

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

José Cláudio Canêdo Pimenta<sup>1</sup>, Flávio Teixeira de Souza<sup>2</sup>,  
Geraldo Donizetti de Paula<sup>3</sup>

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, com o objetivo de encontrar uma configuração que resulte em menor peso de aço, consequentemente obtendo-se economia. Empregou-se 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 na etapa de projeto. A Partir do modelo numérico, procedeu-se a variação da geometria e da quantidade dos enrijecedores. Os resultados do estudo demonstraram ser possível alterar a geometria, diminuindo suas dimensões, assim como a alteração da quantidade de elementos intermediários, sem um comprimento significativo da resistência à fadiga da viga de rolamento estudada.

**Palavras-chave:** Enrijecedores. Fadiga. Ponte rolante. Viga de rolamento.

This work studied the element girder of bearing, used as support for the implantation of crane 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, in order to find a configuration that results in a lower weight of steel, consequently obtaining savings. 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 in the stage of the project. From the numerical model, the geometry and quantity of the stiffeners were varied. The results of the study demonstrated that it is possible to change the geometry, decreasing its dimensions, as well as changing the quantity of intermediate elements, without a significant length of fatigue resistance of the beam rolling studied.

**Keywords:** Stiffeners. Fatigue. Crane. Beam Rolling.

---

<sup>1</sup> Engenheiro mecânico, Mestre, Universidade Federal de Ouro Preto. E-mail: jose.pimenta@aluno.ufop.edu.br

<sup>2</sup> Engenheiro Civil, Doutor, professor do Instituto Federal de Minas Gerais - Campus Ouro Preto. E-mail: flavio.souza@ifmg.edu.br

<sup>3</sup> Engenheiro Civil, Doutor, professor da Escola de Minas - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto. E-mail: geraldo@em.ufop.br

## 1. INTRODUÇÃO

Dentro da estrutura cotidiana de suporte às atividades industriais, um dos equipamentos mais comumente encontrados no parque fabril é a Ponte Rolante, equipamento 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. 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 de ligação entre os dois componentes que desempenha o papel "Sustentar o caminho de rolamento das pontes rolantes e transmitir os esforços por elas causados para as estruturas-suportes."

Define Bellei (2000) que, 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: "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", conforme destaca Santos (2011).

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.

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. (PRAVIA, 2003)

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 é 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 conforme as normas de projeto, considerando uma série de variações de número e da geometria dos enrijecedores, estudando o efeito das 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 ser menosprezado durante a escolha das estruturas e também demonstrar a adequação do estudo destes 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). “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, que é o elemento de referência para o custo do projeto. Isto demonstra que o estudo de soluções mais econômicas é 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 melhorar a produtividade no projeto e facilitar a futura montagem com a utilização de recursos computacionais, os quais podem facilmente vir a serem interligados à 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 na execução da tarefa;
- Transporte do modelo CAD para um programa CAE (ANSYS, 2016), 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.
- A viga escolhida para o estudo foi uma viga de rolamento construída por perfil tipo I da série VS (Viga Soldada).

- 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 por um prazo de 50 anos de utilização.
- São usados enrijecedores transversais para combater a flambagem lateral da alma e 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) “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. 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. Já a ponte rolante translada de forma aérea, ou seja, está apoiada sobre um trilho montado acima do nível das cabeças dos trabalhadores e dos outros equipamentos do edifício industrial o que contribui 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, que é a viga de rolamento, objeto deste estudo. A viga de rolamento é apoiada em consoles na estrutura do edifício industrial.

### 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.

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. (SENA, 2017)

Para o caso estudado, foi considerado um galpão industrial. Suas colunas foram 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. (LEITE, 2016)

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

Capacidade nominal da ponte rolante	Vão usual da viga de rolamento	Tipo de seção utilizada
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 caixa com contenção na mesa superior e inferior

Fonte. Leite (2016)

## 2.2 Recursos Computacionais

Para o desenvolvimento do trabalho foi 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. (SILVA, 2011)

O programa CAD utilizado foi 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) e Fonseca, Souza e Paula (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.

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. (MANSUR et al., 2011)

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

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. (GOMES, 2011 *apud* WULPI, 1985).

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”.

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. (FARIA, 2012)

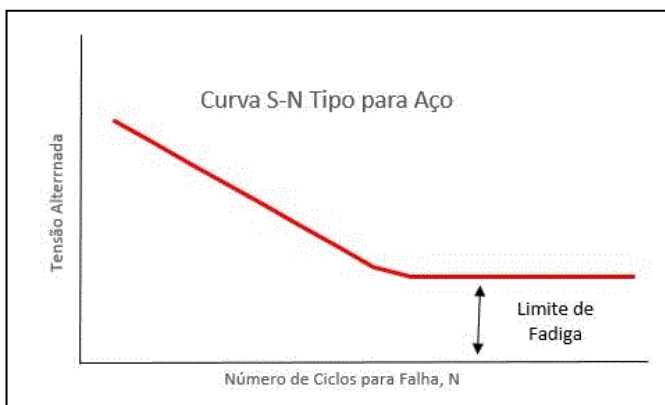
Os estudos sobre fadiga são principalmente estatísticos, pois um dos aprendizados que se adquiriu com o tempo é que o que ocasiona a área de nucleação da trinca inicial são trincas microscópicas, derivadas de defeitos microscópicos sobre os quais não se conseguem ter total controle. Alguns desses defeitos 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:

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. (TREMARIN, 2017)

Por padrão o gráfico da relação entre Tensão alternada (S) e números de ciclos (N), chamado curva S-N, para estruturas de aço tem a forma demonstrada na Figura 1:



**Figura 1.** Diagrama Padrão Curva S-N para Aço  
**Fonte.** Dados da Pesquisa

Este gráfico se forma devido a utilização da metodologia de construção das curvas S-N. Conforme salientam Strzelecki e Sempruch (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.”

### 3. Verificação da fadiga da viga em estudo de acordo com a NBR 6118.

#### 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, 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. Foi calculada curva S-N para a viga em questão. Este foi feito a partir dos resultados diretos obtidos na equação de regência definida pela Norma NBR 8800 (ABNT, 2008), gerando um gráfico Linear.

Sobre a norma NBR 8800, destacam:

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. (ABNT, 2008, FABEANE, FICANHA E PRAVIA, 2011)

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 Mega Pascal.

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 (escolhido no 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.

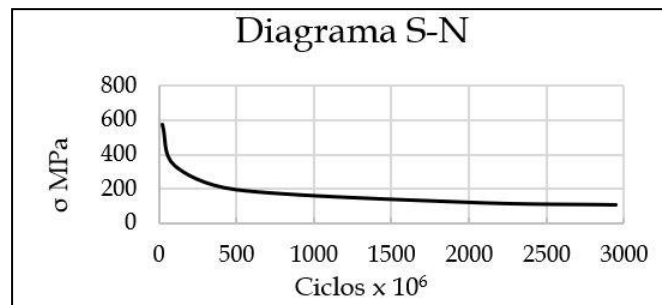
A curva calculada para a viga, como na norma não existe separação de categoria por ciclos, foi calculada utilizando os valores de 20.000 ciclos como valor inicial, 100.000, 500.000 e 2.000.000 de ciclos, como valores intermediários, e o valor calculado pela fórmula (2.948.159 ciclos) como o valor para 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 fórmula da equação 01 encontram-se os seguintes valores:

**Tabela 2.** Valores de Ciclos X Tensão normal

Ciclos	20.000	100.000	500.000	2.000.000	2.948.159
MPa	577	338	198	125	110

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

**Fonte.** Dados da Pesquisa

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

## 4. MODELAGEM NÚMERICA

A viga apresentada foi modelada numericamente para avaliação de seu comportamento quando exposta à fadiga.

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 modelo realizado para este trabalho gerou um arquivo de tamanho 75 kb.

### 4.1. 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. Nesta etapa foram inseridos os dados da tabela de fadiga calculada



anteriormente com os valores encontrados no anexo K, conforme já relatado no item 3 deste trabalho.

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.

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. As características deste elemento são encontradas no arquivo de ajuda interno do programa e apresentadas na Figura 3.

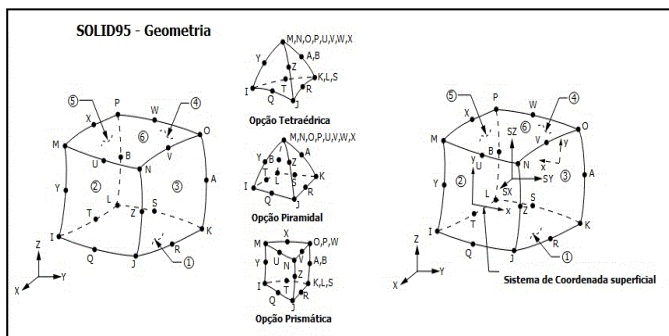


Figura 3. Característica constitucional do elemento Solid95

Fonte. Arquivo alterado do “ANSYS Help”

Com a utilização deste elemento é gerado uma malha regular apresentada na Figura 4.

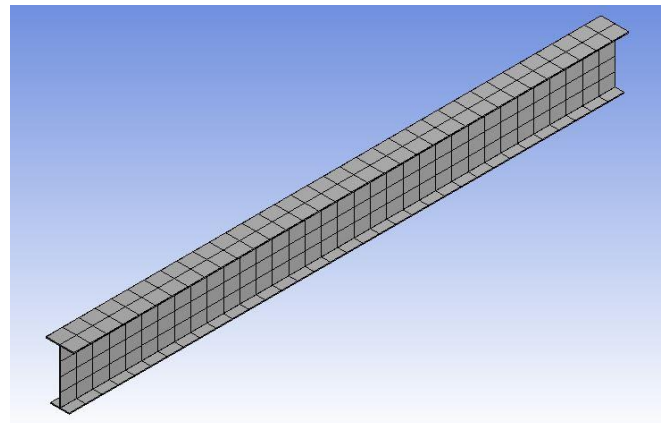


Figura 4. Viga I com malha aplicada

### 4.3. 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.

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 Figura 5 apresenta a viga I com as condições de contorno e carga aplicada.

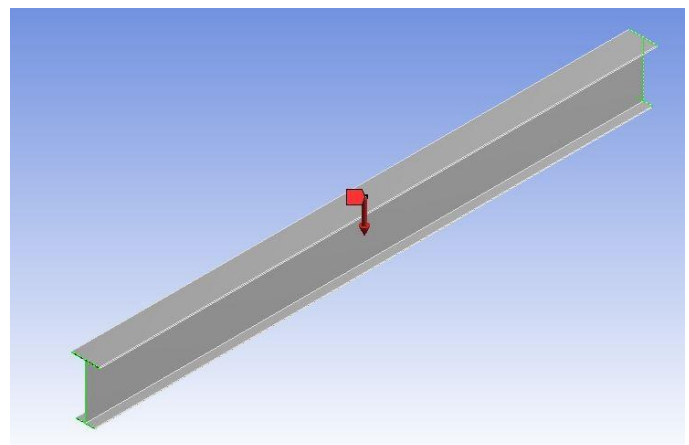


Figura 5. Viga I, condições de contorno e força

### 4.4. Análise de um resultado de tensão normal

Após o fim do modelamento, foi realizado o processamento da solução pelo programa. O

resultado para a análise no modelo numérico para a tensão normal na direção Z, direção longitudinal da viga é mostrado na Figura 6.

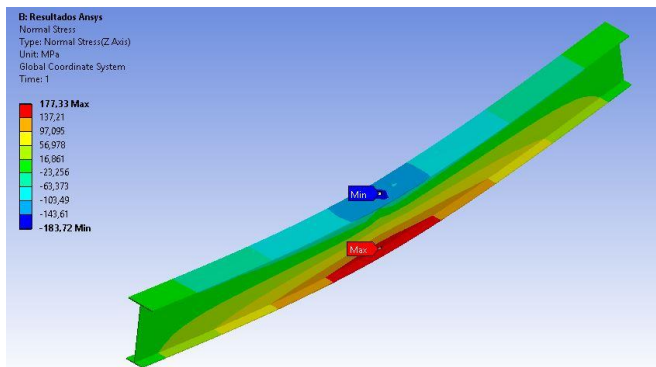


Figura 6. Tensão normal na direção Z (MPa)

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 de valor (em torno de 1%), mas com semelhantes posições geométrica para os valores de maior tensão, calculada na mesa inferior, quanto a de maior compressão, na mesa superior, o que valida a metodologia numérica.

#### 4.5. Análise de fadiga no Ansys

Tendo sido assim criado e validado o modelo numérico da viga, segue à solução para a análise quanto à fadiga. O programa permite escolher 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 a da qualidade da superfície, sendo esta variando-se de 0,1 até 1, onde 1 é o material liso polido. Quanto ao modelo de carregamento as opções são o carregamento alternado, pulsante, variado e com histórico de dados. No caso estudado usou-se 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 medias ou caso seja escolhido um tipo de distribuição, pode-se definir qual o fator gráfico de distribuição dos resultados de tensões medias escolher, no caso de levantamento de carga o mais indicado é o modelo de Soderberg por ser 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 foram definidas as unidades da vida a ser usado para o cálculo, escolhida entre ciclos de trabalho, anos, entre outros. Neste trabalho utilizou-se o número de ciclos.

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.

#### 4.6. Avaliação dos resultados do estudo de fadiga

Após o fim da modelagem, executa-se a rotina matemática do programa e avalia-se o resultado encontrado para a vida à fadiga, mostrado na Figura 7.

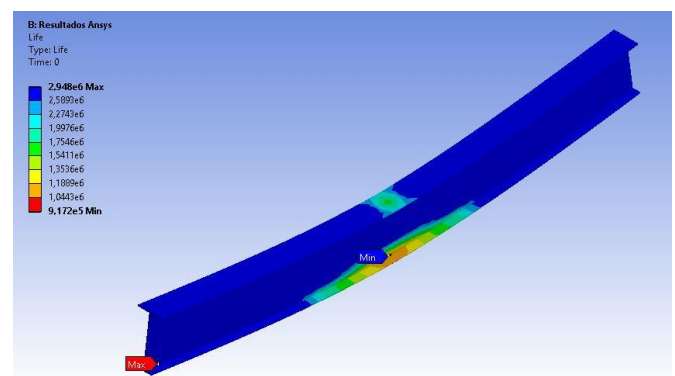


Figura 7. Vida à Fadiga (ciclos)

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 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 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));
- $N = 500.000$  (escolhido no 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 um 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:

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

Onde:

- $\sigma_a$  = Tensão Alternada;
- $\sigma_s$  = Limite de resistência a fadiga;
- $\sigma_m$  = Tensão média;
- $\sigma_u$  = Tensão última obtido em ensaio estático (No caso da linha de Soderberg,  $\sigma_u = \sigma_s$ );
- $x$  = o qual é definido pelo método escolhido;
  - 1 para linha de Goodman e Soderberg;
  - para Parábola de Gerber,

A análise do resultado encontrado, 917.200 ciclos (Figura 7), 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 o processo de modelamento numérico e a análise dos resultados computacionais é validado.

#### 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Foram testadas variações da geometria e do número de enrijecedores intermediários. Foram feitos 13 modelos de viga para o estudo.

- Viga originalmente definida na literatura por BELLEI com 3 enrijecedores;
- Viga de BELLEI com 1 enrijecedor intermediário;
- Viga de BELLEI com 2 enrijecedores intermediários;
- Viga com 1 enrijecedor intermediário curto de comprimento, posicionado acima do centroide;
- Viga com 2 enrijecedores intermediários curtos de posicionado acima do centroide;
- Viga com 3 enrijecedores intermediários curtos de posicionado acima do centroide;
- Viga com 1 enrijecedor curto arredondado de comprimento posicionado acima do centroide;
- Viga com 3 enrijecedores curtos arredondados de comprimento posicionado acima do centroide;
- Viga com 1 enrijecedor do tipo mão francesa de comprimento posicionado acima do centroide;
- Viga com 2 enrijecedores tipo mão francesa de comprimento posicionado acima do centroide;
- Viga com 3 enrijecedores tipo mão francesa de comprimento posicionado acima do centroide;
- Viga com 1 enrijecedor tipo mão francesa arredondado de comprimento posicionado acima do centroide;

- Viga com 3 enrijecedores tipo mão francesa arredondado de comprimento posicionado acima do centroide.

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.

Os enrijecedores usados foram de 4 tipos:

Enrijecedor intermediário original dimensionado por Bellei, Figura 8.

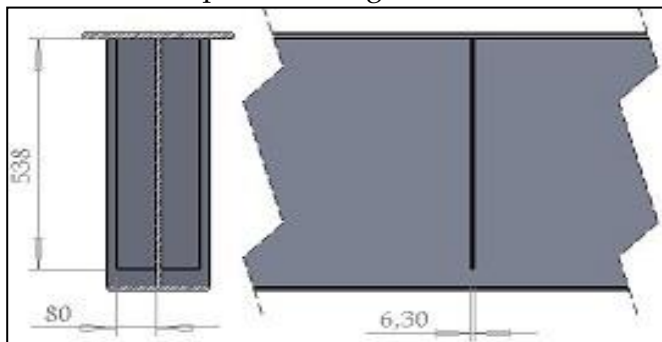


Figura 8. Enrijecedor intermediário

Enrijecedor curto, baseado na mesma forma do enrijecedor original, porém com menor comprimento, se aplicando a partir do centroide na direção da mesa superior, Figura 9.

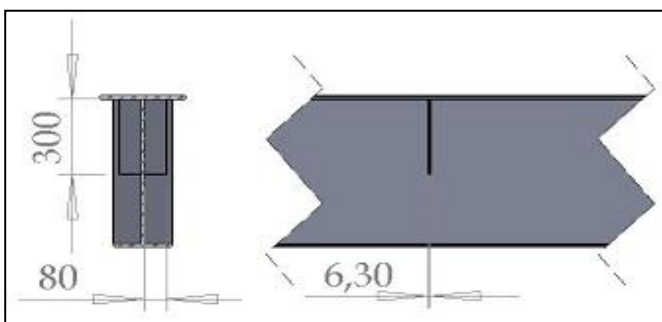


Figura 9. Enrijecedor Curto

Enrijecedor curto arredondado, igual ao enrijecedor curto com a diferença que a aresta livre do enrijecedor na parte inferior, na direção à mesa inferior, é arredonda, Figura 10.

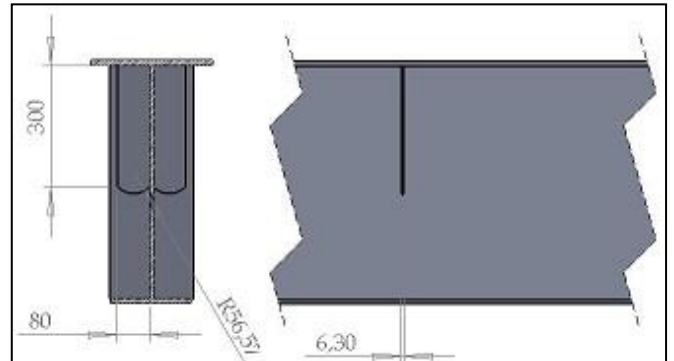


Figura 10. Enrijecedor curto arredondado

Enrijecedor do tipo mão francesa, que é posicionado do centroide em direção a mesa superior e tem sua aresta superior do mesmo tamanho à aresta da mesa que se apoia, Figura 11.

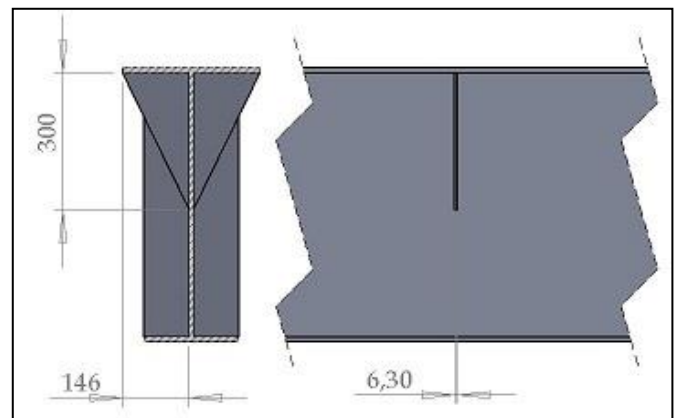


Figura 11. Enrijecedor tipo Mão Francesa

Enrijecedor arredondado, dimensionado como o do tipo mão francesa sendo que a aresta livre deste, é arredondada na direção oposta a alma da peça, Figura 12.

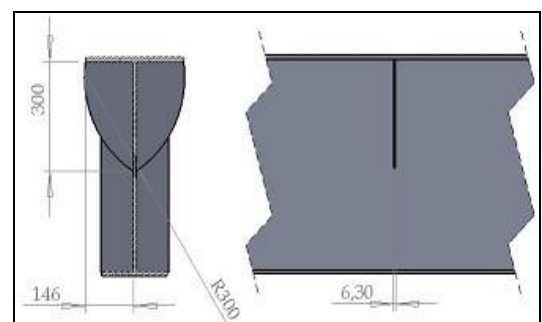


Figura 12. Enrijecedor mão francesa arredondado

### 5.1. Viga de referência - original Bellei

No modelo definido em BELLEI (2000), são aplicados 6 enrijecedores intermediários, 3 de cada lado da viga, estes produzidos com medidas de 80 mm de largura e 6,3 mm de espessura em Aço ASTM A36.

Os enrijecedores intermediários são ligados por solda à mesa superior e a alma, porém têm comprimento (540 mm) inferior a altura da alma (580 mm), sem contato com a mesa inferior.

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 Mises) e ciclos de vida à fadiga pelo critério de Soderberg. A Figura 13 apresenta as tensões normais, sendo indicados seus valores em MPa.

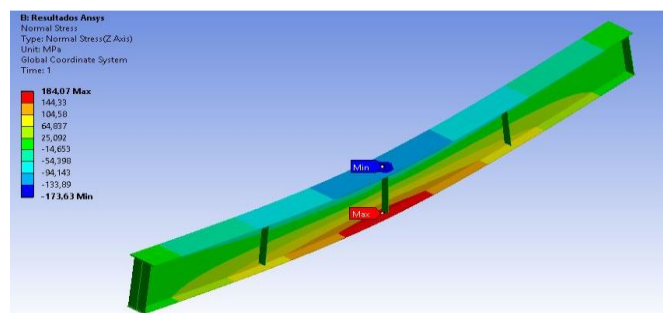


Figura 13. Viga Original Bellei –Tensão Normal (MPa)

A Figura 14 apresenta o número de ciclos suportado pela viga quanto à fadiga, sendo a distribuição ao longo da estrutura e destacado o número máximo de ciclos resistidos na região crítica da viga, o que, por ser a região crítica, significa o mínimo de ciclos seguros em toda a estrutura.

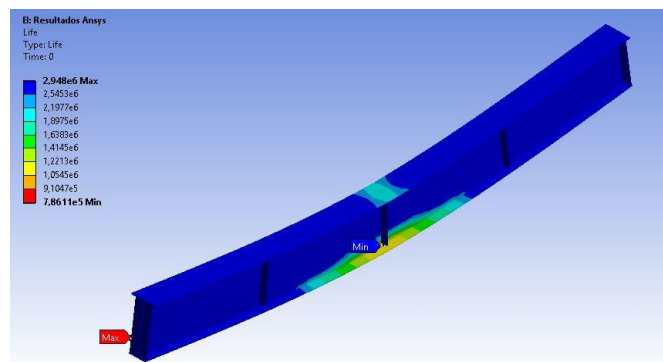


Figura 14. Viga Original Bellei - Fadiga (ciclos)

### 5.2. Viga com 2 enrijecedores curtos, acima do centroide

Mantidas todas as características do modelo referencial de Bellei, alterando-se apenas os enrijecedores intermediários para o modelo curto e a quantidade de 6 no total, reduzindo para 4, 2 de cada lado, aplicados equidistantes na alma.

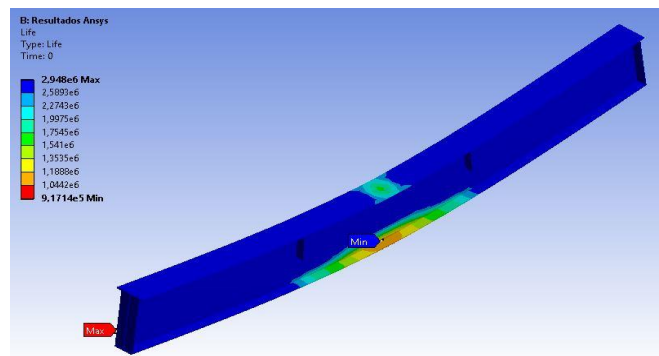


Figura 15. Viga com 2 enrijecedores curtos - Tensão Normal (MPa)

### 5.3. Viga com 2 enrijecedores tipo mão francesa g acima do centroide

São mantidas todas as características do modelo referencial do Bellei alterando apenas o tipo do enrijecedor intermediário para o enrijecedor do tipo Mão Francesa. Também reduzida a quantidade de enrijecedores de 6, 3 de cada lado, para 4, 2 de cada lado, posicionados equidistantes na alma.

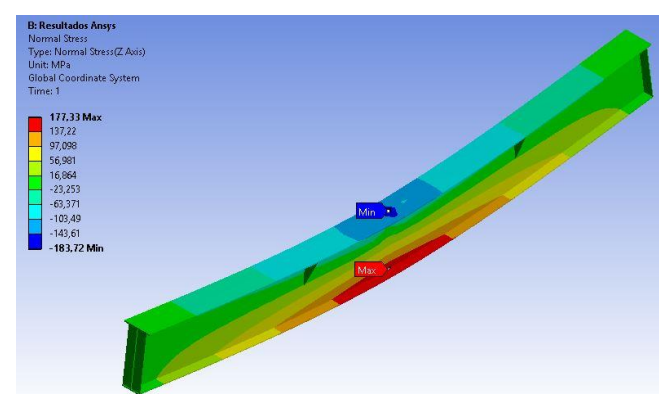


Figura 17. Viga com 2 Enrijecedores do tipo Mão Francesa – Tensão Normal (MPa)

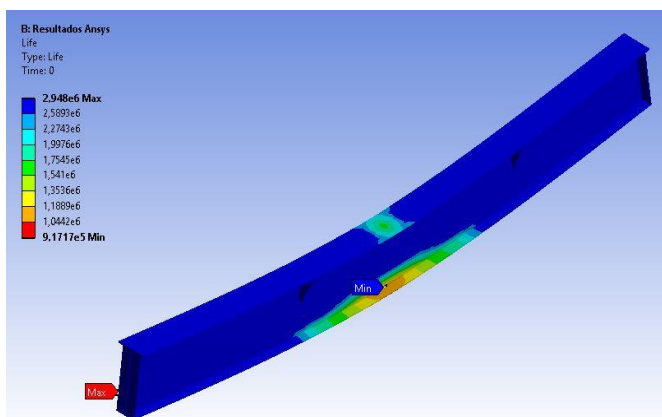


Figura 18. Viga com 2 Enrijecedores do tipo Mão Francesa - Fadiga (ciclos)

### 5.4. Resumos de resultados

A Tabela 3 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 este está aplicado.

Quando da diminuição do número de enrijecedores de 3 para 1, os valores quanto a fadiga se mantém, sendo que nestes casos, a posição do enrijecedor central é a mesma. 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.

Tabela 3. Resumo comparativo dos resultados

VIGA	TENSÃO NORMAL VON MISES MPa		VIDA A FADIGA NUMERO DE CICLOS		Diferença de números de ciclos	% variação de Ciclos	Quant enrij.	Peso enrij. Intermediários Kg	Δ Peso total enrijecedores Intermediários
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo					
<b>VIGA ORIGINAL BELLEI 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%
<b>VIGA 2 ENRIJECADORES CURTOS</b>	-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 AREDONDADOS	-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%
<b>VIGA 2 ENRIJECADORES MÃO FRANCESA</b>	-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 ARREDONDADO	-174,07	177,81	900.920	2.948.000	114.810	12,74	2	3,31	-74%
VIGA 3 ENRIJECADORES MÃO FRANCESA AREDONDADO	-173,98	177,80	900.920	2.948.000	114.810	12,74	6	9,92	-23%

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo mostrou a adequação da utilização de recursos computacionais para se avaliar a resistência quanto à fadiga de estruturas metálicas.

O resultado encontrado, mostrou ser possível se alcançar o objetivo de se construir a Viga de Rolamento mais economicamente, a partir da variação do posicionamento e da geometria dos enrijecedores. Sendo assim, com relação à economia de material, a melhor opção estudada é a de enrijecedores curtos, retos, em número de 2 de cada lado. Neste caso a redução do peso em aço, 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.

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.

## 6. 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 16147: 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, Ansys program version 16.0. Finite Element Software. Ansys Incorporation, 2016.

AZEVEDO, D. F. O. Análise Estrutural com Ansys Workbench: 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, I. H. Edifícios Industriais em Aço -Projeto e Cálculo. 6ª. Ed. PINI, São Paulo, 2010.

BRASIL, H. V. Máquinas de Levantamento. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois S.A. 1985.

FABEANE, R.; FICANHA, R. A.; PRAVIA, Z. M. N. C. Verificação à fadiga de vigas de rolamento de pontes rolantes industriais. 2012, ABACEM, CONSTRUMETAL, 2012.

FARIA, M. C. M.; CIOFFI, M. O. H. E.; BOTELHO, E. 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, M. C. 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, M C; SOUZA, F. T; PAULA, G. D. 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, D. J. C. G. Determinação de resistência à fadiga em aços ABNT 4140 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, L. R. S. 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, T. R.; FILHO, N. N. A.; GOMES, P. T. V.; RABELLO, E. G.; SILVA, L. L.; SCORALICK, G. A.; SANTOS, M. C. V.; BRACARENSE, A. Q. 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, Z. M. C. 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, L. V. T. 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, F. D. M. 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, G. 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, P.; SEMPRUCH, J. 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, R. C.; PRAVIA, Z. 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.