão nos pontos da seção transversal

### 3.2.2.1. Tensões normais de flexão

Através do método numérico, os resultados das tensões são obtidos através de um gráfico de tensores dos elementos, como exemplifica a Figura 24.

Figura 24 - Gráfico de Tensores



Fonte: Autor (2022)

### 3.2.2.2. Modelos virtuais de elementos finitos

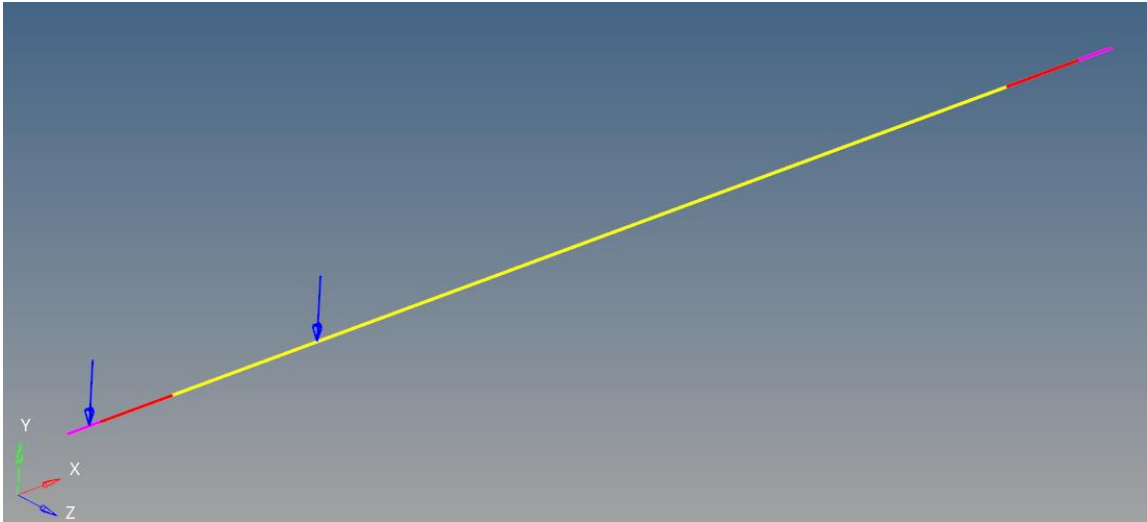
Os carregamentos verticais devido o peso do carro ponte, utilizando *load collector* FORCE no *HyperMesh*, são os mesmos calculados pelas equações 8 e 9. Em relação o peso próprio da viga, a massa é a mesma que o do cálculo analítico, então foi utilizado somente um carregamento da gravidade, utilizando *load collector* GRAV com  $9,81 \text{ m/s}^2$  no *HyperMesh*.

Em relação às restrições dos modelos, nos três modelos, as extremidades da viga foram restringidas nos seis graus de liberdade (x, y, z, Rx, Ry, Rz).

#### 3.2.2.2.1. Modelo em vigas

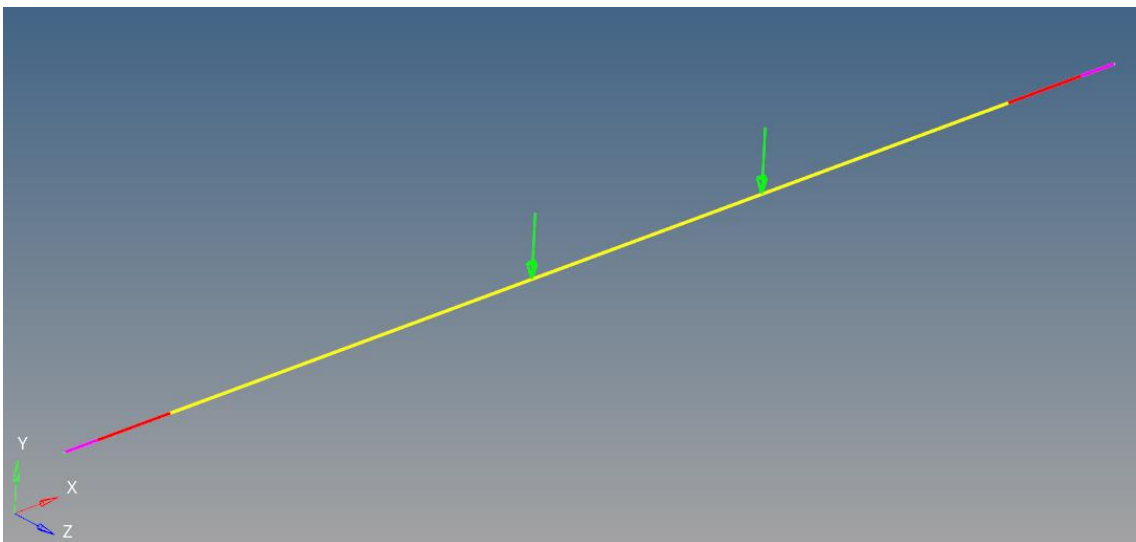
Para a construção do modelo em vigas, foram utilizados somente elementos 1D, conforme Figura 25 e Figura 26.

Figura 25 - Modelo 1D em vigas para máxima aproximação



Fonte: Autor (2022)

Figura 26 – Modelo em elementos 1D em vigas para máximo momento

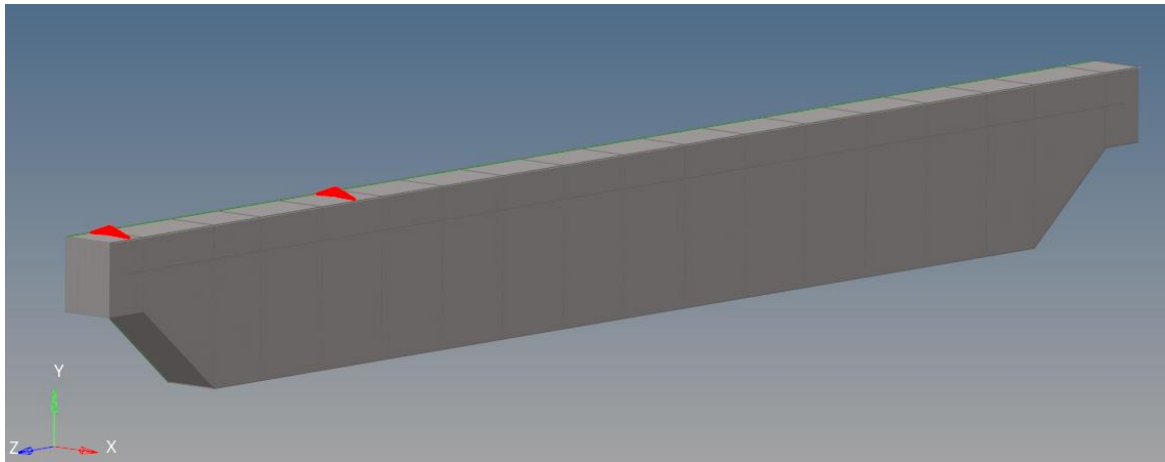


Fonte: Autor (2022)

### 3.2.2.2.2. Modelo em casca com carregamento distribuído

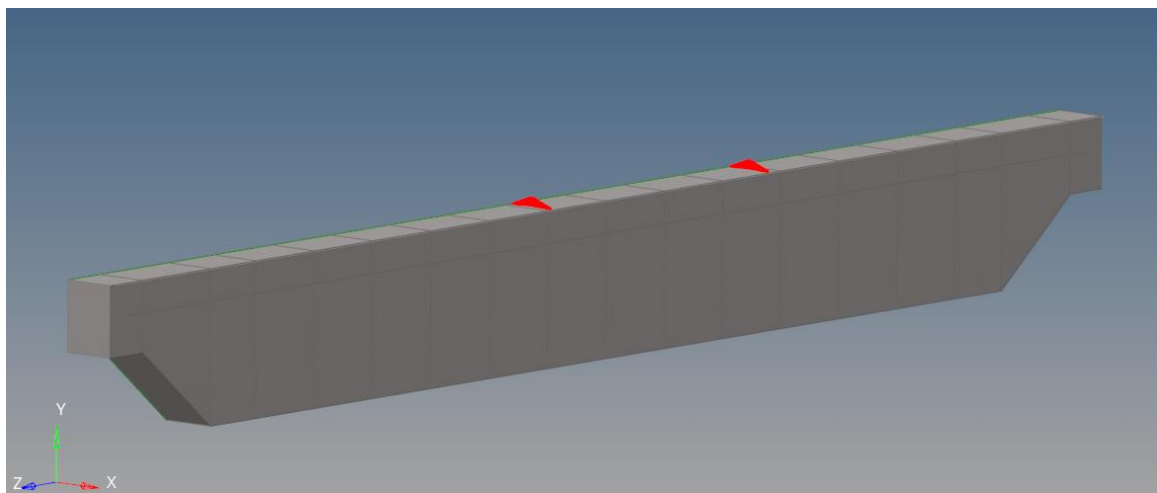
Para o modelo com elementos em casca com carregamento distribuído, as cargas verticais devido ao peso do carro carga foram distribuídas na aba superior, conforme Figura 27 e Figura 28.

Figura 27 - Modelo em elementos de casca (2D) com carregamento distribuído para máxima aproximação



Fonte: Autor (2022)

Figura 28 - Modelo em elementos de casca (2D) com carregamento distribuído para máximo momento

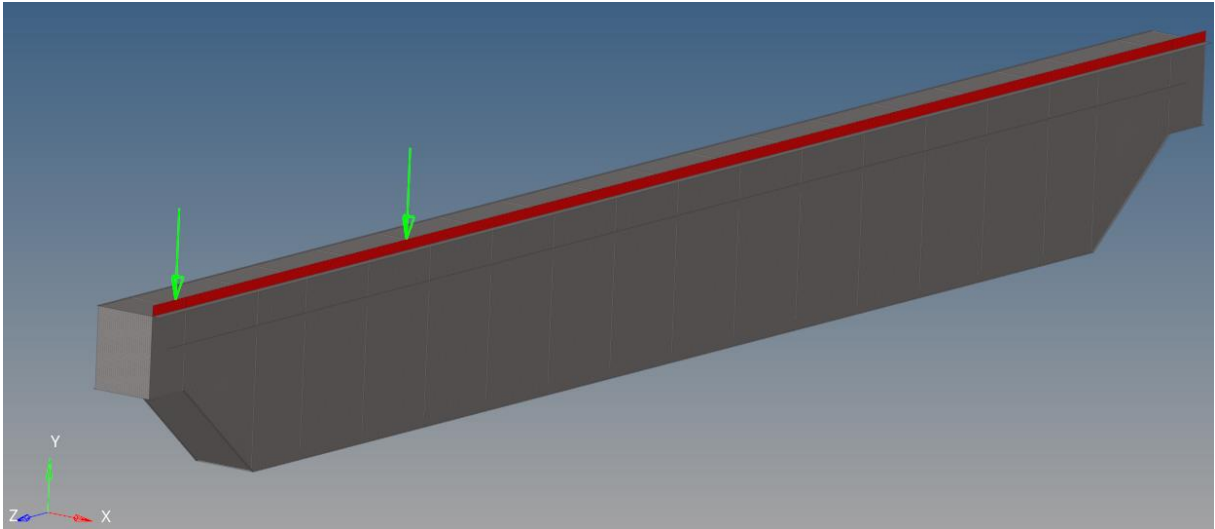


Fonte: Autor (2022)

### 3.2.2.2.3. Em casca com carregamento concentrado

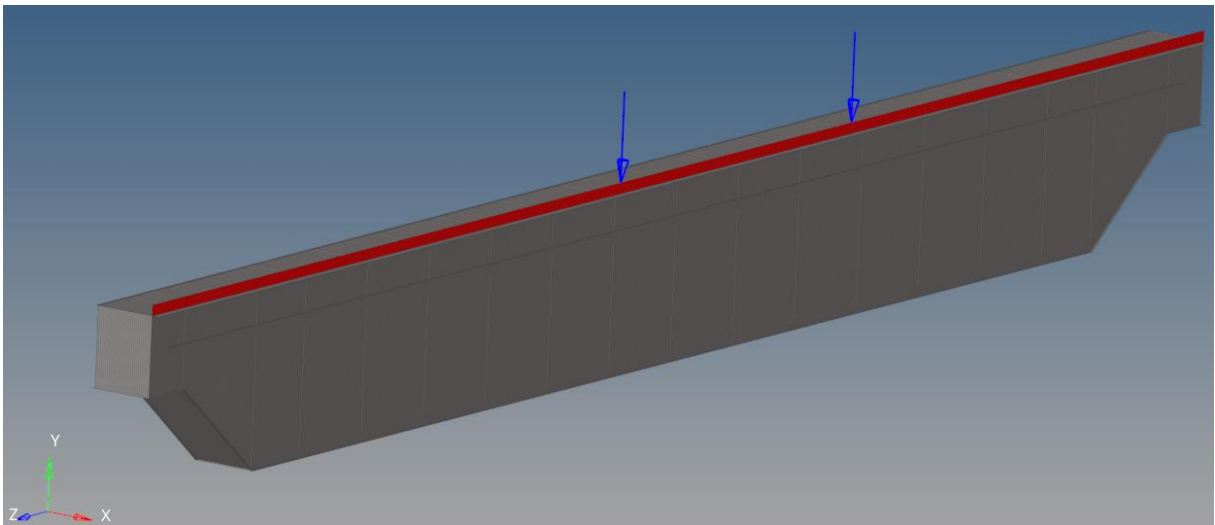
No modelo em casca com carregamento concentrado, foi modelado o trilho que é posicionado na aba superior, conforme Figura 29 e Figura 30. As cargas verticais devido ao peso do carro carga foram aplicadas diretamente no trilho.

Figura 29 - Modelo em elementos de casca (2D) com carregamento concentrado para máxima aproximação



Fonte: Autor (2022)

Figura 30 - Modelo em elementos de casca (2D) com carregamento concentrado para máximo momento



Fonte: Autor (2022)

#### 4. RESULTADOS

Para o método analítico, utilizando as equações 8 e 9, tem-se que os carregamentos devido as cargas verticais das rodas dos carros são iguais a:

$$P_2 = P_2 = P_{1cr} + P_{1c} = 473100 \text{ N}$$

De acordo com a equação 10, o peso distribuído de uma viga é igual:

$$q = \frac{P_{est}}{L} = 8120,1 \text{ N/m}$$

Utilizando a equação 12, tem-se que o momento fletor na seção de máxima aproximação é:

$$M_{x1} = 409121 \text{ N.m}$$

A posição de máximo momento é calculada pela equação 13:

$$x = 8,53 \text{ m}$$

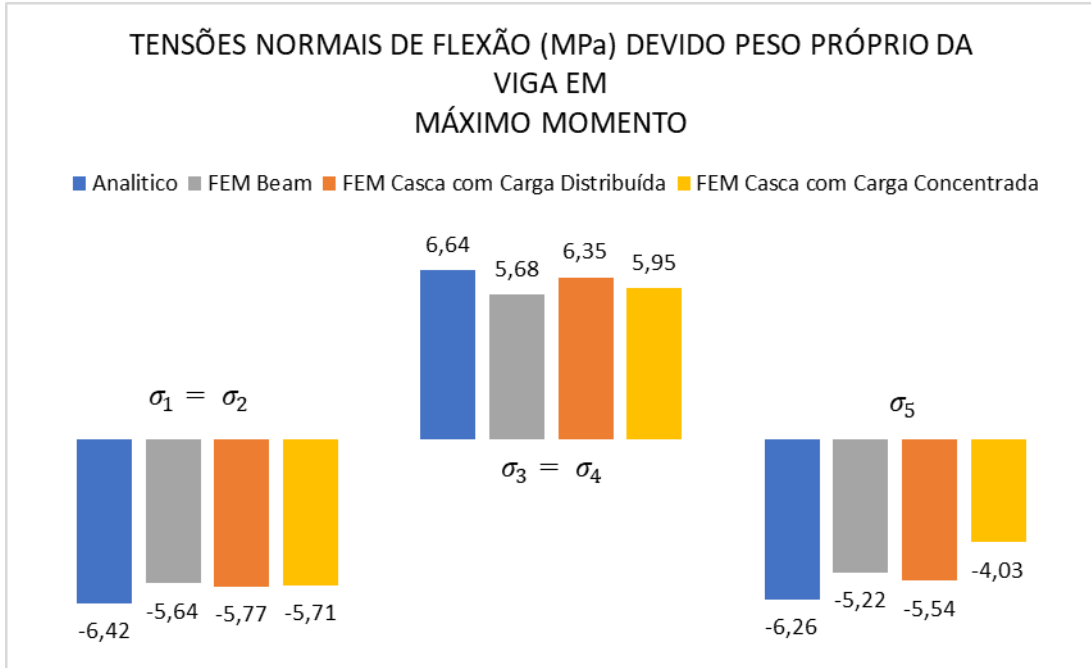
O momento fletor na seção de máximo momento é calculado pela equação 15 e resulta em:

$$M_x = 473397 \text{ N}$$

##### 4.1. Tensões normais de flexão

Os resultados analíticos e numéricos de tensão normal de flexão para a posição de máximo momento devido ao peso próprio da estrutura foram esquematizados no Gráfico 1. Como o cálculo analítico supõe que os pontos simétricos na seção transversal possuem os mesmos valores de tensão, foi plotado o valor que fossem maiores entre os dois pontos nos modelos de elementos finitos.

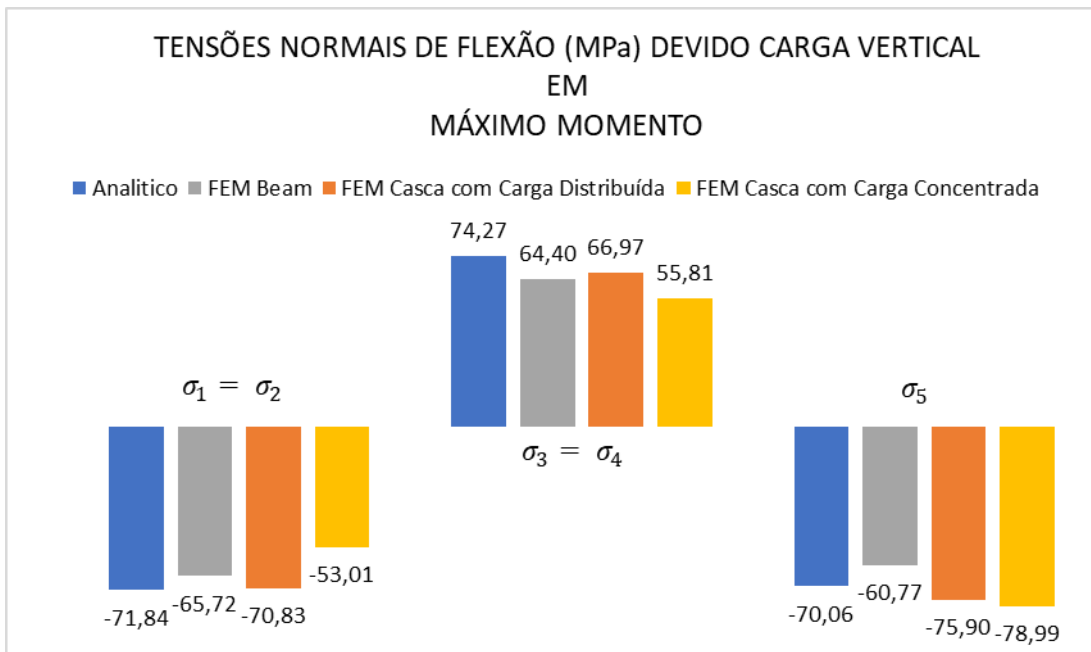
Gráfico 1 - Tensões normais de flexão na posição de máximo momento devido peso próprio da viga



Fonte: Autor (2022)

A mesma análise foi executada para as cargas verticais das rodas dos carros, como demonstrado no Gráfico 2.

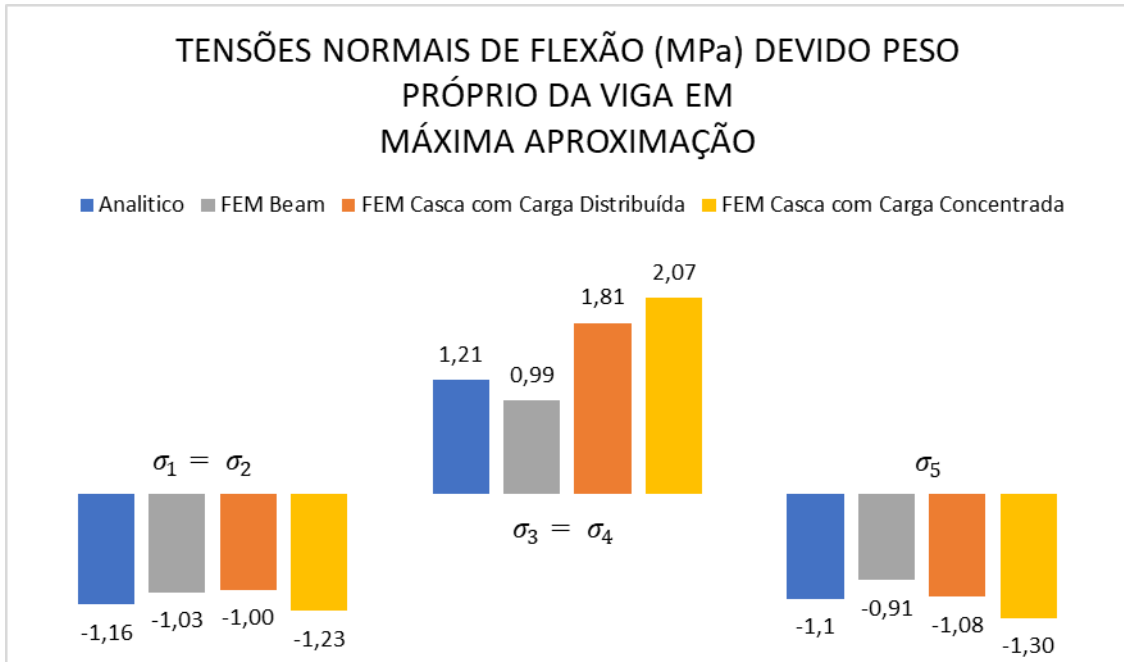
Gráfico 2 - Tensões normais de flexão na posição de máximo momento devido as cargas verticais das rodas do carro



Fonte: Autor (2022)

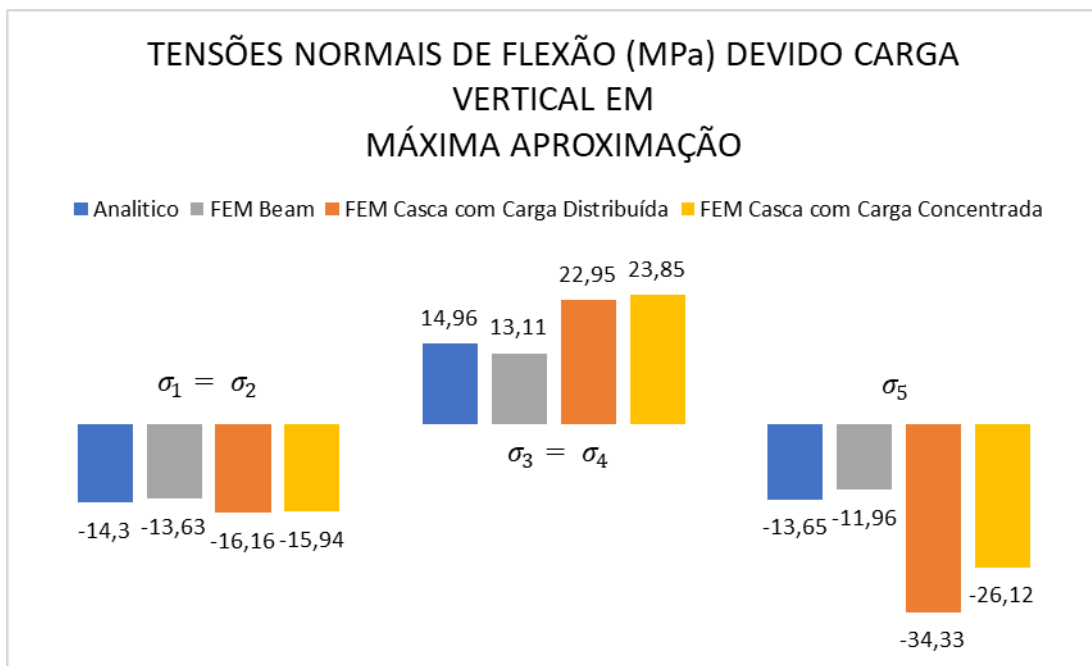
Para o posicionamento de máxima aproximação, tem-se as tensões normais devido ao peso próprio da viga e devido as cargas verticais das rodas dos carros no Gráfico 3 e Gráfico 4, respectivamente.

Gráfico 3 - Tensões normais de flexão na posição de máxima aproximação devido peso próprio da viga



Fonte: Autor (2022)

Gráfico 4 - Tensões normais de flexão na posição de máximo momento devido as cargas verticais das rodas do carro



Fonte: Autor (2022)

## 4.2. Deflexão Máxima

Ainda para o cálculo analítico, temos que a flecha máxima admissível, equação 14, é:

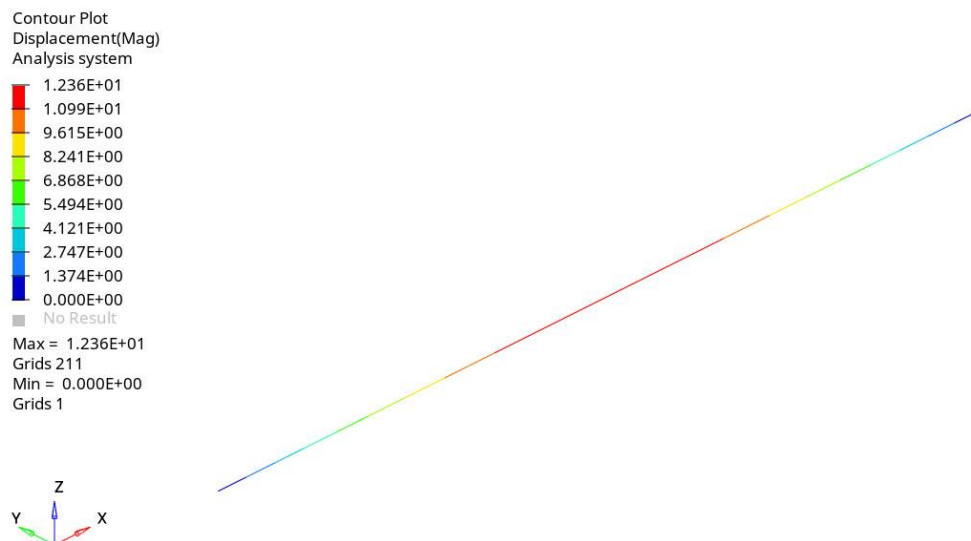
$$f_{adm} = 2,39 \text{ cm}$$

E a flecha máxima do modelo analítico, equação 18, é igual a:

$$f_{tot} = f_{P1} + f_{P2} + f_q = -1,2 \text{ cm}$$

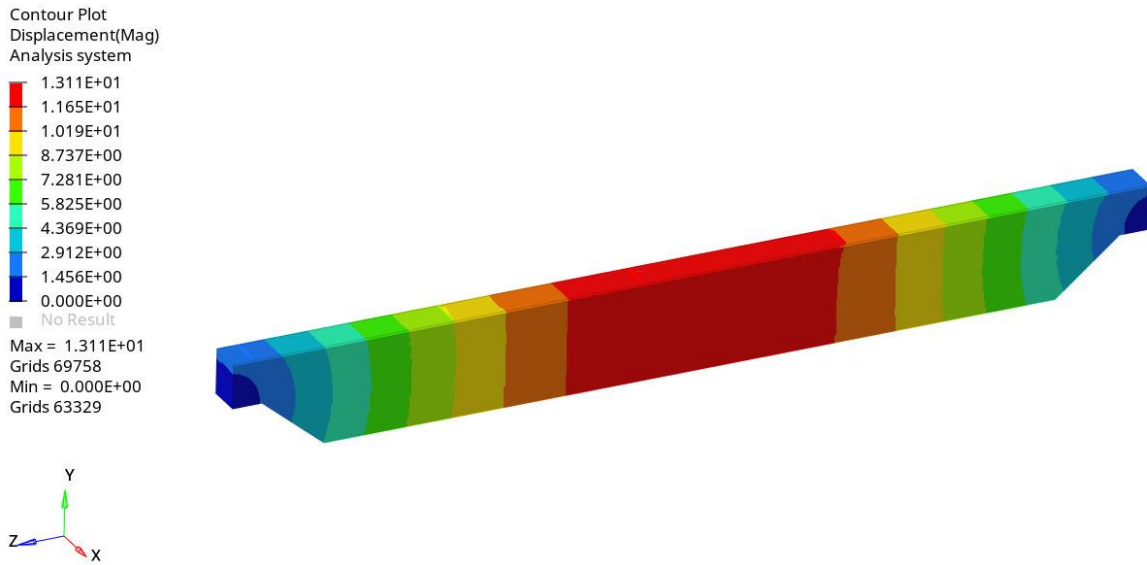
As deflexões para os modelos virtuais podem ser visualizadas no Gráfico 5, Gráfico 6 e Gráfico 7.

Gráfico 5 - Deflexão em modelo de vigas



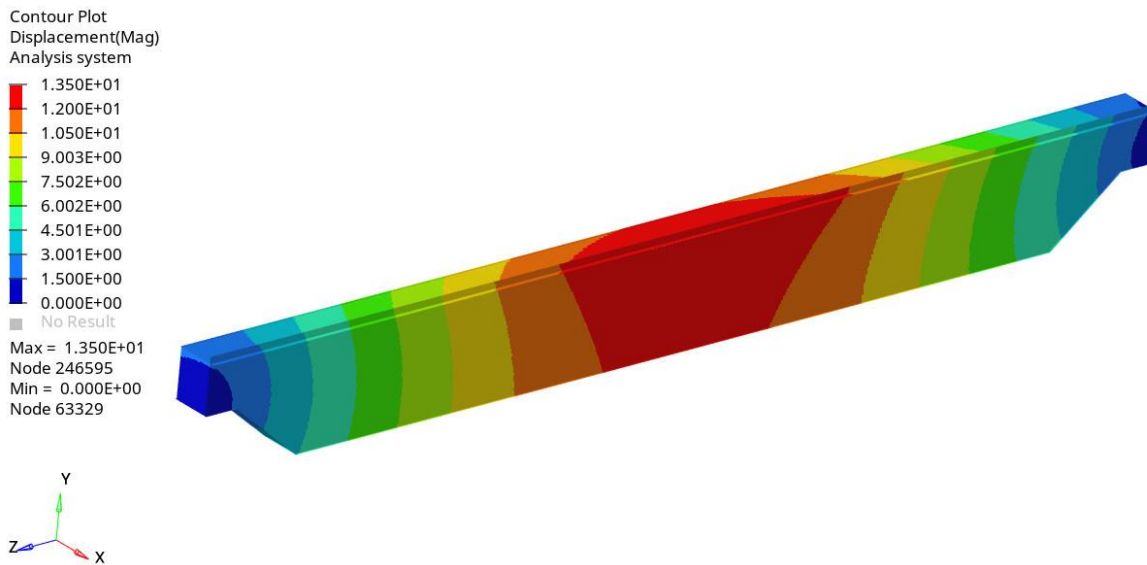
Fonte: Autor (2022)

Gráfico 6 - Deflexão em modelo de casca com carga distribuída



Fonte: Autor (2022)

Gráfico 7 - Deflexão em modelo de casca com carga concentrada

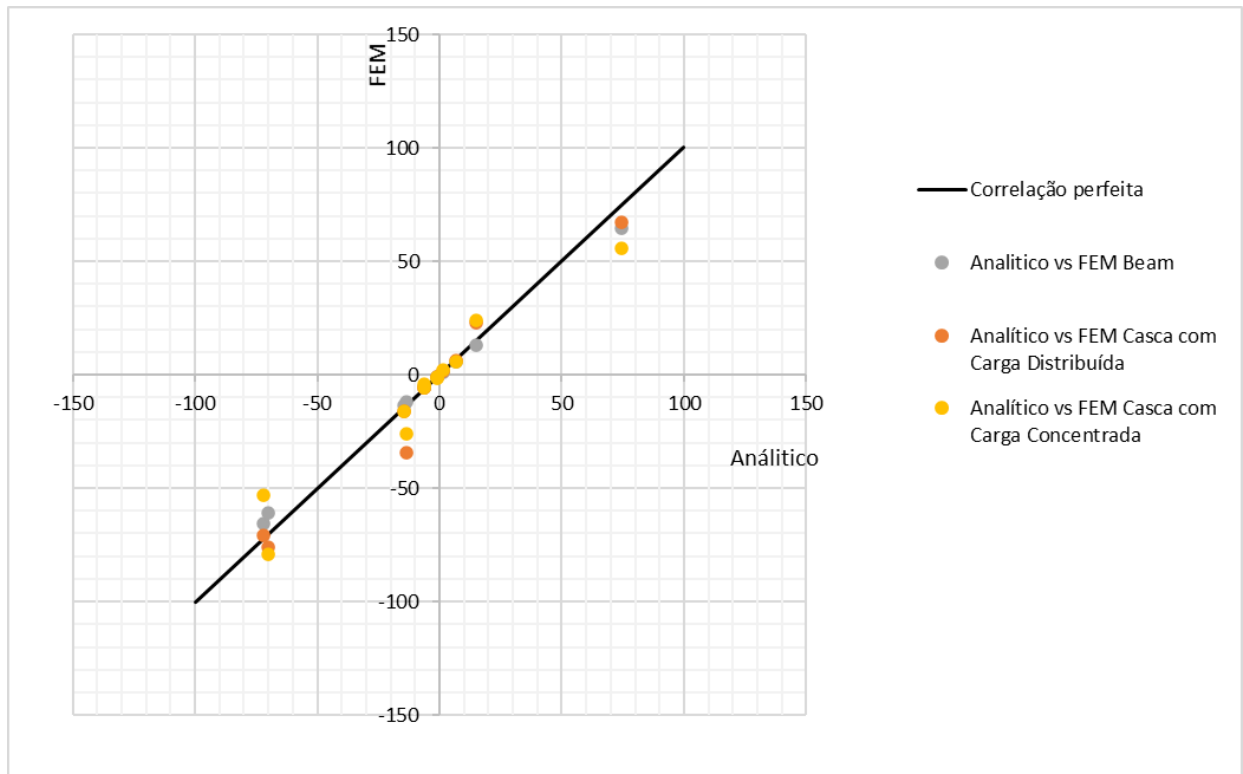


Fonte: Autor (2022)

## 5. DISCUSSÃO

Os resultados das tensões normais de flexão para os três modelos virtuais em relação ao analítico foram plotados no Gráfico 8, onde pode-se observar as dispersões dos resultados em relação a correlação perfeita.

Gráfico 8 - Correlação de resultados para tensão normal de flexão



Fonte: Autor (2022)

Analisando os resultados do Gráfico 8, é possível notar que o modelo com resultados mais próximos da correlação perfeita é o modelo de vigas. Isso é esperado, uma vez que é o modelo mais simples e o que mais se assemelha ao cálculo analítico.

Os resultados, tanto para máxima aproximação quanto para o máximo momento, para os modelos de vigas ficaram até 18% menores em relação ao resultado analítico. Essa variação pode ser explicada pelo fato de que o coeficiente dinâmico é introduzido no cálculo analítico do momento fletor, diferentemente dos modelos virtuais de elementos finitos.

O modelo de casca com carga distribuída teve variações em até 11% para a posição de máximo momento. Já para a posição de máxima aproximação em relação as cargas verticais devido ao peso do carro carga, a tensão normal de flexão nos pontos 3 e 4 é 53% maior em relação ao resultado analítico e no ponto 5, é mais do que o dobro. Sabendo que a posição de máxima aproximação se encontra mais na área de rebaixo da alma e que isso leva a concentrações de tensões não contempladas no cálculo analítico, pode-se justificar a diferença

nos pontos 3 e 4. O ponto 5 se encontra mais próximo da onde a carga é aplicada, isso pode levar a maiores valores de tensão também.

Ainda no modelo com distribuída, observa-se que as tensões devido ao peso próprio da viga ficaram até 14% menores em relação ao resultado analítico, com exceção dos pontos 3 e 4. Nestes pontos, a tensão ficou 49% maior. Pode-se explicar essa divergência por serem pontos mais próximo da área com concentração de tensão no rebaixo da alma.

Para o modelo de casca com carga concentrada na posição de máximo momento, as tensões são menores que os resultados analíticos em até 36%, com exceção da tensão no ponto 5 devido a carga vertical das rodas do carro. Essa variação pode ser justificada pelo fato de que nesse modelo, o trilho foi incluso. O peso do trilho leva a uma torção no eixo z do modelo, podendo levar a diferentes resultados. E no ponto 5, a tensão maior em 13% pode ser explicada pelo fato de ser um ponto muito próximo do ponto de aplicação da força.

Na posição de máxima aproximação, a tensão nos pontos 3 e 4 ficou 59% maior em relação ao resultado analítico, podendo ser justificada, também, pelas concentrações de tensões do rebaixo. O mesmo ocorre para o ponto 5, com tensão 91% maior, levando em consideração que também é um ponto próximo do ponto de aplicação da força. A tensão devido ao peso próprio da viga nos pontos 3 e 4 é 71% maior, podendo ser justificada pelo rebaixo.

As variações percentuais das deflexões máximas dos modelos virtuais de elementos finitos e do cálculo analítico são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 - Variação percentual das deflexões

	Analítico	Em viga	Variação percentual (%)	Em casca com carga distribuída	Variação percentual (%)	Em casca com carga concentrada	Variação percentual (%)
Deflexão Máxima (cm)	1,19	1,24	4%	1,31	10%	1,35	13%

Fonte: Autor (2022)

As variações seguiram como esperado, o modelo em vigas com a menor variação percentual, uma vez que é o modelo mais próximo do cálculo analítico. E o modelo de carga concentrada com maior deflexão máxima, uma vez que é o modelo mais representativo. Todos valores se encontram abaixo da flecha admissível.

## 6. CONCLUSÃO

Foram construídos e analisados três modelos virtuais de elementos finitos para um projeto de ponte rolante. Os resultados de tensão normal de flexão e a deflexão máxima foram comparados com os resultados do cálculo analítico regido pela NBR 8400 e a NBR 8800.

O modelo virtual de elementos finitos em vigas mostrou ser o mais próximo de representar o modelo analítico. Entretanto, sabendo que uma ponte rolante real possui aspectos como rebaixo na alma e a concentração de tensões, o modelo em vigas não foi capaz de apresentar essa particularidade. Os modelos de casca representaram esse fenômeno, uma vez que os resultados na seção da posição de máxima aproximação os resultados apresentaram maiores oscilações.

O modelo em casca de carga concentrada é mais representativo, dado que apresenta o trilho e seu carregamento concentrado, conforme a localização das rodas do carro ponte. Este apresentou diferentes valores em relação ao modelo analítico, podendo a convergência ser justificada pela maior representatividade do modelo em relação a aspectos da realidade.

Logo, com a interpretação das normas e dos resultados e a comparação entre os modelos, o objetivo principal foi alcançado, visto que possibilitou a visualização de uma aplicação de conceitos que engenheiros mecânicos precisam entender para o exercício da profissão. Além disso, permitiu o entendimento de como os cálculos analíticos aprendidos na graduação são aplicados na indústria, através de normas.

## REFERÊNCIAS

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

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

BEER, F. P. **Mecânica dos materiais**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

DASSAULT SYSTÈMES. **Introducing solidworks**. Disponível em: [https://my.solidworks.com/solidworks/guide/SOLIDWORKS\\_Introduction\\_EN.pdf](https://my.solidworks.com/solidworks/guide/SOLIDWORKS_Introduction_EN.pdf)  
Acesso em: 05 dez. 2021.

DEMAG. **Produtos**. Disponível em: <https://demagcranes.com/pt-br>. Acesso em: 02 dez. 2021.

GREINER, H. G. **Crane handbook**. 3. ed. Illinois: Harvey, 1967.

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

KONECRANE. **Equipment and service for the power industry**. Disponível em: [https://www.konecranes.com/sites/default/files/download/power\\_industry\\_en\\_brochure\\_2016\\_konecranes.pdf](https://www.konecranes.com/sites/default/files/download/power_industry_en_brochure_2016_konecranes.pdf). Acesso em: 02 dez. 2021.

LANGUI, C. A. **Pontes rolantes**: a importância do equipamento nas áreas de produção industrial. 2001. Monografia (MBA em Gerência Empresarial) - Departamento de Economia, Contabilidade, Administração e Secretariado, Universidade de Taubaté, Taubaté, 2001.

MAZZELA. **Overhead cranes**: from top to bottom. 2017. Disponível em: <https://resources.mazzellacompanies.com/overhead-cranes-top-to-bottom-ebook-progressive-crane>. Acesso em: 05 dez. 2021.

MOTTA BARBOSA, L. F. F.; TOMAZINI, J. E.; MARTINS, M. S.; QUERIDO MOREIRA, L. R. R.; TOKUUE HORI, M. Y.; SILVA, L. F. S. Finite Element and Experimental Analysis of the Torsional Stiffness of a Chassis of a Baja SAE Prototype. **SAE Technical Paper**. Available from: <https://doi.org/10.4271/2016-36-0124>. Access in: 02 Dec. 2021.

LEITE NETO, A. L. **Projeto detalhado de uma ponte rolante para uma empresa metal mecânica**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Feral da Paraíba, João Pessoa, 2018.

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas**: uma abordagem integrada. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

PONGINAN, R. **Finite element analysis with inspire**. Disponível em: <https://altairuniversity.com/wp-content/uploads/2015/10/Inspireanalysis.pdf>  
Acesso em: 05 dez. 2021.

SCHARDONG, J. P. G. **Projeto da viga principal de uma ponte rolante**: uma abordagem analítica e computacional. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2018.

SILVA, R. A. R.; RODRIGUES, A. S.; TOMAZINI, J. E.; MARTINS, M. S.; SILVA, K. C.; SANTOS, M. Connecting rod with enhanced performance through fast and precise bolted joint design methodology. **SAE Technical Paper**. Available from: <https://doi.org/10.4271/2016-36-0406>. Access in: 02 Dec. 2021.

SORDI, G. **Dimensionamento da viga principal de uma ponte rolante**. 2016. Monografia (Bacharel em Engenharia Mecânica) – Centro Universitário UNIVATES, Lajeado, 2016.