



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil  
Programa de Pós-Graduação em Construção Metálica  
Mestrado Profissional em Construção Metálica – MECOM

---



# **ESTUDO DA GEOMETRIA E POSICIONAMENTO DOS ENRIJECEDORES NA RESISTÊNCIA DA VIGA DE ROLAMENTO À FADIGA**

Ouro Preto  
2018



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil  
Programa de Pós-Graduação em Construção Metálica  
Mestrado Profissional em Construção Metálica – MECOM



---

José Cláudio Canedo Pimenta

**ESTUDO DA GEOMETRIA E POSICIONAMENTO DOS ENRIJECEDORES NA  
RESISTÊNCIA DA VIGA DE ROLAMENTO À FADIGA**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Metálica do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Construção Metálica.

Orientador: Prof. Flávio Teixeira de Souza, D.Sc.  
Coorientador: Prof. Geraldo Donizetti de Paula, D.Sc.

Ouro Preto  
2018

P644e Pimenta, José Claudio Canedo.  
Estudo da geometria e posicionamento dos enrijecedores na resistência da viga de rolamento à fadiga [manuscrito] / José Claudio Canedo Pimenta. - 2018.

52f.: il.: color; grafis; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Teixeira de Souza.  
Coorientador: Prof. Dr. Geraldo Donizetti de Paula.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Construção Metálica.

1. Viga de rolamento. 2. Ponte rolante. 3. Enrijecedores. 4. Fadiga. I. Souza, Flávio Teixeira de. II. Paula, Geraldo Donizetti de. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 624.014

Catálogo: [www.sisbin.ufop.br](http://www.sisbin.ufop.br)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil  
Programa de Pós-Graduação em Construção Metálica  
Mestrado Profissional em Construção Metálica – MECOM



## ESTUDO DA GEOMETRIA E POSICIONAMENTO DOS ENRIJECEDORES NA RESISTÊNCIA DA VIGA DE ROLAMENTO À FADIGA

**AUTOR: JOSÉ CLÁUDIO CANEDO PIMENTA**

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em onze de dezembro de 2018, pela Comissão Examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Flávio Teixeira de Souza, D. Sc. – IFMG (Presidente)

Prof. Geraldo Donizetti de Paula, D. Sc. – UFOP

Prof. Jaime Florencio Martins, D. Sc. – UFOP

Prof. Mário Luís Cabello Russo, D. Sc. – IFMG

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço com toda sinceridade e o reconhecimento ao Prof. Flávio Teixeira de Souza, pela sua orientação, apoio e desprendimento em me ajudar cedendo seu tempo e conhecimento assim como pela sua amizade.

Estendo este agradecimento ao Prof. Geraldo Donizetti de Paula, o qual foi o incentivador do trabalho quanto ao tema e esteve sempre à disposição para contato como atuando junto ao colegiado do programa defendendo o estudo na obtenção de novos recursos quando foi necessário.

E por fim, agradeço ao apoio familiar, iniciado com o incentivo e persistência de minha esposa concluindo pela satisfação pela conclusão do trabalho por parte de minha mãe e irmãos.

## RESUMO

PIMENTA, José Cláudio Canedo. **Estudo da geometria e posicionamento dos enrijecedores na resistência da viga de rolamento à fadiga**. 2018. 52p. Dissertação de mestrado profissional, Programa de Pós-Graduação em Construção Metálica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2018.

Este trabalho estudou o elemento viga de rolamento, utilizado como apoio para a implantação de ponte rolante em edifícios industriais. O estudo se refere especificamente ao dano que pode sofrer o elemento quanto à fadiga, devido ao trabalho cíclico de translação de carga no comprimento do edifício industrial. O objetivo foi estudar a variação das opções de enrijecedores que podem ser utilizados no elemento tentando encontrar uma configuração que resulte em menor peso de material aplicado, tendo em vista ser o peso de aço utilizado na confecção da viga o responsável pelo valor econômico da peça. Assim, uma configuração com menor peso indicaria uma economia financeira no projeto do implemento, como também a metodologia de estudo com a simulação do implemento com a modelagem em programas de CAD – *Computer Aided Design* (Desenho assistido por computador) e análise em programas de CAE – *Computer Aided Engineering* (Engenharia assistida por computador) uma solução também econômica quanto ao projeto. Tendo se fixado à geometria e variação da quantidade dos enrijecedores, o estudo demonstrou ser possível alterar a geometria, diminuindo suas dimensões, assim como a alteração da quantidade de elementos intermediários, e assim vir a conseguir um aumento dos resultados quanto a resistência à fadiga da viga de rolamento estudada.

Palavras-chaves: Viga de rolamento; ponte rolante; enrijecedores, fadiga.

## **ABSTRACT**

### **STUDY OF STIFFENERS POSITION AND GEOMETRY IN BEAM ROLLING RESISTANCE TO FATIGUE**

This work studied the element beam rolling, used as support for the implantation of Overhead Cranes in industrial buildings. The study refers specifically to the damage that the element can suffer in terms of fatigue, due to the cyclical work of translating load on the length of the industrial building. The objective was to study the variation of the options of stiffeners that can be used in the element trying to find a configuration that results in a lower weight of applied material, considering the weight of steel used in the confection of the beam responsible for the economic value of the piece. Thus, a configuration with lower weight would indicate a financial saving in the project of the implement, as well as the methodology of study with the simulation of the implement with the modeling in programs of CAD - Computer Aided Design and analysis in programs of CAE - Computer Aided Engineering - an economical solution for the project. Considering the geometry and variation of the number of stiffeners, the study demonstrated that it is possible to alter the geometry, reducing its dimensions, as well as changing the number of intermediate elements, thus achieving an increase in fatigue resistance bearing beam studied.

Keywords: Rolling Beam; crane; stiffeners, fatigue.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISC – *American Institute of Steel Construction* - Instituto Americano de Construção de Aço

AISI – *Association of Iron and Steel* - Instituto Americano do Ferro e do Aço

ANSI – *American National Standards Institute* - Instituto Nacional Americano de Padrões

ASME – *American Society of Mechanical Engineers* - Sociedade dos Engenheiros Mecânicos dos Estados Unidos

ASTM – *American Society for Testing and Materials* - Sociedade Americana de Ensaios e Materiais

AWS – *American Welding Society* - Sociedade Americana de Solda

BIM – (Building Information Modeling – Modelagem de Informações da Construção).

CAD – *Computer Aided Design* - Desenho assistido por computador

CAE – *Computer Aided Engineering* - Engenharia assistida por computador

CAM – *Computer Aided Manufacturing* - Manufatura auxiliada por computador

CEMA – *Conveyor Equipment Manufacturers Association* - Associação de Fabricantes de Equipamentos para Transportadores

CR – Caminho de Rolamento

DIN – *Deutsches Institut für Normung* - Instituto Alemão para Normatização

ISO – *International Organization for Standardization* - Organização Internacional de Normalização

METs - Máquinas de Elevação e Transporte de Cargas

NBR – Norma Brasileira

PR – Ponte rolante

SAE – *Society of Automotive Engineers* - Sociedade de engenheiros automotivos

SW - SolidWorks

VR – Viga de Rolamento

VS – Viga Soldada



## SUMÁRIO

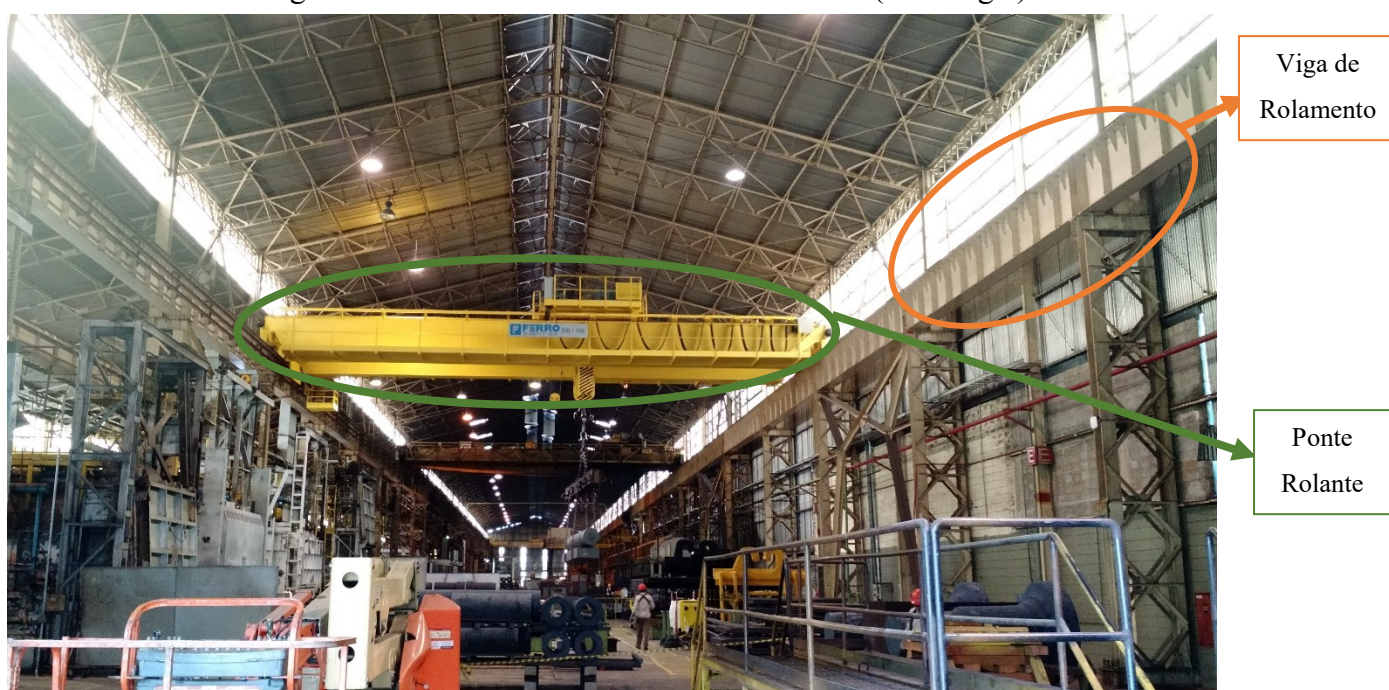
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1.OBJETIVO.....	13
1.2.JUSTIFICATIVA.....	13
1.3.METODOLOGIA .....	14
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>15</b>
2.1. VIGA DE ROLAMENTO .....	15
2.2. RECURSOS COMPUTACIONAIS .....	17
2.3. FADIGA.....	17
<b>3. MODELAGEM NÚMERICA.....</b>	<b>22</b>
3.1. GEOMETRIA DA VIGA DE ROLAMENTO .....	22
3.2. DEFINIÇÃO DA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS.....	23
3.3. APLICAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO E CARREGAMENTO .....	25
3.4. ANÁLISE DE UM RESULTADO DE TENSÃO NORMAL .....	27
3.5. ANÁLISE DE FADIGA NO ANSYS .....	28
3.6. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DO ESTUDO DE FADIGA .....	29
<b>4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>31</b>
4.1 VIGA ORIGINAL DEFINIDO POR BELLEI COM 3 ENRIJECEDORES.....	33
4.2 VIGA DEFINIDA POR BELLEI COM 2 ENRIJECEDORES.....	35
4.3 VIGA DEFINIDA POR BELLEI COM 1 ENRIJECEDORES.....	36
4.4 VIGA COM 3 ENRIJECEDORES CURTOS, ACIMA DO CENTROIDE.....	37
4.5 VIGA COM 2 ENRIJECEDORES CURTOS, ACIMA DO CENTROIDE.....	38
4.6 VIGA COM 1 ENRIJECEDOR CURTO, ACIMA DO CENTROIDE.....	39
4.7 VIGA COM 3 ENRIJ. CURTOS ARREDONDADOS, ACIMA DO CENTROIDE.....	40
4.8 VIGA COM 1 ENRIJECEDOR CURTO ARREDONDADO, ACIMA DO CENTROIDE ....	42
4.9 VIGA COM ENRIJECEDOR TIPO MÃO FRANCESA ACIMA DO CENTROIDE .....	43
4.10 VIGA COM 2 ENRIJECEDORES TIPO MÃO FRANCESA ACIMA DO CENTROIDE... 44	

4.11 VIGA COM 1 ENRIJECEDOR TIPO MÃO FRANCESA ACIMA DO CENTROIDE .....	45
4.12 VIGA COM MÃO FRANCESA ARREDONDADA.....	46
4.13 VIGA COM 2 ENRIJECEDORES TIPO MÃO FRANCESA ARREDONDADOS .....	48
4.14 RESUMOS DE RESULTADOS.....	49
<b>5 CONSIDERAÇÕES E SUGESTÕES .....</b>	<b>51</b>
5.1 CONCLUSÕES.....	51
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	51
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>52</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Dentro da estrutura cotidiana de suporte às atividades industriais, um dos equipamentos mais comumente encontrados no parque fabril é a Ponte Rolante, que tem a função de transporte de cargas de maneira elevada, no interior dos edifícios industriais. Este equipamento é constituído por três partes, a ponte propriamente dita, a viga de rolamento (caminho de rolamento, onde se desloca a ponte) e a estrutura do edifício industrial onde é apoiada a viga de rolamento e, por conseguinte a ponte, Figura 1.

Figura 1 – Ponte Rolante em edifício industrial (Siderurgia).



Fonte: Site Ferro indústria

Disponível em: <<http://www.ferroindustria.com.br/ponte-rolante-siderurgica>> Acesso em: 29 mar. 2018.

Por motivos de metodologia, primeiramente é dimensionada a ponte rolante, nas características que interessam ao cliente, capacidade de carga, altura de elevação e comprimento de translação. Esse dimensionamento é feito pelo fabricante da ponte. Tendo a ponte sido dimensionada, com a carga calculada, tanto a carga máxima de elevação da ponte acrescida da carga da própria estrutura da ponte somada suas demais características construtivas, como tipo de comando, cabine, ou cabo suspenso, tipo de estrutura, monoviga, dupla viga, etc., são então calculadas e dimensionadas as vigas de rolamento onde se apoiará a ponte. Com o peso das duas, ponte rolante e viga de rolamento e mais os esforços exigidos dos demais itens estruturais comuns a um edifício industrial, são, por fim, dimensionadas as colunas do edifício industrial, já com os respectivos consoles para as vigas de rolamento.

A relação entre o edifício industrial e a ponte rolante fica a cargo da viga de rolamento, elemento que faz a ligação entre os dois componentes desempenhando o papel de “sustentar o caminho de rolamento das pontes rolantes e transmitir os esforços por elas causados para as estruturas-suportes” (BELLEI, 2000, p.161). Sendo a ponte um elemento dinâmico de translação de carga no comprimento do edifício, a viga de rolamento passa a ser submetida a um esforço cíclico o que a coloca em situação de risco de sofrer desgaste por fadiga, conforme destaca SANTOS (2011) “A maioria das falhas em componentes mecânicos é devida mais a carregamentos variáveis que carregamentos estáticos. Estas falhas ocorrem tipicamente sob níveis de tensões menores que a tensão de escoamento do material. Porém as tensões se caracterizam por um grande número de repetições, levando o material ao estresse, o que é chamado de fadiga.” este efeito é responsável por mais da metade dos rompimentos súbitos de estruturas metálicas. Sendo assim, um assunto de suma importância a ser estudado, compreendido e levado em consideração quando do dimensionamento da estrutura. PRAVIA (2003) esclarece sobre o procedimento mais usado:

Para encarar o problema das fraturas produzidas por fadiga sob o enfoque dos estados limites de serviço e último de resistência de componentes ou estruturas existem vários procedimentos. Um dos procedimentos é o uso das curvas S-N, obtidas experimentalmente, as quais relacionam a variação de tensão ao número de ciclos aplicados para a formação e crescimento de uma fratura até um valor crítico, que pode gerar a falha de um componente estrutural, junto com leis de acúmulo de dano. Outro procedimento, aplica a mecânica da fratura linear elástica ou elasto-plástica. As normas recomendam, como regra geral, a aplicação do primeiro procedimento e recomendam o uso do segundo, quando for possível mensurar o tamanho da fratura. O objetivo desses procedimentos, ou metodologias, é assegurar a resistência e/ou estabilidade de componentes ou sistemas estruturais a fraturas por fadiga num certo tempo de vida em serviço (vida útil).

Quanto ao dimensionamento de uma estrutura, pode-se dizer que existem três tempos de solicitações a serem vencidos durante um projeto.

Primeiro, o tempo passado, que deve ser vencido pelo domínio da resistência da estrutura as solicitações durante ainda a construção e montagem da estrutura, um exemplo disso, e a resistência de uma ponte a qual durante a construção suas vigas da pista de rolamento estarão em balanço até o encontro da próxima coluna. Após o encontro de todas as vigas a resistência necessária será menor, porém, durante o projeto calcula-se como limite de resistência para esta ponte, as solicitações ainda na etapa de montagem quando a viga está em balanço.

A segunda etapa a ser vencida, o segundo tempo, é o presente, ou seja, deve-se calcular as solicitações as quais a estrutura estará sobre influência durante a sua utilização em vida, incluindo cargas externas, internas, dinâmicas, enfim, todas as solicitações que devem ser vencidas durante a utilização mais extrema.

Por fim, a estrutura deve vencer as solicitações futuras, nesse caso equacionando-se os valores de solicitações à estrutura com a resistência no futuro da estrutura, sendo que por ação do processo de fadiga, estima-se uma diminuição da resistência da estrutura, assim, para equacionar as solicitações do tempo futuro, ou se dimensiona a estrutura para suportar a vida infinita, o que exige uma estrutura mais resistente aos valores das solicitações em graus maiores do que simplesmente se exige para suportar as solicitações presentes de utilização, ou aceita-se que esta irá sofrer desgaste por fadiga e calcula-se um tempo mínimo onde as ações sobre a estrutura podem ter provido um desgaste por fadiga e, com esse tempo mínimo como referência, define-se o tempo regular para manutenção da estrutura com uma busca mais específica à trincas em soldas ou em áreas de maior solicitação.

### 1.1. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da geometria e posicionamento dos enrijecedores na resistência da viga de rolamento à fadiga. Tendo como base uma viga dimensionada dentro das normas de projeto, o objetivo foi criar uma série de variações de número e geometria dos enrijecedores desta diminuindo o peso total de aço usado em cada unidade de viga, estudando o efeito de novas soluções geométricas na resistência à fadiga.

Como um segundo objetivo, o trabalho visa ampliar a experiência nas análises computacionais a partir de elementos finitos e o volume de informações que possam auxiliar na conscientização quanto ao estudo do risco de desgaste por fadiga, demonstrando que por ser esse um efeito que ocorre abaixo do limite de solicitações últimas pode acabar sendo menosprezado durante a escolha das estruturas e também demonstrar o quão prático e rápido pode ser o estudo à estes efeitos com a utilização dos modernos programas CAE – *Computer Aided Engineering* (Engenharia assistida por computador).

### 1.2. JUSTIFICATIVA

A justificativa para o estudo é principalmente econômica, segundo SORDI (2016, p. 11) “no cenário atual a competitividade por melhores preços, redução de custos e desperdícios é fundamental para a sobrevivência de qualquer empresa”, logo o objetivo de estudar variações

no modelo do projeto para diminuir a quantidade de aço usado, sendo que como em estruturas como vigas de rolamento, o peso do aço é o elemento de referência para o custo econômico do projeto, torna o estudo de soluções mais econômicas fundamental para a vida de uma empresa.

Outro fator a justificar o estudo é a redução do aparecimento de patologias derivadas do desgaste por fadiga pelo estudo mais criterioso em CAE, assim como a melhor produtividade no projeto e futura montagem com a utilização de recursos computacionais, os quais podem facilmente vir a serem interligados a tecnologia BIM (Building Information Modeling – Modelagem de Informações da Construção).

### 1.3. METODOLOGIA

A metodologia empregada foi:

- Modelagem da viga de estudo em programa de tecnologia CAD (SOLIDWORKS, 2015), aproveitando assim os recursos deste programa tanto em produtividade quanto em precisão nesta tarefa;

- Transporte do modelo CAD para um programa CAE (ANSYS, 16), para o estudo da viga quanto a esforços e ciclo de trabalho à fadiga.

- Criação de variações da viga quanto ao número e geometria dos enrijecedores, variando, assim, o peso total de maneira a diminuir o mesmo.

- Realização de estudo por elementos finitos de cada um dos modelos criados.

- Comparação dos resultados procurando identificar existência de modos alternativos de enrijecedores quanto ao número e geometria que diminuam o gasto total em peso de aço da estrutura.

- A viga escolhida para o estudo foi uma viga tipo I construída em um perfil VS (Viga Soldado).

- A ponte rolante a qual a viga de rolamento irá trabalhar é uma ponte rolante com acionamento manual, sem cabine, com capacidade para 10 toneladas, dimensionada quanto à fadiga para condição de carregamento de 5 vezes ao dia em um prazo de 50 anos de utilização.

- São usados enrijecedores transversais para combater a flambagem lateral da alma.

- A Viga e enrijecedores são construídos em Aço ASTM A36.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Pontes rolantes são equipamentos utilizados na indústria com o objetivo de transporte de cargas dentro de um edifício industrial. Segundo BRASIL (1985, pag. 2) “possuem uma estrutura Horizontal em ponte que permite o movimento transversal de um guincho, simultâneo ou não com a translação da própria ponte”. Existem dois tipos principais, a ponte rolante e o pórtico. Sua diferenciação quanto a um pórtico é que a ponte rolante translada de forma aérea, sendo inclusive identificada como “Overhead Cranes”, (tradução literal seria: “guindaste sobre a cabeça”), ou seja, está apoiada sobre um trilho montado acima do nível das cabeças dos trabalhadores e dos outros equipamentos do edifício industrial o que contribuí para a segurança no ambiente de trabalho. O trilho ao qual a ponte rolante é apoiada por sua vez é montado sobre uma viga de suporte. Por sua vez, o pórtico está apoiado em trilhos no chão do edifício, estando assim na altura de outros equipamentos ou de pessoas, podendo colidir com estes durante sua operação normal. A Ponte Rolante por sua vez é montada sobre uma estrutura apoiada em consoles na estrutura do edifício industrial. Essa estrutura são as vigas de rolamentos, também chamados de caminho de rolamento.

### 2.1. VIGA DE ROLAMENTO

São elementos de ligação na estrutura, ligam o implemento Ponte Rolante ao edifício industrial. Podem ser construídas em concreto ou aço, sendo que este trabalho se refere à viga de rolamento construídas em aço soldado.

Por definição, conforme destaca SENA (2017):

“A viga de rolamento para ponte rolante é um componente fundamental do equipamento. Compostas por perfis metálicos, essas vigas possibilitam o deslocamento longitudinal da ponte rolante, transmitindo solicitações por ela causadas às demais estruturas da edificação. A movimentação tridimensional de cargas içadas pela ponte provoca um conjunto de solicitações que variam em magnitude e em posição e atuam ora isoladamente e ora combinadas. Estas cargas devem ser levadas em conta na elaboração dos cálculos estruturais de acordo com os princípios da estática das construções. As vigas de rolamento, além do efeito das cargas verticais, podem sofrer também efeitos da movimentação típica de pontes rolantes, como forças horizontais atuantes ao nível do topo do trilho dirigidas longitudinalmente ou transversalmente a ele.”

Para o caso estudado, foi considerado um galpão industrial. Suas colunas dimensionadas já com a inclusão da ponte rolante. Conforme BELLEI (2000), “já na concepção do edifício deve-se dimensionar o mesmo caso seja de interesse que o mesmo seja equipado com o implemento Ponte Rolante, devendo ser observadas as normas da ANSI/AISC 360-05 e NBR 8800 (ABNT, 2008).” Acrescenta-se a estas a norma implantada em 2013 para; Equipamentos de levantamento e movimentação de cargas – Comissionamento – Especificação, NBR 16147 (ABNT, 2013).

Também é nessa etapa que se dimensiona a viga de rolamento, escolhendo-o entre concreto e aço.

Conforme explica LEITE (2016),

A tipologia da viga de rolamento varia em função do carregamento da ponte e do vão livre da própria viga. Em função da carga suportada, é possível determinar a ordem de grandeza do vão esperado para a viga e, por sua vez em função do vão, é possível escolher as características do perfil da viga, tais como altura, largura das mesas, espessuras e a necessidade ou não do travamento lateral.

As vigas de rolamento são, em geral, formadas por perfil I, sendo que estes podem ser laminados ou soldados. O sistema de apoio das vigas pode ser projetado para que elas se comportem como elementos biapoiados ou contínuos, ficando a critério do projetista, conhecendo as vantagens de cada caso, escolher o mais adequado.

A tabela 1 resume as relações entre capacidade nominal da ponte, ordem de grandeza do vão livre da viga de rolamento, a necessidade ou não do travamento lateral e, havendo travamento, se é realizado apenas na mesa superior ou em ambas as mesas do perfil. É importante ressaltar que os vão da tabela 1 fazem referência a vigas biapoiadas e não necessariamente os valores podem ser replicados para sistemas de vigas contínuas, pois a continuidade da viga modifica a distribuição dos momentos fletores ao longo do vão.

**Tabela 1** - Relação entre a capacidade nominal da ponte rolante e características da viga de rolamento.

<b>Capacidade nominal da ponte rolante</b>	<b>Vão usual da viga de rolamento</b>	<b>Tipo de seção utilizada</b>
Até 50 kN	Até 6 Metros	Perfil I com dupla simetria sem travamento lateral
De 50 kN até 250 kN	Até 7 metros	Perfil I monossimétrico sem travamento lateral
De 50 kN até 250 kN	Vãos até 13 metros	Perfil I com contenção na mesa superior
Acima 250 kN	----	Perfil I ou caixão com contenção na mesa superior e inferior

Fonte: Leite (2016)



## 2.2. RECURSOS COMPUTACIONAIS

Para o desenvolvimento do trabalho será utilizado dois recursos computacionais, um em CAD, sistema que, segundo SILVA (2011), são softwares:

Desenvolvidos para auxiliar nas formas de representação do projeto, que são consideradas como representações externas ao pensamento do projetista, utilizadas não apenas como auxiliares da memória, mas também como facilitadores das tarefas de projeto, como, por exemplo, a melhor compreensão do problema e o compartilhamento de uma concepção com a equipe de projeto.

O programa CAD utilizado será o SOLIDWORKS 2015 x64 Edition, programa de modelagem paramétrica em CAD. Nesse programa, foi modelada a viga soldada de rolamento para posterior estudo das variações de geometria e números dos enrijecedores intermediários do elemento.

O uso da tecnologia de elementos finitos foi aplicada com o uso de um software do tipo CAE. Segundo AZEVEDO (2016) “Engenharia Auxiliada por Computador, CAE é o acrônimo em inglês de Computer Aided Engineering. Os softwares desta categoria ou área têm a finalidade de auxiliar o engenheiro nas decisões de algumas das etapas do desenvolvimento de projeto, em particular para o dimensionamento e a validação de projetos”.

Nesse trabalho foi usado o ANSYS Workbench.

## 2.3. FADIGA

Como salienta FONSECA (2017, 2019) “Projetos de estruturas são comumente baseados na condição de satisfazer dois estados limites últimos, o de ruptura e o de instabilidade do equilíbrio, no caso de componentes esbeltos comprimidos.” A fadiga pode ser considerada o terceiro estado limite a ser considerado e equacionado durante o projeto de uma viga de rolamento.

Fadiga é a redução gradual da capacidade de carga do componente, pela ruptura lenta do material, consequência do avanço quase infinitesimal das trincas (deformações plásticas) formadas no interior do mesmo, causado por carregamento cíclico mecânico ou termomecânico.

Conforme MANSUR (2011):

Pode-se definir a fadiga como sendo o processo de degradação localizada, progressiva e permanente, que ocorre em material sujeito a variações de tensões e deformações e que produzem a nucleação de trincas ou a completa fratura depois de um número suficiente de ciclos. O comportamento de um material submetido à fadiga é afetado por

sua composição química e sua microestrutura, como o tamanho dos grãos, inclusões e segregações no material, além dos efeitos do processamento térmico e mecânico aplicado ao material. Em dimensões microscópicas, tem-se o movimento de discordâncias e os diferentes mecanismos de multiplicação e interação destas com outros defeitos cristalinos. O movimento de discordâncias nos planos de deslizamentos promove a formação de bandas de deslizamento, com surgimento de extrusões e intrusões na superfície do material e eventual nucleação e subsequente propagação de trincas. Em dimensões macroscópicas tem-se a geometria, as dimensões do componente, a presença de entalhes e as condições de acabamento superficial. Estes fatores microscópicos e macroscópicos se unem para determinar a resistência do componente à fadiga.

É a causa mais comum de falha súbita dos componentes metálicos, entre 50% a 90% das causas destes. Além disto, como salienta GOMES (2011) apud WULPI (1985):

“A fratura por fadiga, normalmente, ocorre repentinamente e sem nenhum aviso prévio e em condições normais de operação, com tensões máximas abaixo do limite de escoamento do material. Obviamente, se as condições de serviço forem anormais, ou seja, com sobrecargas, ambiente corrosivos, entre outros, a possibilidade de falha por fadiga é aumentada.”

O estudo do desgaste por fadiga, se iniciou em 1829, a partir da publicação de resultados de testes por parte de Wilhelm A. J. Albert sobre correntes de ferro submetidas a carregamento cíclicos. Posteriormente August Wohler estudou a ruptura de eixos ferroviários entre os anos de 1852 e 1869 de onde veio o nome deste fenômeno, pois como ainda não se conhecia o mecanismo dessa falha, dizia-se na época que o material se “cansava” ou “fadigava”.

Acrescenta FARIA (2012):

À medida que o desenvolvimento tecnológico foi incorporando novos componentes e equipamentos, como nas indústrias automobilística e aeroespacial, submetidos continuamente a esforços dinâmicos e vibrações, o fenômeno de fadiga passou a representar a causa de mais de 90% das falhas em serviço. A falha por fadiga é particularmente imprevisível, pois acontece sem que haja qualquer aviso prévio, sendo de natureza frágil, mesmo em materiais dúcteis, no sentido de que existe pouca, quando alguma deformação plástica generalizada associada com a falha. O processo ocorre pela iniciação e propagação de trincas e, em geral, a superfície de fratura é perpendicular a uma direção de tensão de tração aplicada. Estruturas de compósitos em serviço são geralmente submetidas a cargas de fadiga. Danos por fadiga causam uma redução gradual nas propriedades mecânicas dos compósitos, tais como resistência e dureza.

Os estudos sobre fadiga são principalmente estatísticos pois um dos aprendizados que se adquiriu com o tempo é que o que ocasiona a área de nucleação da trinca inicial são trincas microscópicas, derivadas de defeitos microscópicos sobre os quais não se consegue ter total controle. Alguns desses defeitos acontecem devido à rugosidade, outros por causa de temperatura de resfriamento ou de fusão, pequenos impactos que podem gerar concentração de tensões etc.

Desta forma, não se consegue controlar todos os aspectos que influenciam a vida de uma peça. O que se pode é estimar um tempo básico para o qual a falha se originará e se propagará, para previsão da vida útil. Por essa estratégia de estudo, é que o assunto fadiga é abordado estatisticamente, considerando os ciclos de carga e descarga e a existência de imperfeições em todas as estruturas, por mais que se controle a qualidade da execução.

Além disto deve-se salientar a presença do processo de soldagem como fator agravante para aparecimento do dano por fadiga como salienta TREMARIN (2017):

O processo de soldagem implica na elevada taxa de transferência de calor, para formação das soldas e, por consequência, das conexões estruturais. Tal situação resulta na formação da Zona Afetada pelo Calor, inserção de tensões residuais e outras alterações termo metalúrgicas, ocorrendo a deterioração das propriedades mecânicas: ductilidade, tenacidade e outras no metal base. A relação dos temas-solda, projeto e fadiga não recebe um número de publicações necessárias para a importância do tema na literatura científica/técnica de circulação internacional/nacional, de modo que as abordagens em livros especializados são insuficientes. Os projetistas reduzem a estimativa de resistência das juntas soldadas à fadiga, a fim de manter a segurança operacional, o que ocorre em função dos danos metalúrgicos causados no metal base e da ausência de pesquisas aplicadas.

Por padrão o gráfico para estruturas de aço tem a forma demonstrada na Figura 1:

Figura 1 - Diagrama Padrão Curva S-N para Aço



Fonte: Do autor

Este gráfico se forma devido a utilização da metodologia de construção das curvas S-N. Conforme salienta STRZELECKI (2016), “O método mais comum para descrever a relação entre a vida de fadiga e a amplitude da carga para um regime de vida de fadiga limitado é uma regressão linear.”

Para a validação do experimento, foi calculado o gráfico para a viga em questão. Este pode ser feito a partir dos resultados diretos obtidos na equação de regência definida pela Norma NBR 8800 (ABNT, 2008), neste caso gerando um gráfico Linear.

Sobre a norma NBR 8800 (ABNT, 2008), FABEANE (2011) destaca:

A ABNT NBR 8800:2008, em seu anexo K, traz as prescrições necessárias para avaliação à fadiga dos elementos. O item K.2.7 deixa claro que a aplicação de tais prescrições é apenas válido para estruturas com adequada resistência à corrosão atmosférica ou sujeitas apenas a atmosferas levemente corrosivas e em temperaturas abaixo de 150°C.

A fórmula de avaliação à fadiga da norma da NBR 8800 (ABNT, 2008), que norteia o procedimento para calcular o ciclo de vida da peça a partir de uma tensão admissível na região crítica encontrada no anexo K, é:

$$F_{SR} = \left( \frac{327 \times C_f}{N} \right)^{0,333} \quad (01)$$

onde:

$C_f$  é a constante dada na Tabela K. 1 para a categoria correspondente;

$N$  é o número de ciclos de variação de tensões durante a vida útil da estrutura;

$\sigma_{th}$  é o limite admissível da faixa de variação de tensões, para um número infinito de ciclos de solicitação, dado na Tabela K. 1, em megapascal.

Para se encontrar os valores para  $C_f$  e  $N$ , deve ser identificada na tabela K.2 da norma NBR 8800 (ABNT, 2008), o grupo que pertence a estrutura a ser estudada, no caso escolhido, uma viga soldada em I, monossimétrica, com as características escolhidas no projeto. Para o caso estudado os valores encontrados então para as incógnitas são:

$$C_f = 120 \times 10^8$$

$$N = 500.000 \text{ (escolhida na definição do modelo numérico)}$$

Utilizando-se estes valores, calcula-se inclusive o valor da tensão mínima exigida para a estrutura alcançar a vida infinita. Utiliza-se como limites extremos o valor de ciclos calculado quando utilizado o valor mínimo de tensão admissível para a vida infinita e o valor de 20.000 ciclos, mínimo quantidade de ciclos aceitável pela norma NBR 8800 (ABNT, 2008) para se calcular a maior tensão admissível. Com estes valores monta-se uma tabela para um grupo de valores de ciclos escolhidos. Com os valores calculados, constrói-se o gráfico o qual este será um gráfico linear.

A curva calculada para a viga, como na norma não existe separação de categoria por ciclos, foi utilizado os valores de 20.000 ciclos como valor inicial, 100.000, 500.000 e

2.000.000 de ciclos, como valores intermediários, e o valor calculado pela formula (2.948.159 ciclos) como o valor para a vida infinita com uma tensão de 110MPa.

Para a viga de rolamento escolhida os valores de  $C_f$  e do limite de tensão admissível são respectivamente,  $1,20E+10$  e 110MPa. Com esses valores na formula da equação 01 encontram-se os seguintes valores expressos na tabela 2:

Tabela 2: Tabela de valores Ciclos X Tensão normal

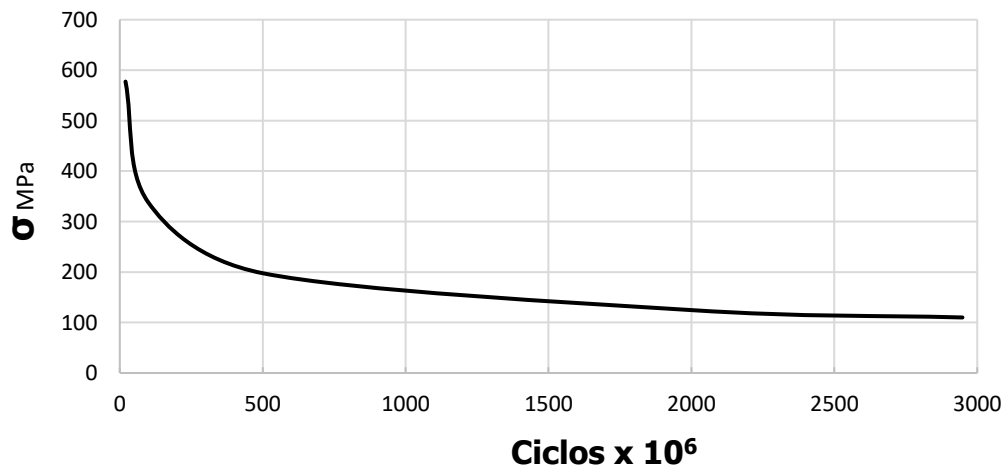
<b>Ciclos</b>	<b>20.000</b>	<b>100.000</b>	<b>500.000</b>	<b>2.000.000</b>	<b>2.948.159</b>
<b>MPa</b>	577	338	198	125	110

Fonte: Do autor

Assim, com a utilização direta desses valores (apenas com a divisão dos valores de ciclos por  $10^6$  no eixo X), criou-se a curva S-N linear abaixo.

Figura 2 – Diagrama S-N Linear

### Diagrama S-N



Fonte: Do autor

Estes valores deverão ser implementados ao programa de análise em Elementos Finitos (Ansys) para se avaliar a resistência a fadiga da viga estudada.

### 3. MODELAGEM NÚMERICA

#### 3.1. GEOMETRIA DA VIGA DE ROLAMENTO

A escolha da viga de rolamento usada neste trabalho foi de uma viga já calculada e certificada para ser usada como validação ao estudo. Sendo assim, foi escolhida a viga de rolamento apresentada no trabalho de BELLEI (2000) que apresenta memória de cálculo completa sendo possível usar a memória de cálculo como validação para a mesma.

O modelamento da viga foi realizado a partir do desenho da mesma em um software CAD, no caso escolhido o programa SolidWorks. A escolha de um programa CAD para o desenho e um programa CAE separado para a análise se deve, pois, os programas destinados ao desenho em CAD apresentam maiores recursos para este procedimento tornando o trabalho mais produtivo e assertivo.

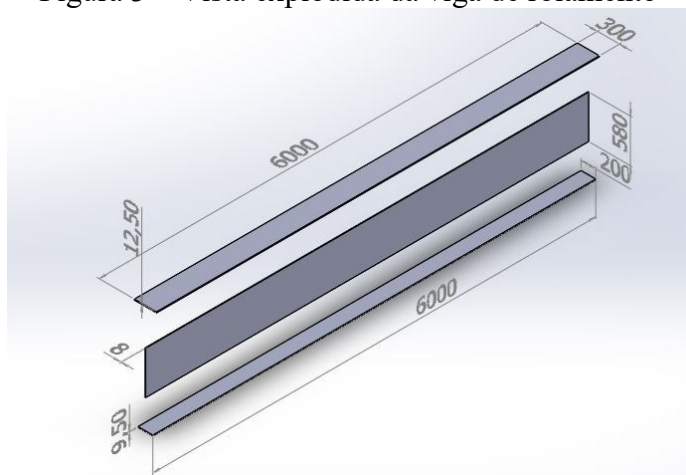
A geometria da viga de rolamento é composta por um perfil de Viga Soldada em I:

- Mesa superior com largura de 300 mm em chapa de 12,5 mm de espessura;
- Alma em chapa de 580 mm de largura com espessura de 8 mm;
- Mesa inferior com largura de 200 mm em chapa de 9,5 mm de espessura.

A viga possui 6000 mm de comprimento.

As peças são soldadas com cordões de solda de alta penetração de 6 mm entre a mesa superior e a alma e cordões de 5 mm nas demais chapas. conforme desenho na Figura 3.

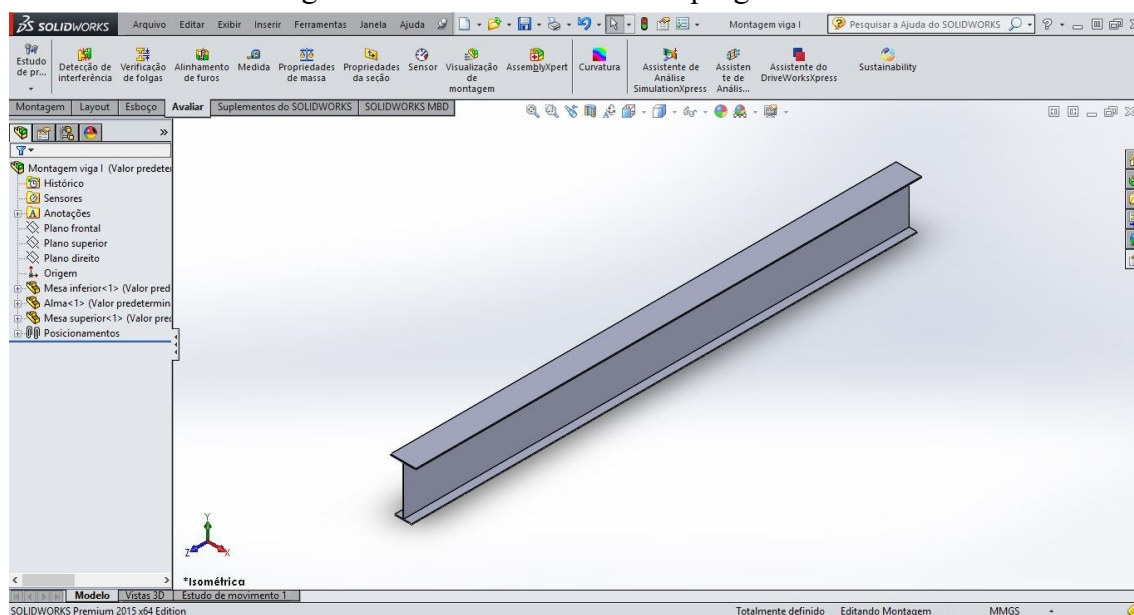
Figura 3 – Vista explodida da viga de rolamento



Fonte: Do autor

O desenho da viga em CAD foi realizado de maneira a se privilegiar a “leveza” do arquivo e produtividade, neste caso, após simulações foi aferido que a melhor estratégia para se atingir este objetivo era o modelamento isolado em arquivo “Part” de cada um modelo de chapa dos itens constituintes da viga e posterior montagem completa da viga em um arquivo “Montagem”. Quanto ao procedimento para este desenho e montagem não há recomendações específicas. O arquivo realizado para este trabalho segue abaixo na Figura 4, com um tamanho total do arquivo de 75 kb.

Figura 4 – Geometria criada em programa SolidWorks



Fonte: Do autor

### 3.2. DEFINIÇÃO DA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS

Após o procedimento de modelamento da viga, se iniciou o procedimento de análise em elementos finitos do modelo. O procedimento foi realizado no software Ansys.

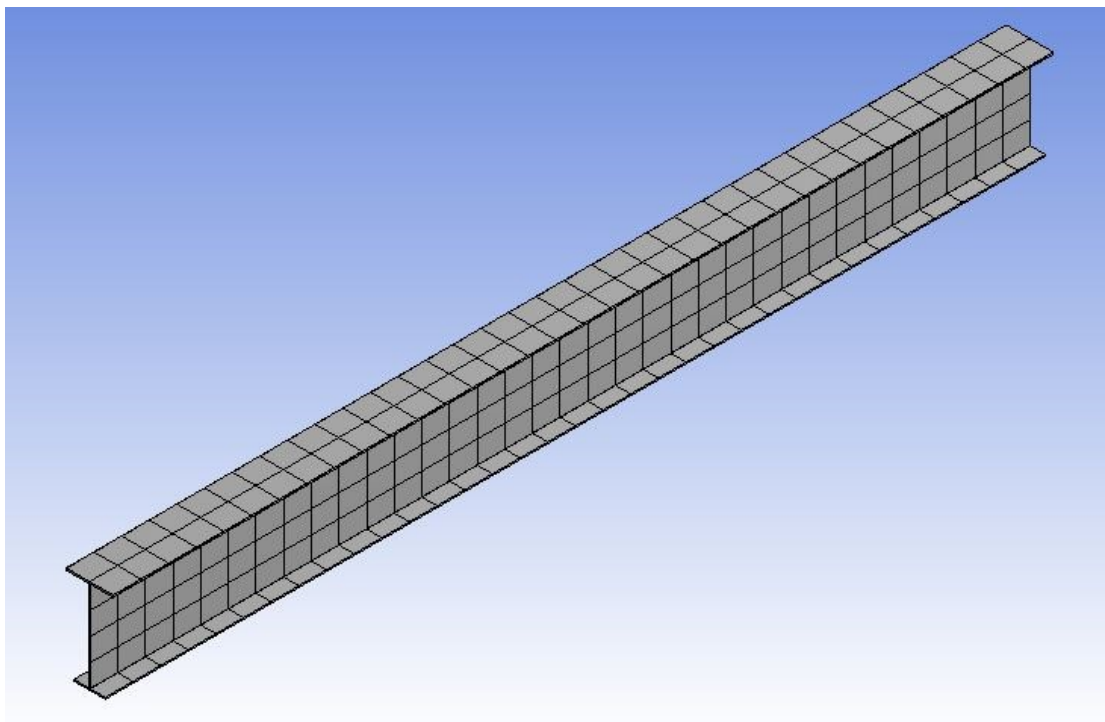
O procedimento de criação de um novo estudo de análise estrutural no programa assim como importação do arquivo do modelo criado no software CAD é padrão, foi conferida as informações de unidades utilizadas pelo programa, isso foi realizado na aba de “Engineering Data” do estudo criado. Nesta etapa foi inserido os dados da tabela de fadiga calculada anteriormente com os valores encontrados no anexo K, conforme já relatado no item 2 deste trabalho. Por padrão as unidades estão em Pa, recomenda-se também as alterar, passando-as para MPa.

Após a inserção do modelo importado do software CAD, foi aberto o aplicativo de Design Model (DM), para transformação do modelo CAD em modelo específico de manipulação do software Ansys, de extensão “.agdb”, e também para a inclusão de um ponto para aplicação pontual da carga a ser usada na simulação. Esse recurso, de criação de “POINT LOAD” é particular do programa Ansys e permite uma, posterior, correta aplicação da carga na área de análise. Na área de análise foram definidas as condições do modelo para o estudo.

Para se realizar o estudo foi definida uma malha dos elementos finitos, as condições de contorno, no caso os apoios de suporte da viga e a carga aplicada.

Com a Geometria já incorporada e aberta no “Model Mechanical” do Ansys, o primeiro item de estudo dimensionado foi a malha do elemento. Tendo como referência que deverá ser aplicada uma força na estrutura e esta será propagada especialmente pela alma, e sabendo-se que acima da mesa superior se montará o trilho por onde a ponte se desloca, escolheu-se um múltiplo da altura inteira da peça como referência para a malha. Refinou-se então a malha para um tamanho de 180 mm, sendo que a malha criada possui regularidade dos elementos em toda geometria e nos nós dos elementos nas áreas de transição entre chapas como mostrado na Figura 5.

Figura 5 –Malha de elementos finitos criada no programa Ansys

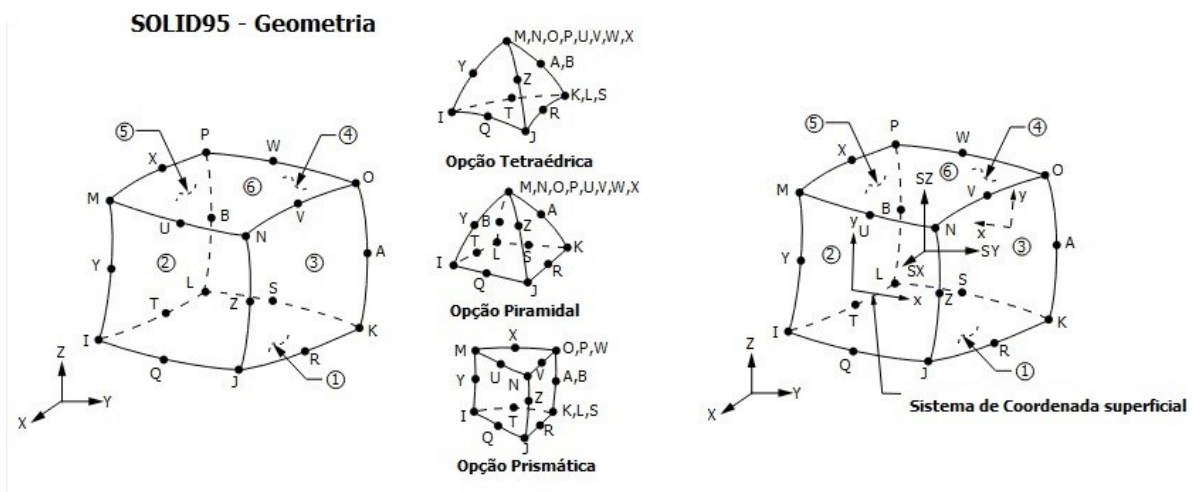


Fonte: Do autor



Por padrão o programa Ansys define o elemento padrão para construção dos elementos finitos do modelo o elemento tipo Sólido (Solid95), criado com elementos hexaédricos 20. Porém com a criação do “Point Load”, o programa recalcula a malha da barra superior usando o elemento, também tipo Sólido, porém, modelo Solid92, utilizando-se os recursos de edição da malha no programa, consegue-se alcançar uma malha uniforme apenas com o elemento Solid95. As características deste elemento são encontradas no arquivo de ajuda interno do programa e apresentadas na Figura 6.

Figura 6 – Característica constitucional do elemento Solid95

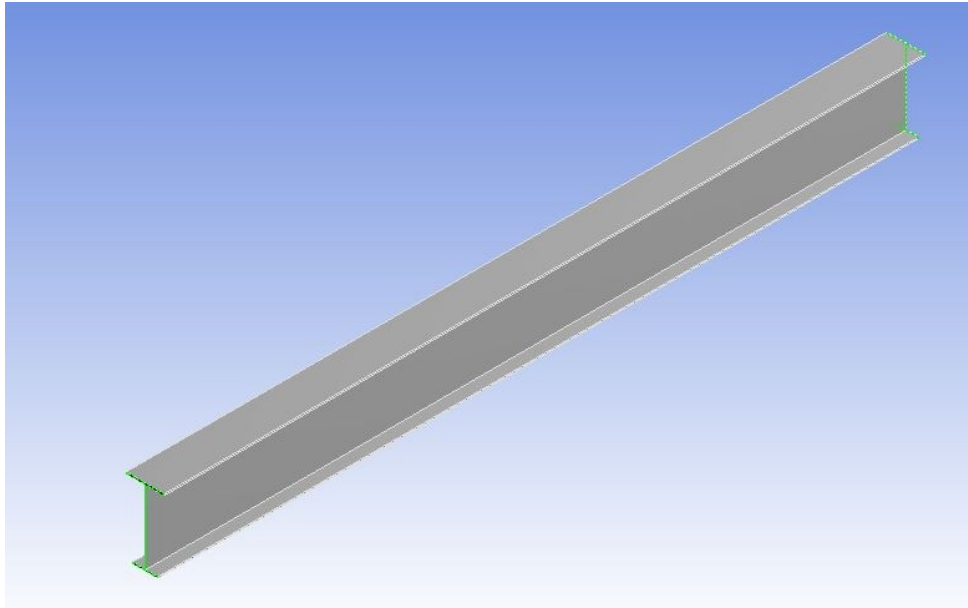


Fonte: Arquivo alterado do “ANSYS Help” interno do programa Ansys

### 3.3. APLICAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO E CARREGAMENTO

As condições de contorno aplicadas no estudo foram os apoios de restrição de movimento nas direções X e Y, liberando o elemento para se deslocar na direção Z. O procedimento foi realizado selecionando-se as faces laterais da viga. Deve-se notar que devido à geometria ter sido construída com chapas individuais, o programa reconheceu como seleção três faces em cada lado para aplicar as restrições. Pode ser feita a restrição com apenas a criação de um único comando, neste caso a seleção das faces dos dois lados da viga resultou em uma seleção de 6 faces para o programa, conforme pode se notar na Figura 7.

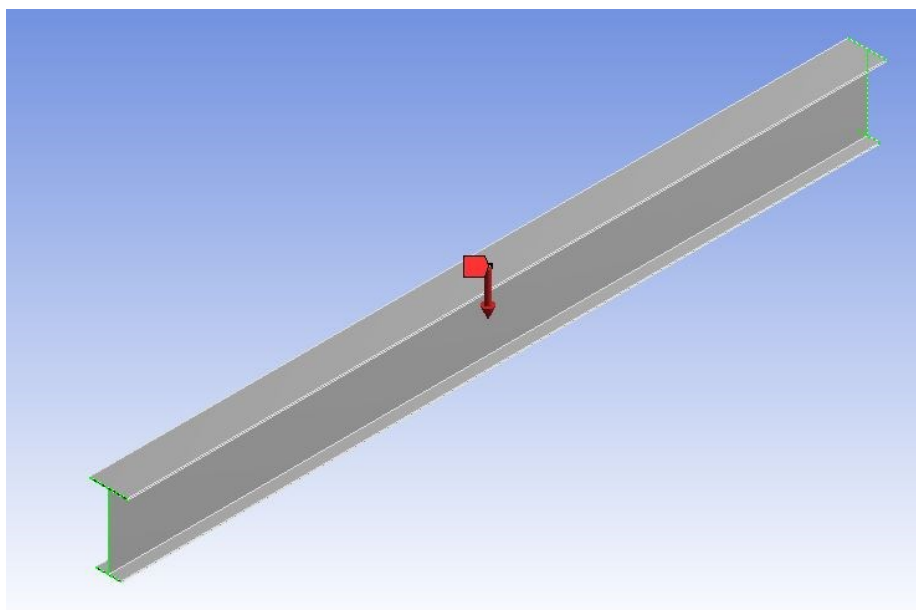
Figura 7 – Aplicação dos apoios em programa Ansys



Fonte: Do autor

Para realização do procedimento de aplicação da força, foi criado um ponto de aplicação de carga no “Design Model” previamente. Com a criação deste ponto, “Point Load”, como referência, foi aplicada uma carga de 200.000N no centro da peça, considerando ser esta a pior situação de esforço prevista em projeto. A aplicação desta força foi realizada com a utilização do sinal negativo, -200.000N, Figura 8, onde o sinal negativo é utilizado para direcionar a aplicação para baixo no eixo Y.

Figura 8 - Aplicação da força na direção y

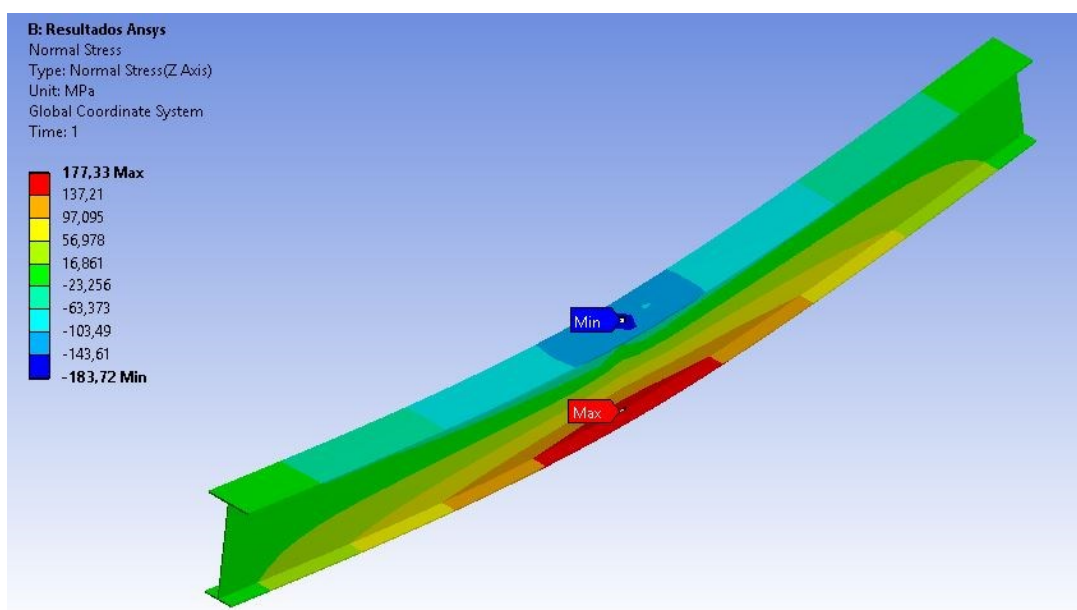


Fonte: Do autor

### 3.4. ANÁLISE DE UM RESULTADO DE TENSÃO NORMAL

Após o fim do modelamento, foi realizado o processamento da solução pelo programa, obtido o resultado tanto gráfico como também, caso seja de interesse do usuário, é possível ter os resultados em um arquivo de texto. O resultado para a análise no modelo numérico para a tensão normal na direção Z, direção longitudinal da viga é mostrado na Figura 9.

Figura 9 – Resultado da tensão normal na direção Z (MPa)



Fonte: Do autor

Para se validar o processo, foi calculado o valor da tensão na direção Z de maneira manual encontrando-se o valor de 178,86 MPa.

A comparação entre o resultado calculado pelo programa e algebricamente, mostra pequena diferença e valor (em torno de 1%), mas com semelhantes posições geométrica para os valores tanto da maior Tensão quanto a de maior compressão, sendo a de maior tensão calculada na Mesa Inferior, e compressão na mesa superior, o que valida a metodologia numérica aplicada.

### 3.5. ANÁLISE DE FADIGA NO ANSYS

Tendo sido assim criado e validado o modelo numérico da viga, segue à solução do problema de fadiga. O programa permite escolher com facilidade os resultados que se deseja calcular e, também, definir a metodologia de tratar a geometria como uma viga, isso permite uma análise sequencial mais prática e rápida.

Após a escolha da primeira análise de uma tensão, pode-se escolher o estudo da fadiga a ser realizado. A primeira opção de escolha é o da qualidade da superfície, sendo esta variando-se de 0,1 até 1, onde 1 é o material liso polido.

O estudo foi configurado “Alternado” quanto ao modelo de carregamento. Entre as opções deste existe o carregamento alternado, pulsante, variado e com histórico de dados. Como dito, para o caso estudado usaremos o tipo “Fully Reversed” (Alternado).

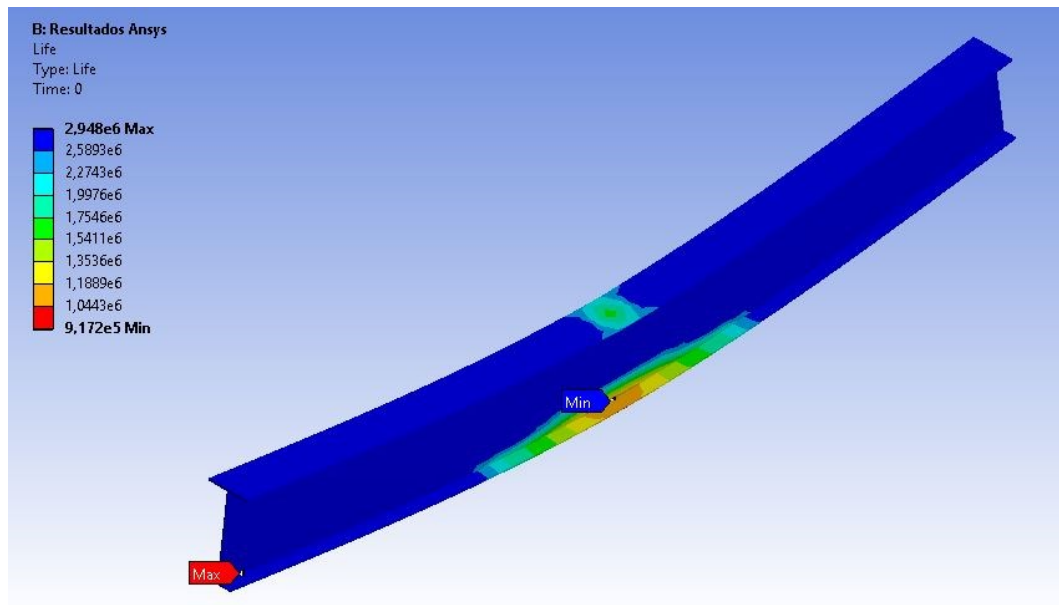
As opções seguintes são em relação ao estudo dos resultados, ou seja, qual tipo de análise será realizada. As opções podem ser “Stress Life” estudo baseado na relação da vida à fadiga com relação a tensão sofrida pelo material ou “Strain Life”, estudo em relação a deformação sofrida pelo material. No caso deste estudo usa-se o “Stress Life”. Esta escolha resulta em novas opções de escolha para o item, “Mean Stress Theory”, teoria da tensão média, deve-se escolher então se não será usado nenhuma teoria de distribuição dos resultados de tensões médias ou caso seja escolhido um tipo de distribuição, pode-se definir qual o fator gráfico de distribuição dos resultados de tensões médias escolher, no caso de levantamento de carga o mais indicado é o modelo de Soderberg, apesar de o mais conservador, é exatamente o modelo que consegue abranger com mais segurança os resultados. Após isto foi selecionado o componente de tensão usado para os cálculos, foi mantido o padrão que é o Equivalent (von Mises). E por fim foi definida as unidades da vida a ser usado para o cálculo, poderia se escolher entre ciclos de trabalho, anos, entre outros, foi usado como referência o “Cycles”.

Existe a opção de se buscar como resultados, vida, danos, fator de segurança e outros. Nosso estudo será limitado ao resultado de vida, pois é o mais importante entre estes, inclusive para comparação entre métodos de estudo de fadiga entre as diversas normas existentes. É o estudo em relação a “Life” (Vida) que tem objetivo de definir, a partir dos estudos estatísticos, o número de ciclos, seguros, aos quais a peça pode passar até que esteja sujeita a falha.

### 3.6. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DO ESTUDO DE FADIGA

Após o fim da modelagem, executa-se a rotina matemática do programa e pode-se avaliar o resultado encontrado para a vida à fadiga, mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Resultado da Vida à Fadiga (ciclos)



Fonte: Do autor

O resultado é calculado a partir dos valores de tensão máxima e mínima calculados para a tensão normal mais o dado da tensão última do material. A formula de avaliação à fadiga da norma da NBR 8800 (ABNT, 2008), que norteia o procedimento para calcular o ciclo de vida da peça a partir de uma tensão admissível na região crítica é:

$$F_{SR} = \left( \frac{327 \times C_f}{N} \right)^{0,333} \quad (01)$$

onde:

$C_f = 120 \times 10^8$  (Tabela K.1 – norma da NBR 8800 (ABNT, 2008));

$N = 500.000$  (escolhida na definição do modelo numérico)

Nestas condições obtém-se o resultado de tensão admissível:

$$F_{SR} = \left( \frac{327 \times 120 \times 10^8}{500.000} \right)^{0,333} = 197,68 \text{ MPa} \quad (02)$$

Vale ressaltar que o que rege a vida à fadiga são 3 fatores primordiais, material da peça, geometria e carga solicitante, por isso não existe uma gráfico tabelado, cada peça, dentro da sua peculiaridade de geometria e carga, gera um diagrama S-N, porém, a consulta a este diagrama e feita com a utilização do valor correspondente para o carregamento, por exemplo para o caso estudado, de um carregamento alternado, se usaria como referência a tensão alternada calculada pela equação:

$$\sigma_a = \sigma_e \left[ 1 - \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_u} \right)^x \right] \quad (03)$$

onde:

$\sigma_a$  = Tensão Alternada;

$\sigma_e$  = Limite de resistência a fadiga;

$\sigma_m$  = Tensão média;

$\sigma_u$  = Tensão última obtido em ensaio estático (No caso da linha de Soderberg,  $\sigma_u = \sigma_e$ );

x = o qual será definido pelo método escolhido;

1 para linha de Goodman e Soderberg;

2 para Parábola de Gerber,

Isto seria útil quando realizado o estudo de maneira manual, pois seria humanamente impossível se calcular a tensão em cada ponto da peça, e posteriormente, também calcular em cada ponto novamente o valor de ciclos para cada tensão. No entanto, com a utilização do recurso computacional, esses cálculos, em cada ponto, se transformam nos cálculos em cada célula da malha de elementos finitos e é realizado facilmente pelo programa, logo a análise da vida à fadiga pode ser feita diretamente com os valores exatos dos valores de tensões calculados em todos os pontos da malha.

A análise do resultado, 917.200 ciclos (Figura 10), cabe algumas considerações:

- Como a norma define que para ser aprovado quanto a fadiga a estrutura deve ser capaz de superar 20.000 ciclos, a estrutura está aprovada quanto a Norma;

- Como o projeto define como objetivo uma vida de 500.000 ciclos, escolha do projetista, também neste quesito a estrutura também está aprovada. Sendo assim, validando a estrutura, o processo de modelamento numérico e a análise dos resultados computacionais.

#### **4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

O modelo a ser usado como referência é o apresentado em BELLEI (2000) e foram testadas variações da geometria e do número de enrijecedores intermediários da viga. Sendo assim, foram feitos 13 modelos de viga para estudo.

- Viga originalmente definida na literatura por BELLEI com 3 enrijecedores;
- Viga do BELLEI com 1 enrijecedor intermediário;
- Viga do BELLEI com 2 enrijecedores intermediários;
- Viga com alteração no enrijecedor intermediário utilizando 1 enrijecedor curto de comprimento baseado na linha de posição do centroide;
- Viga com alteração no enrijecedor intermediário utilizando 2 enrijecedores curtos de comprimento baseado na linha de posição do centroide;
- Viga com alteração no enrijecedor intermediário utilizando 3 enrijecedores curtos de comprimento baseado na linha de posição do centroide;
- Viga com alteração no enrijecedor intermediário utilizando 1 enrijecedor arredondado de comprimento baseado acima da posição do centroide;
- Viga com alteração no enrijecedor intermediário utilizando 3 enrijecedores arredondados de comprimento baseado acima da posição do centroide;
- Viga com alteração no enrijecedor intermediário utilizando 1 enrijecedor com desenho do tipo mão francesa de comprimento baseado acima da posição do centroide e comprimento da aba da mesa;
- Viga com alteração no enrijecedor intermediário utilizando 2 enrijecedores com desenho do tipo mão francesa de comprimento baseado acima da posição do centroide e comprimento da aba da mesa;
- Viga com alteração no enrijecedor intermediário utilizando 3 enrijecedores com desenho do tipo mão francesa de comprimento baseado acima da posição do centroide e comprimento da aba da mesa;

- Viga com alteração no enrijecedor intermediário utilizando 1 enrijecedor com desenho de mão francesa arredondado de comprimento baseado acima da posição do centroide e comprimento da aba da mesa;

- Viga com alteração no enrijecedor intermediário utilizando 3 enrijecedores com desenho de mão francesa arredondado de comprimento baseado acima da posição do centroide e comprimento da aba da mesa;

As escolhas dos modelos foram baseadas no pressuposto da ação das tensões cíclicas máximas serem calculadas na parte superior da viga, acima do centroide, na região de atuação das rodas. Logo considerou-se que para a resistência da fadiga apenas, caso que o estudo se propõe, o local de atuação dos enrijecedores deveria ser fixado a partir desta área.

A utilização dos enrijecedores com arredondamento foi escolhido devido a propagação das tensões sempre se dá de forma circular, logo se escolheu testar as peças arredondadas para comparação com o corte reto.

E a variação do número de enrijecedores para mudar a posição dos enrijecedores deslocando-os da linha de atuação da carga.

A Viga de rolamento básica é composta por um perfil VS em I:

- Mesa superior com largura de 300 mm em chapa de 12,5 mm de espessura;

- Alma em chapa de 580 mm com espessura de 8 mm;

- Mesa inferior com largura de 200 mm em chapa de 9,5 mm de espessura.

A viga possui 6000 mm de comprimento.

As peças são soldadas com cordões de solda de alta penetração de 6 mm entre a mesa superior e a alma e cordões de 5 mm nas demais chapas.

Enrijecedores transversais completos nas extremidades montados a uma distância de 10 mm das faces externas das mesas superior e inferior.

Enrijecedores produzidos com medidas de 100 mm de largura e 8mm de espessura.

Todas as vigas produzidas em Aço ASTM A36.

Ligação completa entre enrijecedores das extremidades soldados à mesa superior, alma e mesa inferior.



#### 4.1 VIGA ORIGINAL DEFINIDO POR BELLEI COM 3 ENRIJECEDORES

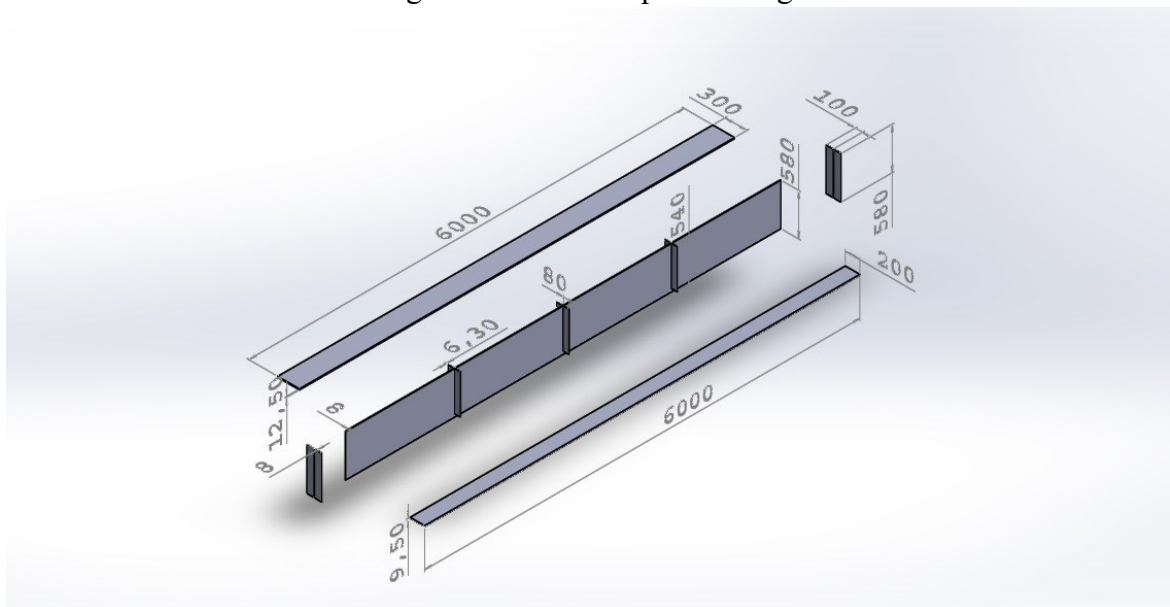
No modelo definido em BELLEI (2000), são aplicados 6 enrijecedores intermediários, 3 de cada lado da viga.

Enrijecedores intermediários produzidos com medidas de 80 mm de largura e 6,3 mm de espessura em Aço ASTM A36.

Enrijecedores intermediários são ligados por solda à mesa superior e a alma, porém têm comprimento(540 mm) inferior a altura da alma(580 mm), sendo assim deixando espaço na parte inferior sem contato com a mesa inferior.

Viga modelada no programa SolidWorks com a mesma metodologia da viga anteriormente apresentada, Figura 11.

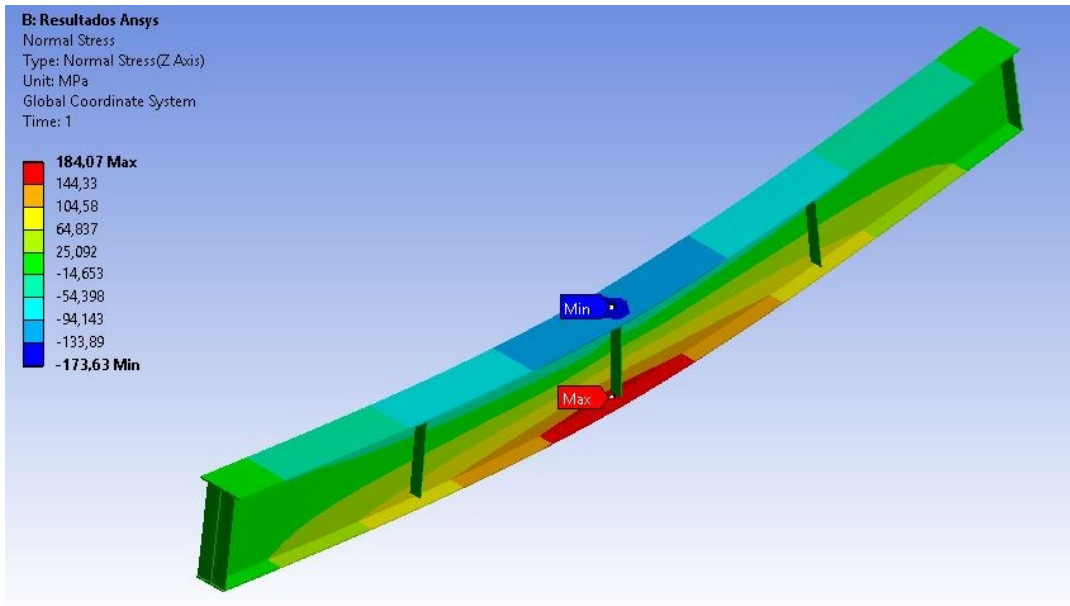
Figura 11 – Vista explodida Viga Bellei



Fonte: Do autor

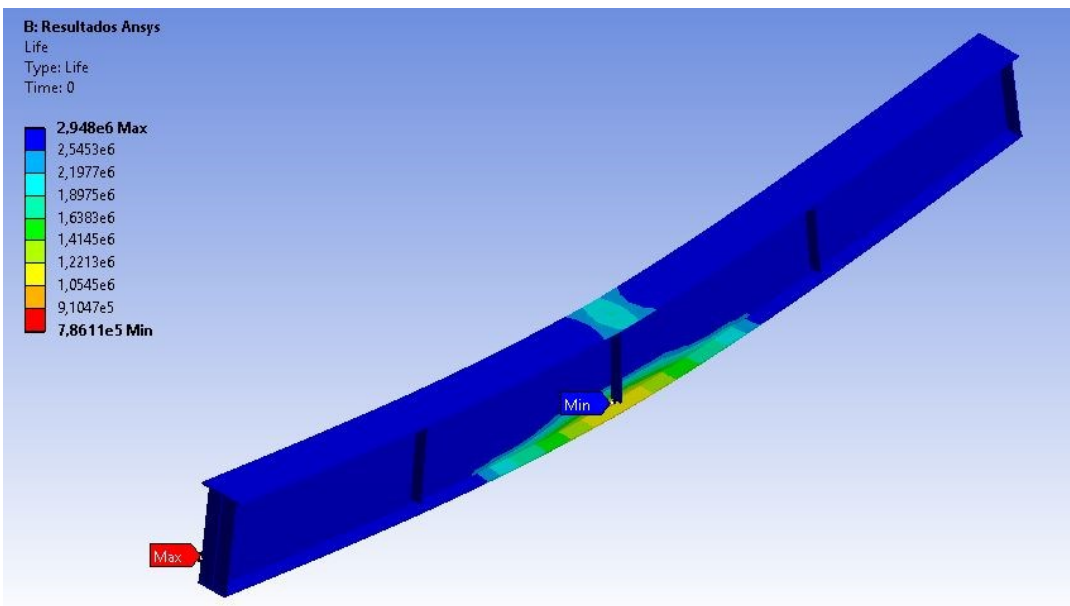
As definições da malha e das condições de contorno são conforme o indicado no capítulo 3, assim como o procedimento descrito para determinação dos valores da Tensão Normal na direção Z (von Misses) e ciclos de vida à fadiga pelo critério de Soderberg. A Figura 12 apresenta as tensões normais, sendo indicados seus valores em MPa. A Figura 13 apresenta o número de ciclos suportado pela viga quanto à fadiga. A figura apresenta a distribuição ao longo da estrutura e é destacado o número máximo de ciclos resistidos na região crítica da viga, o que na realidade, por ser a região crítica, significa o mínimo de ciclos seguros em toda a estrutura.

Figura 12 – Viga Original Bellei – Tensão Normal (MPa)



Fonte: Do autor

Figura 13 – Viga Original Bellei - Fadiga (ciclos)

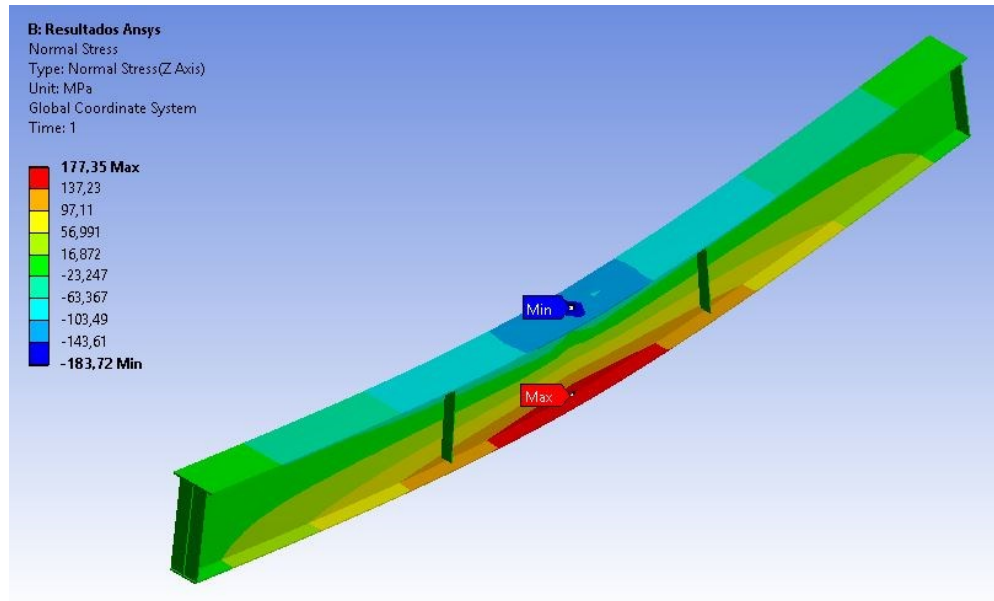


Fonte: Do autor

## 4.2 VIGA DEFINIDA POR BELLEI COM 2 ENRIJECEDORES

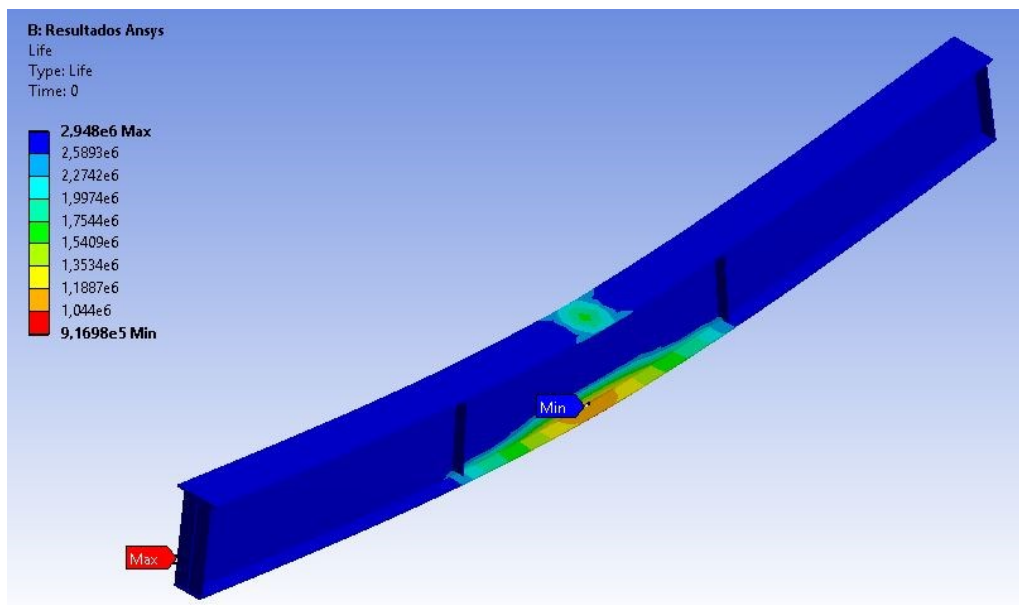
São mantidas todas as características da Viga Original de Bellei, substituindo apenas quantidade dos enrijecedores intermediários. Reduzindo-os de 6 enrijecedores, 3 de cada lado, para 4 no total, 2 de cada lado, distribuídos equidistantes na alma.

Figura 14 – Viga Bellei com 2 enrijecedores – Tensão Normal (MPa)



Fonte: Do autor

Figura 15 – Viga Bellei com 2 enrijecedores – Fadiga (ciclos)

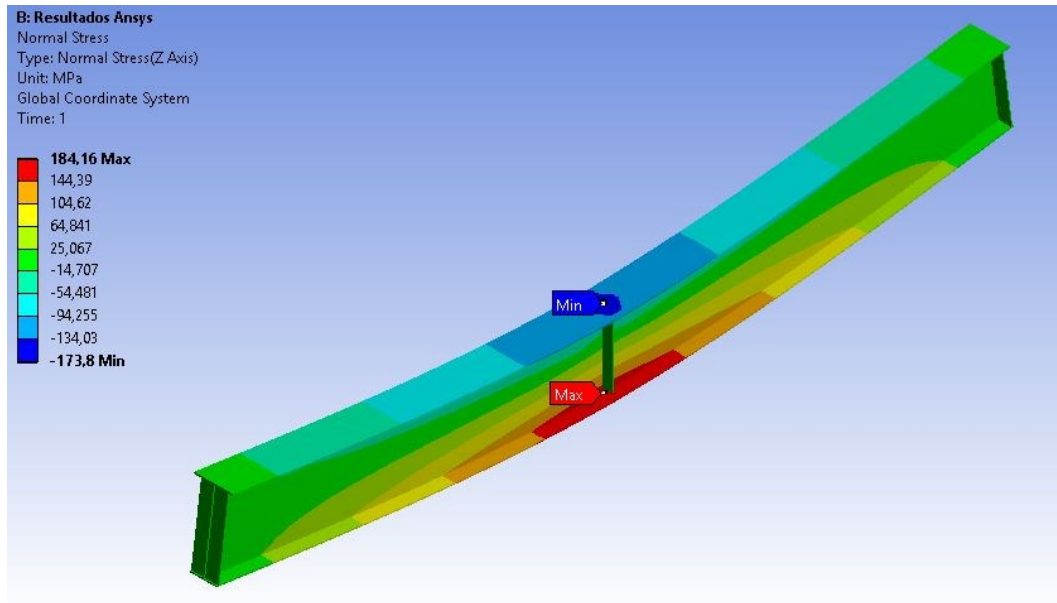


Fonte: Do autor

#### 4.3 VIGA DEFINIDA POR BELLEI COM 1 ENRIJECEDORES

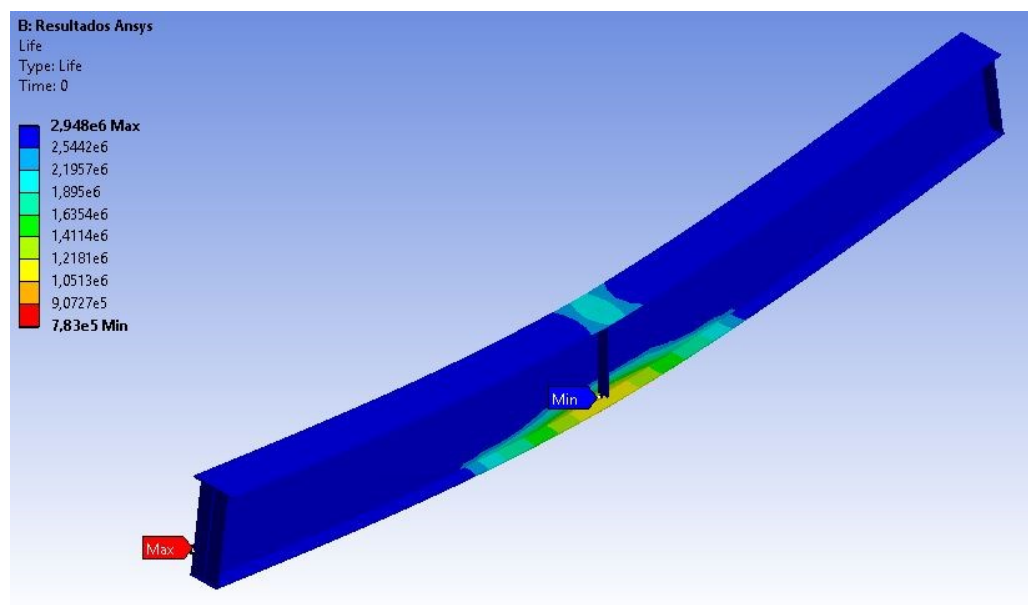
São mantidas todas as características da Viga Original de Bellei, substituindo apenas quantidade dos enrijecedores intermediários. Reduzindo de 6 enrijecedores, 3 de cada lado, para 2 no total, 1 de cada lado, aplicados no centro da alma.

Figura 16 – Viga Bellei com 1 enrijecedor – Tensão Normal (MPa)



Fonte: Do autor

Figura 17 – Viga Bellei com 1 enrijecedor – Fadiga (ciclos)



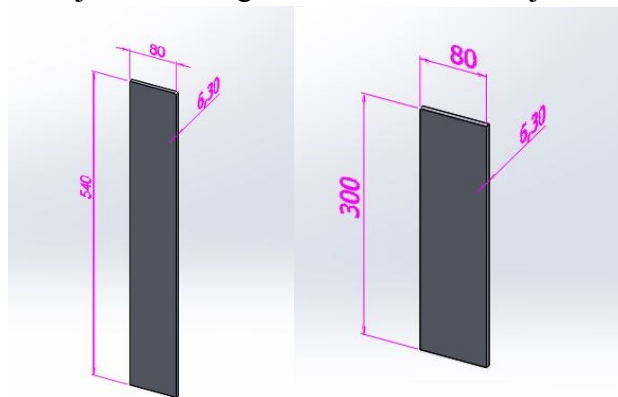
Fonte: Do autor

#### 4.4 VIGA COM 3 ENRIJECEDORES CURTOS, ACIMA DO CENTROIDE

São mantidas todas as características da Viga Original de Bellei, substituindo apenas os enrijecedores intermediários.

Modelos de enrijecedores testados nesta etapa são de mesmo material e espessura alterando-se apenas a geometria. Geometria difere do enrijecedor “original” apenas no comprimento, passando dos 540mm originais para 300mm nesse modelo, conforme Figura 18.

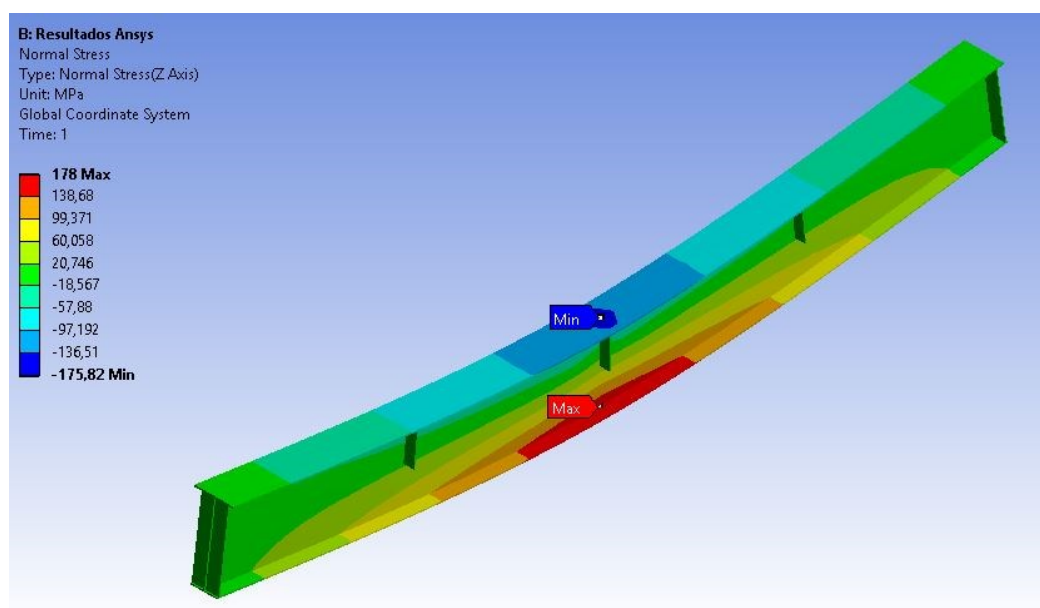
Figura 18 – Enrijecedor “Original” de Bellei X Enrijecedor Reto curto



Fonte: Do autor

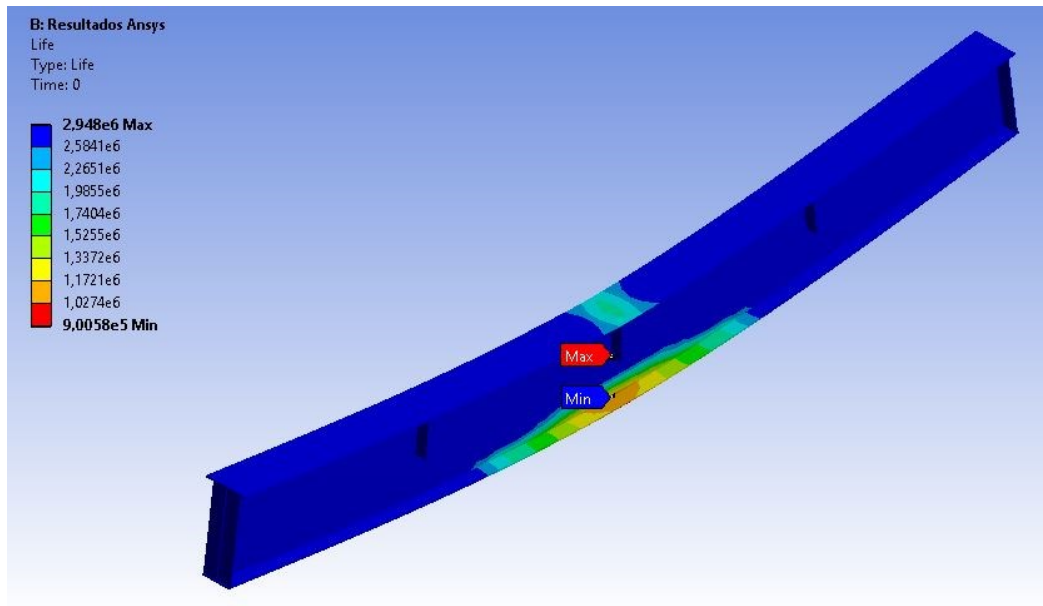
Resultados para estudo de Tensão Normal na direção Z, tensões de von Mises e ciclos de vida à fadiga pelo critério de Soderberg.

Figura 19 – Viga com 3 enrijecedores curtos – Tensão Normal (MPa)



Fonte: Do autor

Figura 20 – Viga com 3 enrijecedores curtos – Fadiga (ciclos)

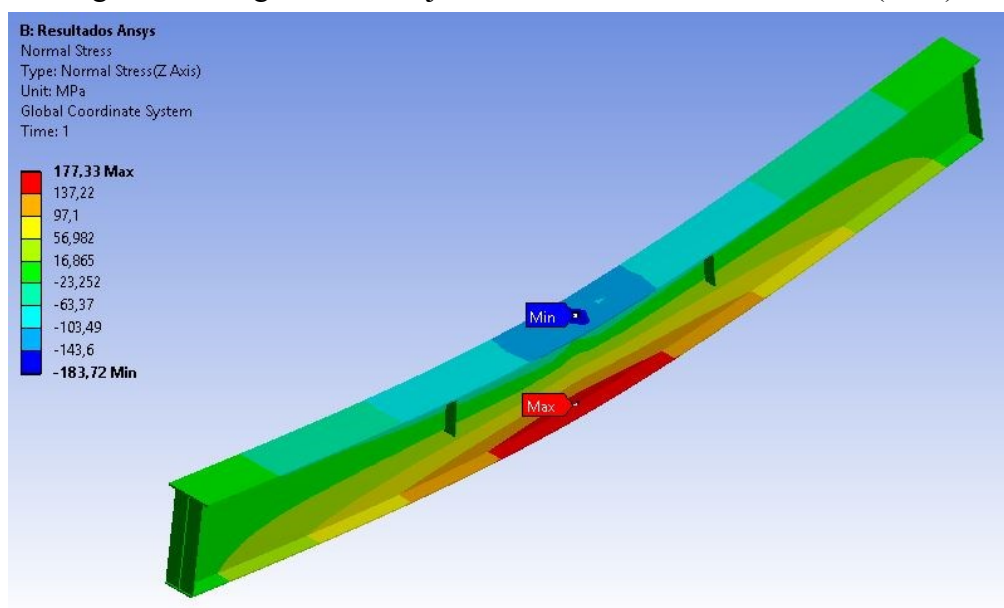


Fonte: Do autor

#### 4.5 VIGA COM 2 ENRIJECEDORES CURTOS, ACIMA DO CENTROIDE

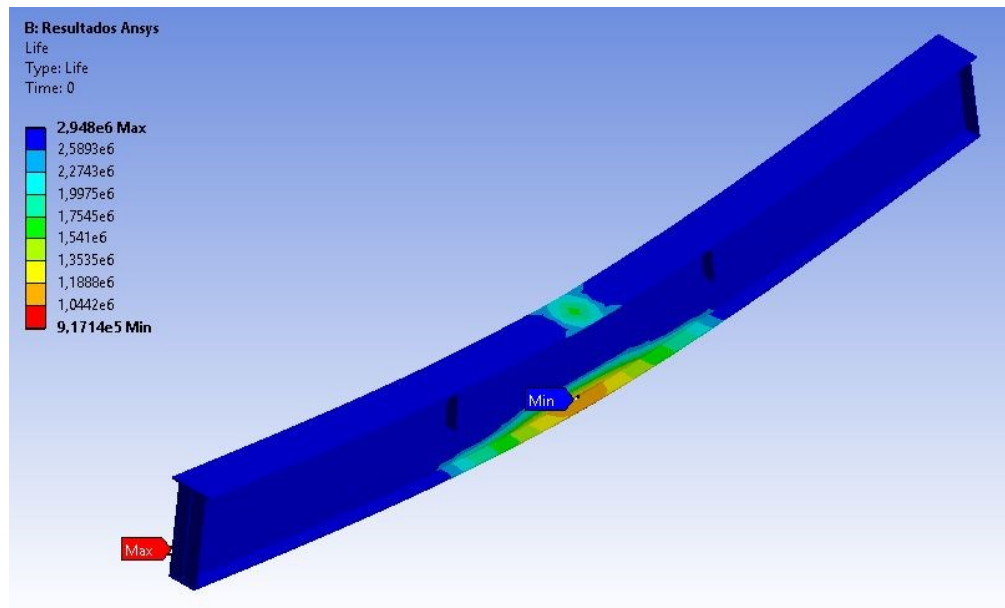
Mantidas todas as características do modelo anterior alterando apenas a quantidade de enrijecedores intermediários curtos, reduzindo de 6 no total para 4, 2 de cada lado aplicados equidistantes na alma.

Figura 21 – Viga com 2 enrijecedores curtos – Tensão Normal (MPa)



Fonte: Do autor

Figura 22 – Viga com 2 enrijecedores Curtos - Fadiga (ciclos)

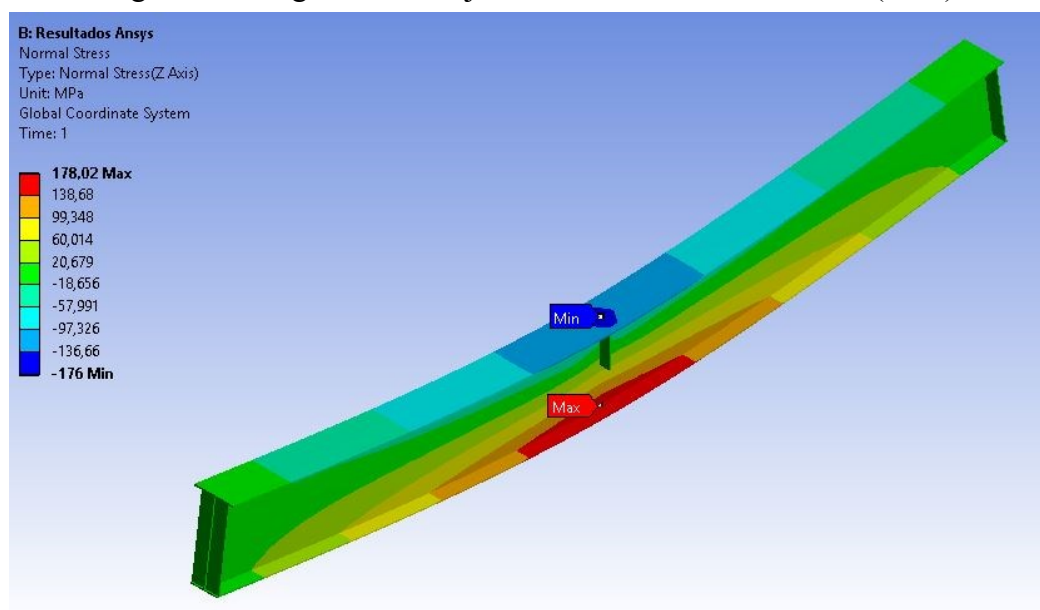


Fonte: Do autor

#### 4.6 VIGA COM 1 ENRIJECADOR CURTO, ACIMA DO CENTROIDE

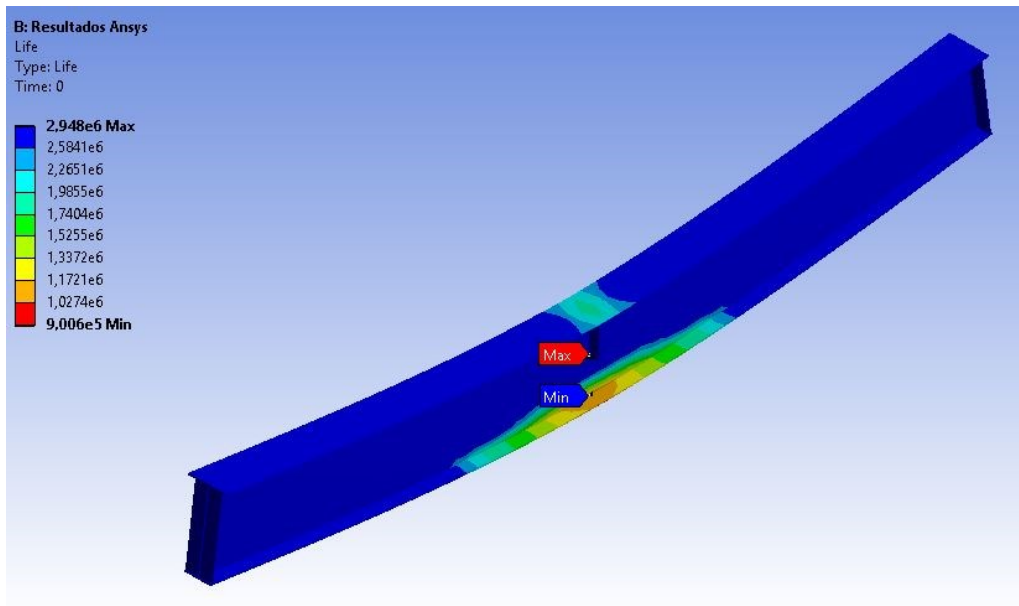
Mantidas todas as características do modelo anterior alterando apenas a quantidade de enrijecedores intermediários curtos, reduzindo de 4 no total para 2, 1 de cada lado aplicados no meio da alma.

Figura 23 – Viga com 1 enrijecedor curto – Tensão Normal (MPa)



Fonte: Do autor

Figura 24 – Viga com 1 enrijecedor curto – Fadiga (ciclos)

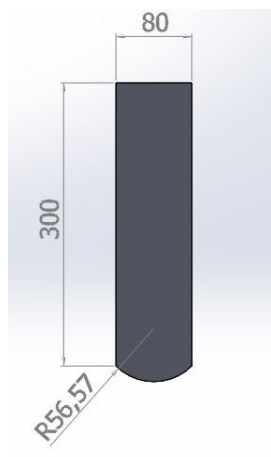


Fonte: Do autor

#### 4.7 VIGA COM 3 ENRIJECEDORES CURTOS ARREDONDADOS, ACIMA DO CENTROIDE

Modelos de enrijecedores testados nesta etapa são de mesmo material e espessura, alterando-se apenas a geometria. Geometria difere do enrijecedor original no comprimento, passando dos 540mm originais para 300mm nesse modelo, e pelo corte arredondado na parte inferior conforme Figura 25.

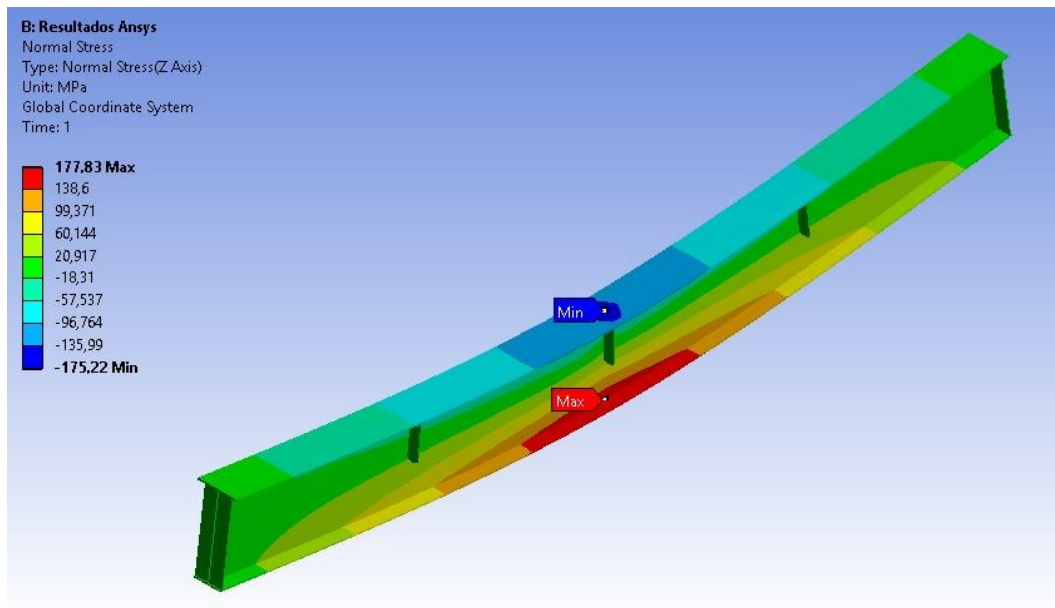
Figura 25 - Enrijecedor arredondado, acima do centroide



Fonte: Do autor

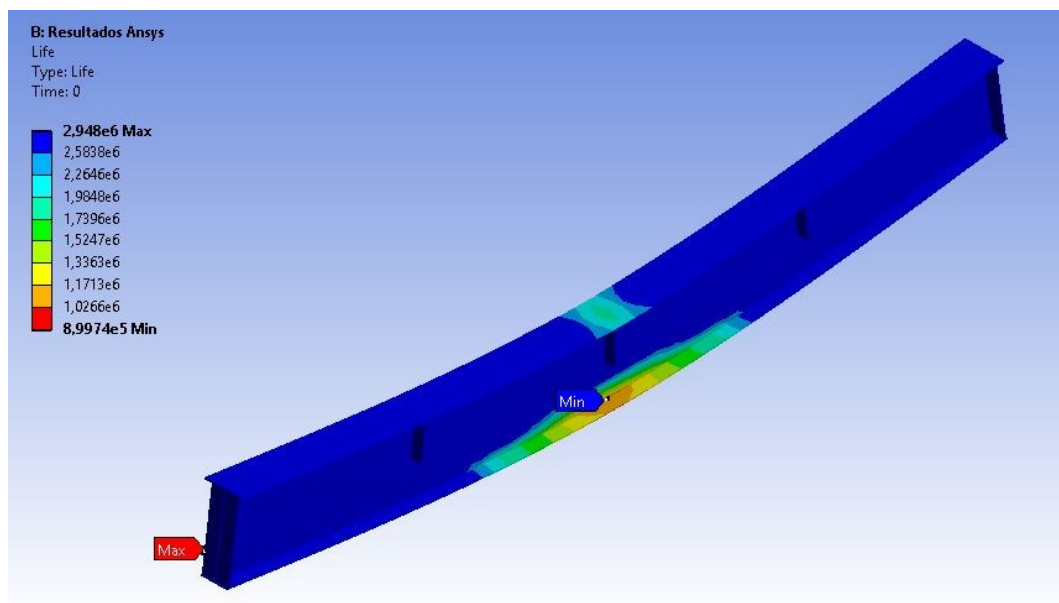


Figura 26 –Viga com 3 enrijecedores arredondados – Tensão Normal (MPa)



Fonte: Do autor

Figura 27– Viga com 3 enrijecedores arredondados - Fadiga (ciclos)

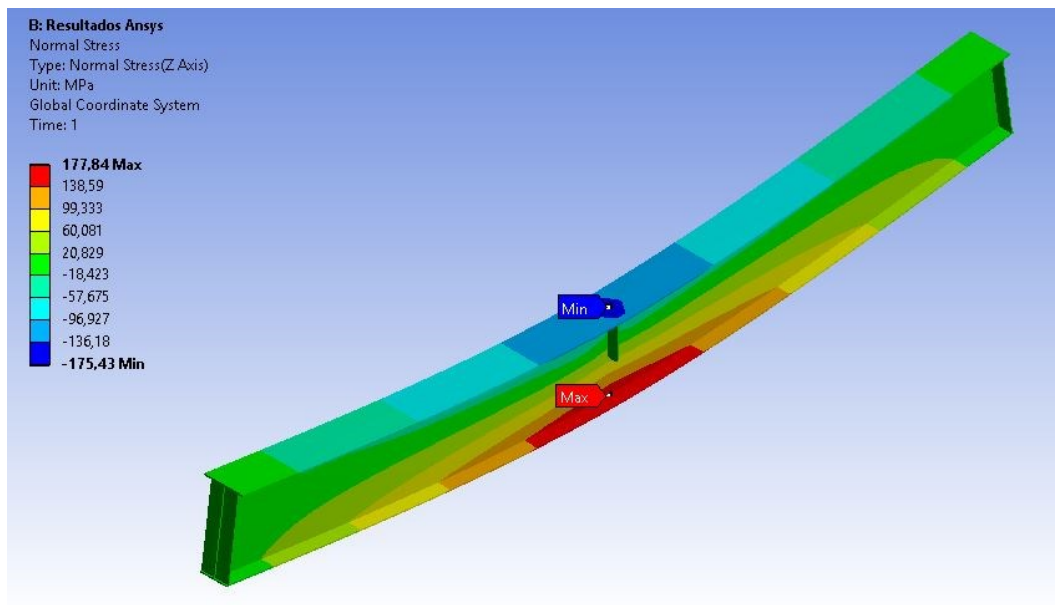


Fonte: Do autor

#### 4.8 VIGA COM 1 ENRIJECEDOR CURTO ARREDONDADO, ACIMA DO CENTROIDE

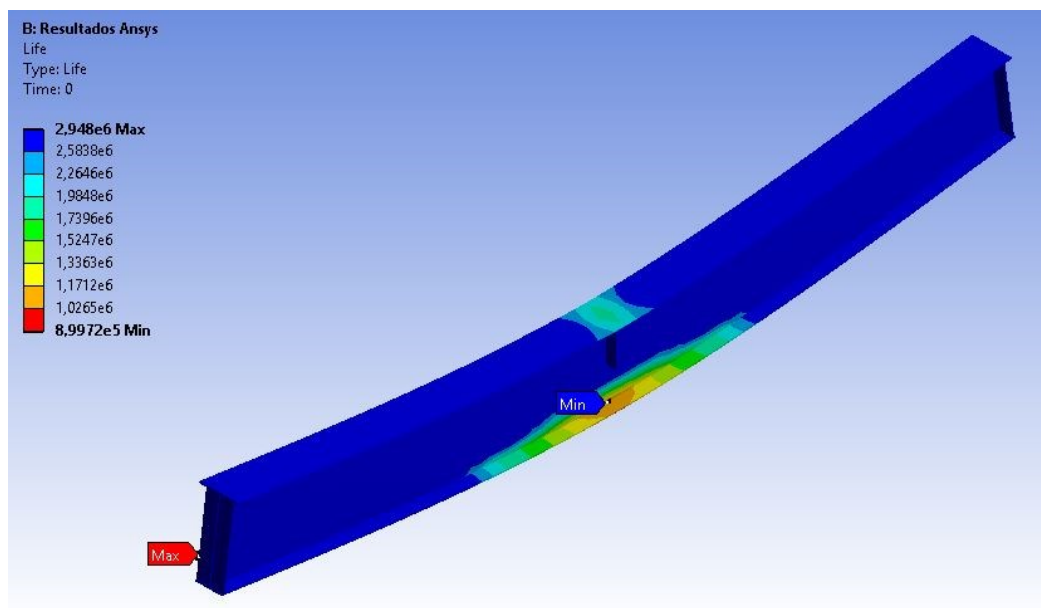
São mantidas todas as características do modelo anterior alterando apenas a quantidade de enrijecedores intermediários, reduzindo de 6 no total para 2, 1 de cada lado aplicados no meio da alma.

Figura 28 – Viga com 1 enrijecedor curto arredondado – Tensão Normal (MPa)



Fonte: Do autor

Figura 29 – Viga com enrijecedor arredondado - Fadiga (ciclos)



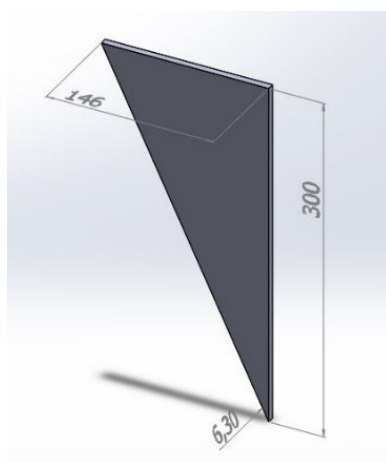
Fonte: Do autor

#### 4.9 VIGA COM ENRIJECEDOR TIPO MÃO FRANCESA ACIMA DO CENTROIDE

Novamente são mantidas todas as características da Viga Original de Bellei, substituindo apenas os enrijecedores intermediários.

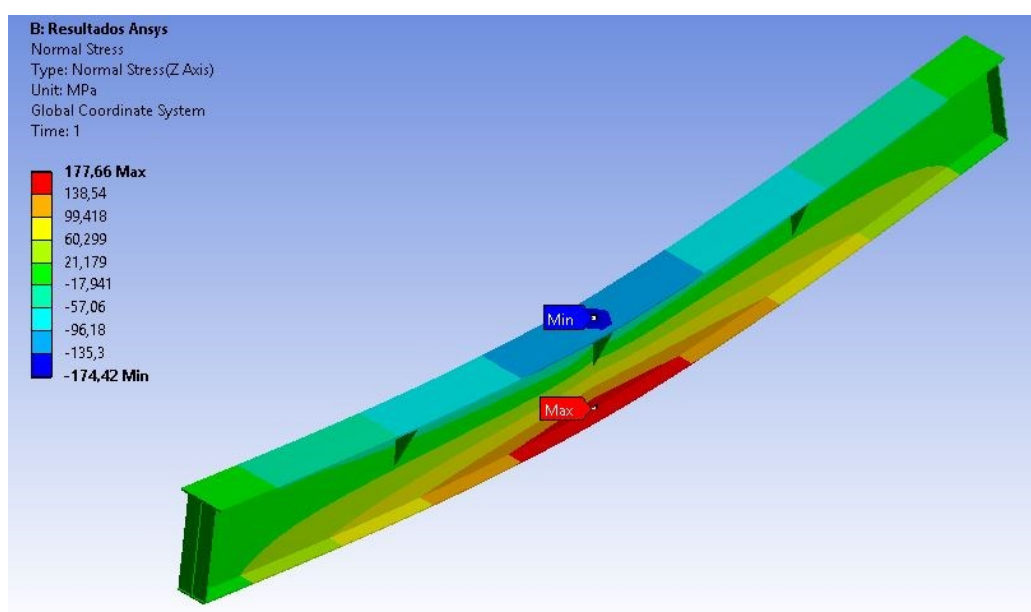
Modelos de enrijecedores desta etapa são de mesmo material e espessura alterando-se apenas a geometria. Geometria testada tipo mão francesa de comprimento da aresta superior igual ao comprimento da mesa superior onde se encaixa. Novamente comprimento na vertical baseado na medida superior ao centroide, conforme apresentado na Figura 30.

Figura 30 – Enrijecedor Tipo Mão Francesa



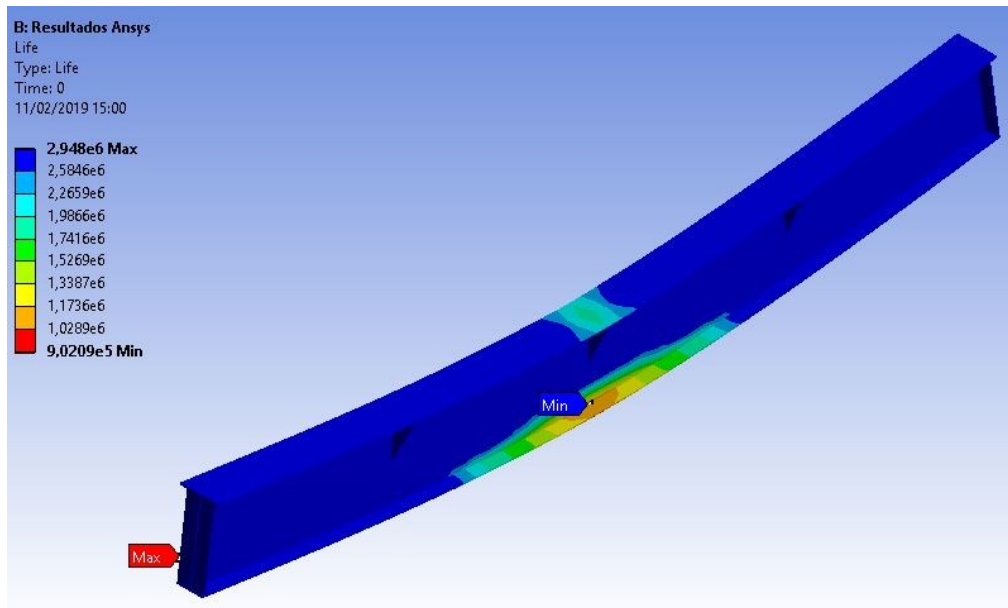
Fonte: Do autor

Figura 31 – Viga com 3 enrijecedores do tipo mão francesa – Tensão Normal (MPa)



Fonte: Do autor

Figura 32– Viga com 3 enrijecedores tipo mão francesa - Fadiga (ciclos)

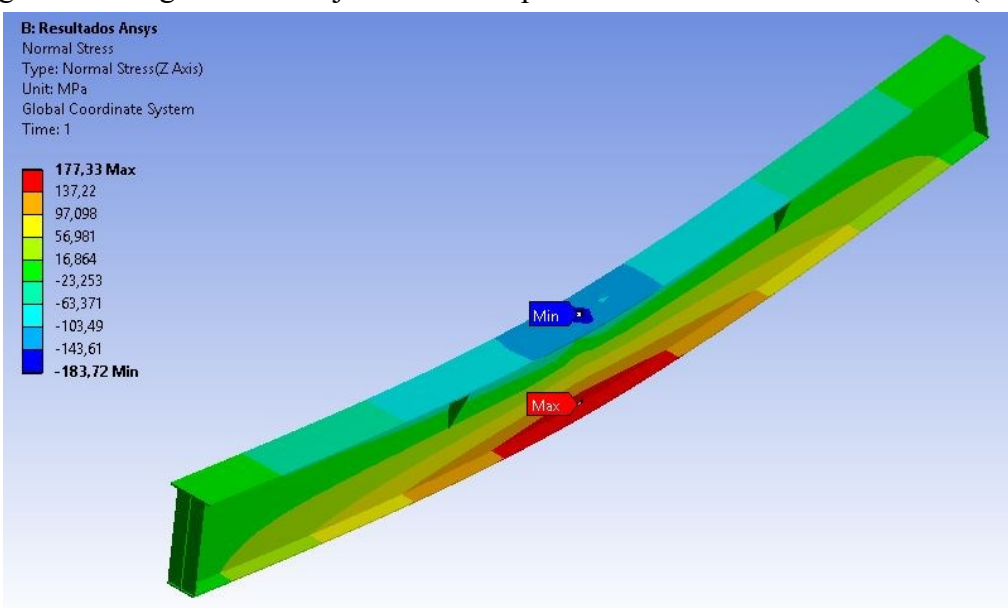


Fonte: Do autor

#### 4.10 VIGA COM 2 ENRIJECEDORES TIPO MÃO FRANCESA ACIMA DO CENTROIDE

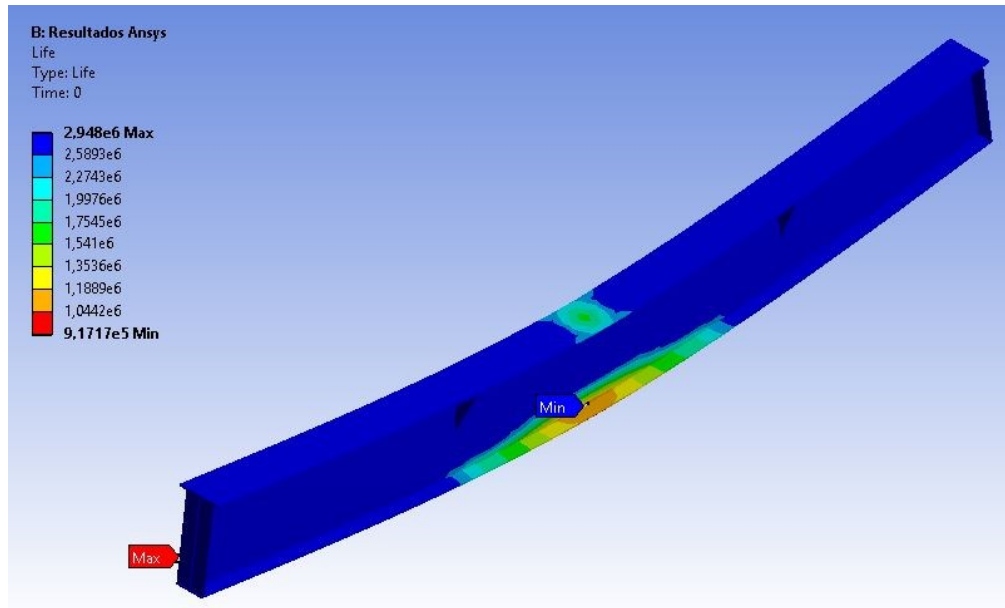
São mantidas todas as características do modelo anterior alterando apenas a quantidade de enrijecedores intermediários do tipo Mão Francesa, reduzindo de 6 no total para 4, 2 de cada lado aplicados equidistantes na alma.

Figura 33 – Viga com 2 enrijecedores do tipo mão francesa – Tensão Normal (MPa)



Fonte: Do autor

Figura 34 – Viga com 2 enrijecedores tipo mão francesa - Fadiga (ciclos)

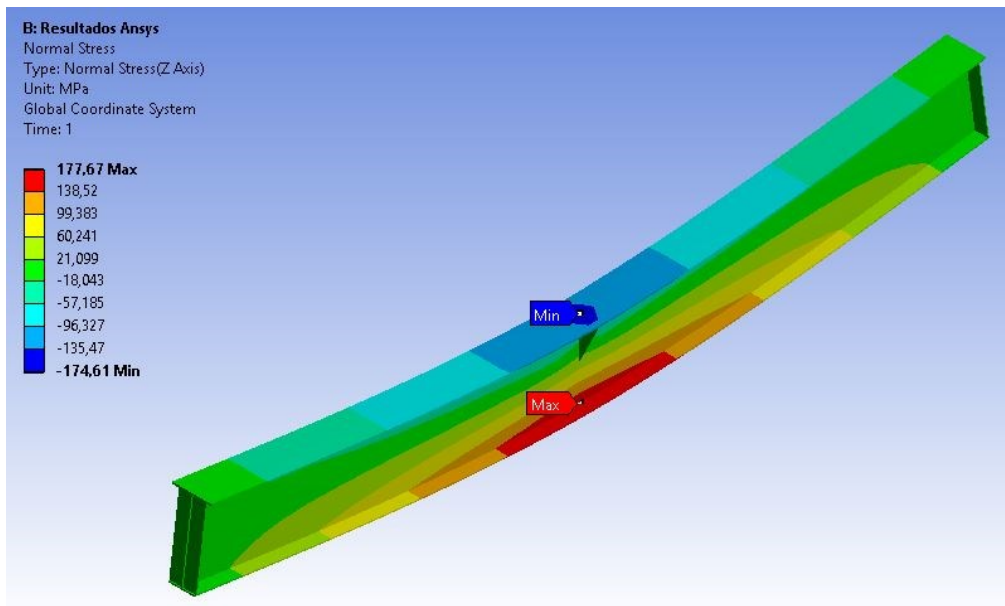


Fonte: Do autor

#### 4.11 VIGA COM 1 ENRIJECEDOR TIPO MÃO FRANCESA ACIMA DO CENTROIDE

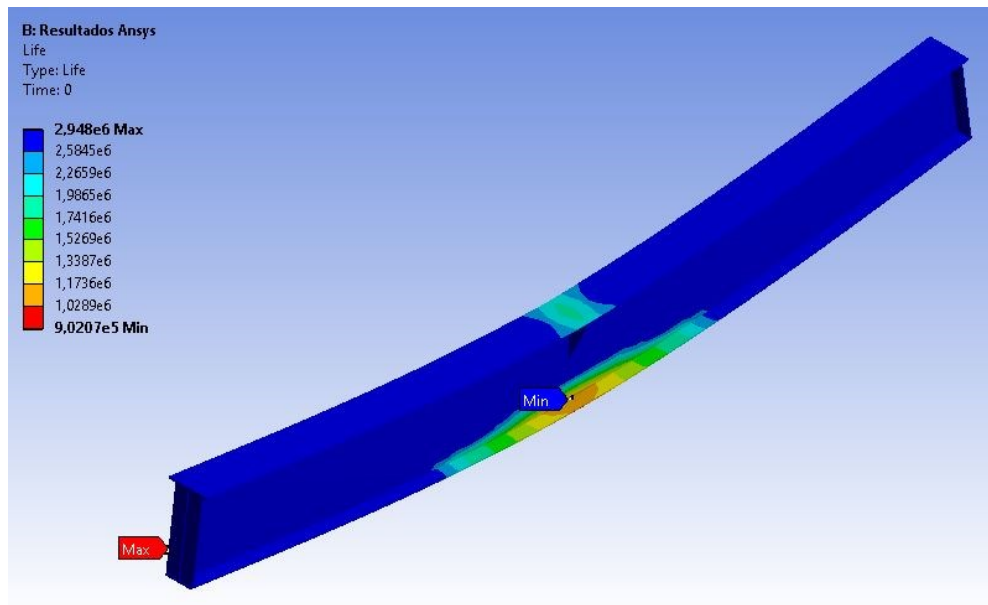
São mantidas todas as características do modelo anterior alterando apenas a quantidade de enrijecedores intermediários tipo Mão Francesa, reduzindo de 4 no total para 2, 1 de cada lado aplicado no centro da alma.

Figura 35 – Viga com 1 enrijecedor do tipo mão francesa – Tensão Normal (MPa)



Fonte: Do autor

Figura 36 – Viga com 1 enrijecedor tipo mão francesa – Fadiga (ciclos)



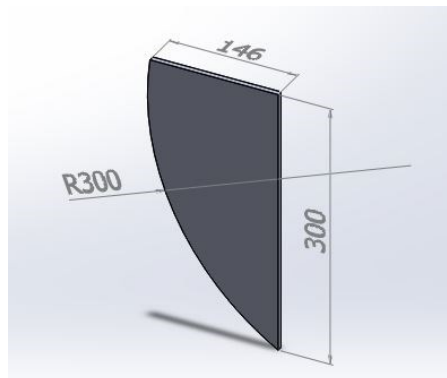
Fonte: Do autor

#### 4.12 VIGA COM MÃO FRANCESA ARREDONDADA

Por último, foi estudada a mão francesa arredondada. Mantidas todas as características da Viga Original de Bellei, substituindo, novamente, apenas os enrijecedores intermediários.

Os enrijecedores desta etapa são de mesmo material e espessura alterando-se apenas a geometria. Geometria testada tipo mão francesa de comprimento da aresta superior igual ao comprimento da mesa superior onde se encaixa. Novamente comprimento na vertical baseado na medida superior ao centroide. Como detalhe, possui a área livre arredondada, Figura 37.

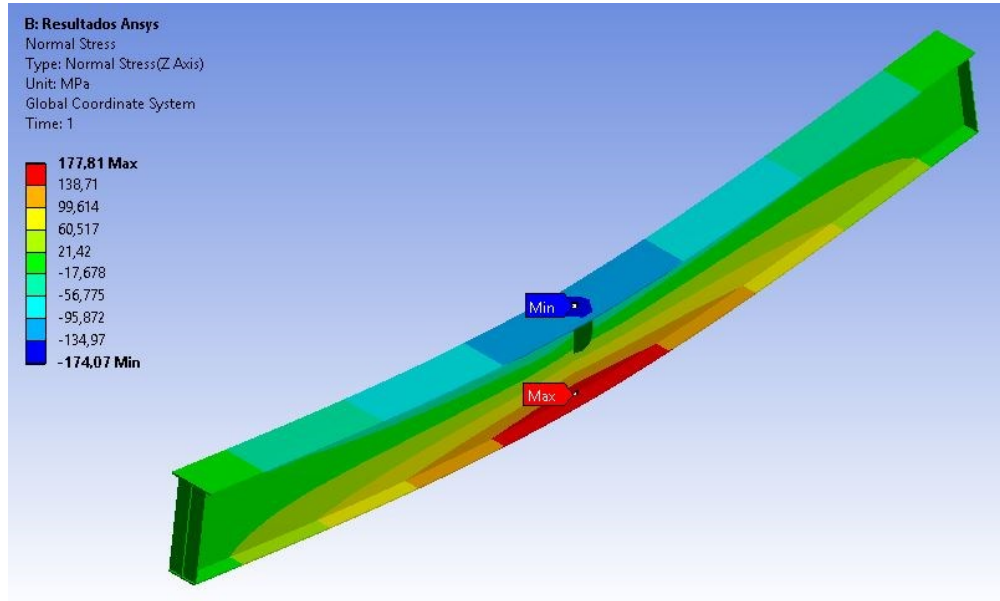
Figura 37 – Enrijecedor tipo mão francesa arredondado



Fonte: Do autor

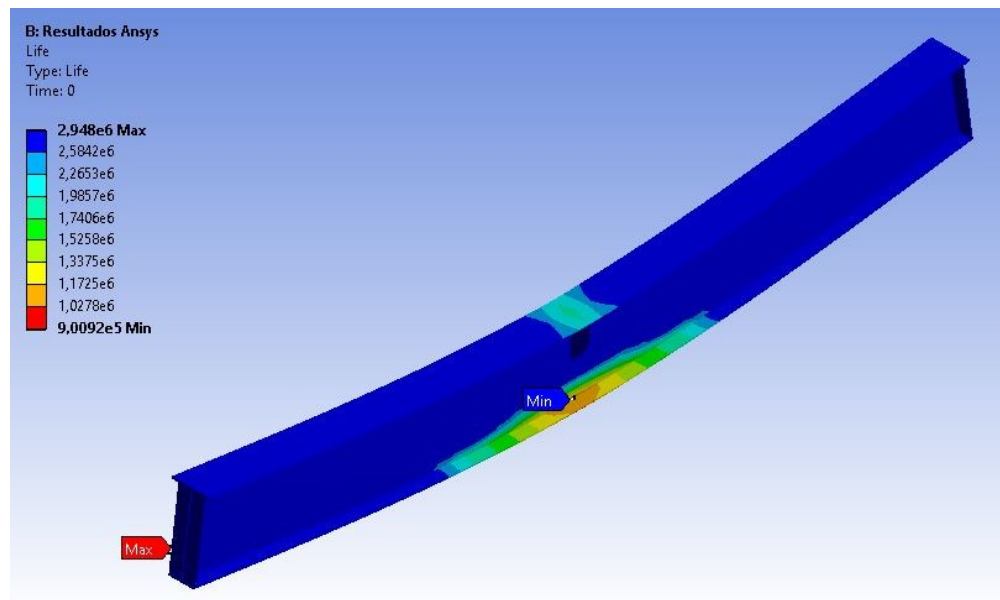
Resultados para estudo de Tensão Normal na direção Z (von Misses) e ciclos de vida à fadiga pelo critério de Soderberg.

Figura 38 – Viga com 1 Enrijecedor tipo mão francesa arredondada – Tensão Normal (MPa)



Fonte: Do autor

Figura 39 - Viga com 1 enrijecedor tipo mão francesa arredondada – Fadiga (ciclos)

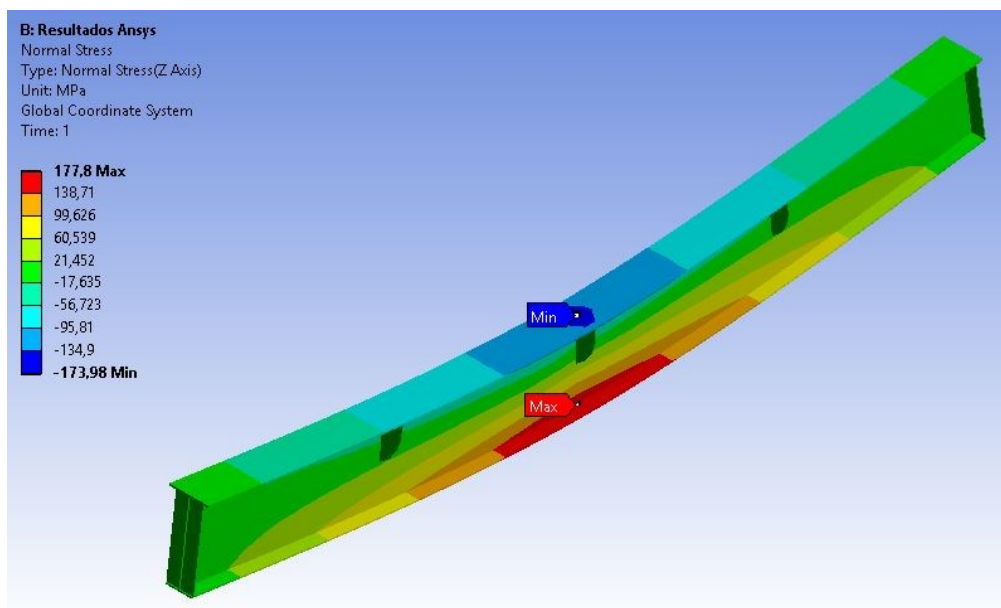


Fonte: Do autor

#### 4.13 VIGA COM 2 ENRIJECEDORES TIPO MÃO FRANCESA ARREDONDADOS

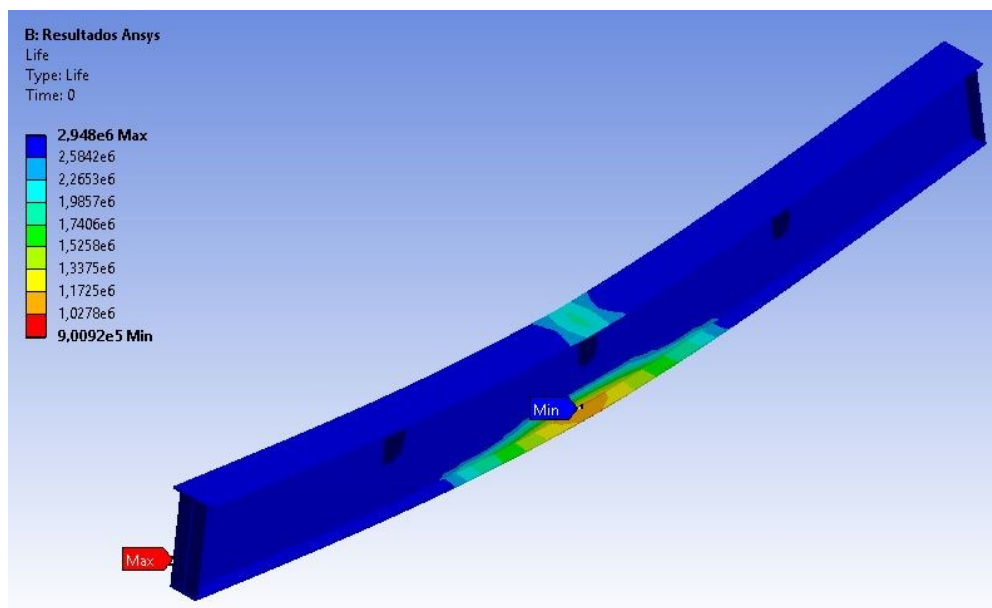
São mantidas todas as características do modelo anterior alterando apenas a quantidade de enrijecedores intermediários, alterando de 2 no total para 6, 3 de cada lado aplicados equidistantemente na alma.

Figura 40 – Viga com 3 enrijecedores tipo mão francesa arredondados – Tensão Normal (MPa)



Fonte: Do autor

Figura 41 – Viga com 3 enrijecedores tipo Mão Francesa arredondados - Fadiga (ciclos)



Fonte: Do autor



#### 4.14 RESUMOS DE RESULTADOS

A Tabela 3, na próxima página, traz um resumo dos principais resultados obtidos nas simulações. Pode-se observar que a mudança da forma do enrijecedor, não altera significativamente os valores de tensão normal, conforme esperado. Observa-se, contudo, que induzem significativo aumento do número de ciclos na vida à fadiga.

Observa-se que o maior ganho é aquele obtido quando se utilizam enrijecedores curtos retos e do tipo mão francesa ambos acima da linha do centroide.

Observa-se ainda que a variação do número de enrijecedores não causa diferença, o que faz diferença é a posição onde estes estão aplicados. Quando da diminuição do número de enrijecedores de 3 para 1, os valores quanto a fadiga se mantêm, sendo que nestes casos, a posição do enrijecedor central é a mesma, junto ao ponto de aplicação da carga. Porém, quando a variação é entre 3 e 2 enrijecedores, ou de 2 para 1 enrijecedor, há uma variação no valor da resistência à fadiga o que parece ser devido a configuração com 2 enrijecedores deslocar o enrijecedor da posição central onde está aplicada a carga.

A retirada do enrijecedor da posição de aplicação da carga mostrou-se mais vantajosa. Sendo assim, com relação à economia de material, a melhor opção estudada é a de enrijecedores curtos, retos ou mão de francesa, em número de 2 de cada lado. Neste caso a redução do peso, apenas dos enrijecedores, seria de pouco mais de 60%, sendo que ao mesmo tempo há um ganho de cerca de 14% na resistência à fadiga da viga.

Tabela 3 – Tabela comparativa de resultados

VIGA	TENSÃO NORMAL VON MISSES MPa		VIDA A FADIGA NÚMERO DE CICLOS		Diferença de números de ciclos	% variação de Ciclos	Quant enrij.	Peso enrij. Intermediários Kg	Δ Peso total enrijecedores Intermediário
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo					
VIGA ORIGINAL BELLEI <b>VIGA DE REFERÊNCIA</b>	-176,65	184,07	<b>786.110</b>	2.948.000	0	0,00	6	12,84	0%
VIGA BELLEI 1 ENRIJECADOR	-173,80	184,16	783.500	2.948.000	2.610	-0,33	2	4,28	-67%
VIGA BELLEI 2 ENRIJECADORES	-183,72	177,35	916.980	2.948.000	130.870	14,27	4	8,56	-33%
VIGA 1 ENRIJECADOR CURTO	-176,00	178,02	900.600	2.948.000	114.490	12,71	2	2,38	-81%
VIGA 2 ENRIJECADORES CURTOS	-183,72	177,33	<b>917.140</b>	2.948.000	<b>131.030</b>	<b>14,29</b>	4	4,75	<b>-63%</b>
VIGA 3 ENRIJECADORES CURTOS	-175,82	178,00	900.580	2.948.000	114.470	12,71	6	7,13	-44%
VIGA 1 ENRIJECADOR ARREDONDADO	-175,22	177,83	899.740	2.948.000	113.630	12,63	2	2,47	-81%
VIGA 3 ENRIJECADORES ARENDONDADOS	-175,43	177,84	899.720	2.948.000	113.610	12,63	6	7,40	-42%
VIGA 1 ENRIJECADOR MÃO FRANCESA	-174,61	177,67	902.070	2.948.000	115.960	12,85	2	2,17	-83%
VIGA 2 ENRIJECADORES MÃO FRANCESA	-183,72	177,33	<b>917.170</b>	2.948.000	<b>131.060</b>	<b>14,29</b>	4	4,34	<b>-66%</b>
VIGA 3 ENRIJECADORES MÃO FRANCESA	-174,42	177,66	902.090	2.948.000	115.980	12,86	6	6,51	-49%
VIGA 1 ENRIJECADOR MÃO FRANCESA ARRENDODADO	-174,07	177,81	900.920	2.948.000	114.810	12,74	2	3,31	-74%
VIGA 3 ENRIJECADORES MÃO FRANCESA ARENDONDADO	-173,98	177,80	900.920	2.948.000	114.810	12,74	6	9,92	-23%

Fonte: Do autor

## **5 CONSIDERAÇÕES E SUGESTÕES**

### **5.1 CONCLUSÕES**

O estudo mostrou-se bastante instrutivo quanto a utilização de recursos computacionais para se avaliar a resistência quanto a fadiga de estruturas metálicas.

O resultado encontrado, mostrou ser possível se alcançar o objetivo de se redesenhar a Viga de Rolamento em questão com menos material, assim, mais economicamente.

Vale salientar que ao fim do trabalho mais opções de desenho da viga de Rolamento surgiram, mostrando que quanto maior o domínio das ferramentas de trabalho, no caso as ferramentas computacionais, e aprofundamento teórico, mais produtivo o profissional pode se tornar inclusive com mais criatividade e confiança em buscar novas soluções para demandas profissionais.

O estudo de resistência à fadiga, que pode ser chamado como o mais novo dos estados limites que determinam o dimensionamento de uma estrutura, mostra-se ser bem controlável já no projeto com ferramentas computacionais, de maneira produtiva e econômica.

### **5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Fica a sugestão para trabalhos futuros da relação entre os esforços verticais e horizontais tentando melhorar o equilíbrio do uso dos enrijecedores para as duas solicitações, contra a flambagem lateral da alma e a favor da resistência à fadiga, especialmente na mesa superior.

## REFERÊNCIAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16127**: Equipamentos de levantamento e movimentação de cargas — Comissionamento — Especificação. Brasil, 2013.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **ANSI/AISC 360:05** - Specification for Structural Steel Buildings (Especificação para construções de aço estrutural). Washington, EUA, 2005.

ANSYS WORKBENCH, **Ansyes program version 16.0. Finite Element Software**. Ansys Incorporation, 2016.

AZEVEDO, Domingos F.O. **Análise Estrutural com Ansys Workenich**: Static Structural. Mogi das Cruzes: Domingos Flávio de Oliveira Azevedo, 2016. Disponível em: <<https://sites.google.com/site/domingosfoaz/home>>. Acesso em 18 mar. 2018.

BELLEI, Ilboney H. **Edifícios Industriais em Aço -Projeto e Cálculo**. 6ª. Ed. PINI, São Paulo, 2010.

BRASIL, Haroldo Vinagre. **Máquinas de Levantamento**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois S.A. 1985.

FABEANE, Ricardo; FICANHA, Ricardo A.; PRAVIA, Zacarias Martin Chamberlain. **Verificação à fadiga de vigas de rolamento de pontes rolantes industriais**. 2012, ABACEM, CONSTRUMETAL, 2012.

FARIA, Maria C. M. de; CIOFFI, Maria O. H. e BOTELHO, Edson C.. **Análise do efeito higrotérmico no comportamento em fadiga de compósitos de PPS/fibras de carbono**. Polímeros. 2012, vol.22, n.1, pp.7-12. Epub Jan 27, 2012. ISSN 0104-1428. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0104-14282012005000001>>. Acesso em 01 de abr. 2018.

FONSECA, Marcos Cordeiro. **Verificação à fadiga de suportes de apoio soldados de um transportador de correia de alto forno**. Dissertação de mestrado profissional (Programa de Pós-Graduação em Construção Metálica) Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2017.

FONSECA, Marcos Cordeiro. **Verificação à fadiga de suportes de apoio soldados de um transportador de correia de alto forno**. REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil, Volume 15, Jan 2019 – Jun 2019.

GOMES, Daniel Januário Cordeiro Gomes. **Determinação de resistência à fadiga em aços ABNT4140 em vidas super longas (giga ciclos)**. 2011 Dissertação de mestrado (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais), Belo Horizonte, MG, 2011.

LEITE, Luiz Rafael dos Santos. **Análise numérica de vigas de rolamento de aço sem contenção lateral entre apoios**. 2016. 140p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil (Estruturas)) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

MANSUR, Tanius Rodrigues; FILHO, Nelson do N. Atanazio; GOMES, Paulo de Tarso Vida; RABELLO, Emerson Giovani; SILVA, Luiz Leite da; SCORALICK, Geraldo Antônio; SANTOS, Mariana Coelho de Vasconcelos; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Estudo das tensões residuais em juntas soldadas de materiais dissimilares e determinação dos limites de resistência à fadiga dos metais de base.** Soldag. insp. (Impr.), São Paulo 2011. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-92242011000300009&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-92242011000300009&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em 01 abr. 2018.

PRAVIA, Zacarias Martin Chamberlain. **Estabilidade de Estruturas de Pontes Metálicas com Fraturas.** 2003. 135p. Tese de Doutorado (COPPE/UFRJ, Engenharia Civil, 2003). Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.2003

SANTOS, S. A. **Análise de falhas por fadiga de alto ciclo em eixos de transmissão utilizando o método dos elementos finitos.** 2011. 63 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

SENA, Larissa Veras Torquato. **Contribuições ao dimensionamento de vigas de rolamento em aço com contenção lateral entre os apoios.** 2017. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN. 2017.

SILVA, Francisco Duarte Magalhães. **O CAD aplicado ao projeto do produto: o ponto de vista dos designers industriais.** 2011. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2011.

SORDI, Giovanni. **Dimensionamento da viga principal de uma ponte rolante.** 2016. 59f. Tese (Graduação em Engenharia Mecânica). Centro Universitário UNIVATES. Lajeado, Rio Grande do Sul. 2016.

SOLIDWORKS. **SolidWorks program version 2015 x64 Edition**, SolidWorks Corporation Dassault Systemes S.A. 2015.

STRZELECKI, Przemyslaw; SEMPRUCH, Janusz. **Experimental method for plotting s-n curve with a Small number of specimens.** 2016. POLISH MARITIME RESEARCH 4 (92) 2016 Vol. 23; pp. 129-137 10.1515/pomr-2016-0079; University of Science and Technology in Bydgoszcz, Poland.

TREMARIN, Ronaldo Cesar; PRAVIA, Zacarias M.C.. **Previsões de Vida Fadiga Segundo Normas Técnicas: uma Revisão Crítica.** Soldag. insp., São Paulo, v. 22, n. 3, p.281-299, Sept.2017. Disponível em:< [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-92242017000300281&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-92242017000300281&lng=en&nrm=iso) >. Acesso em 01 abr. 2018.