

VERIFICAÇÃO À FADIGA DE SUPORTES DE APOIO SOLDADOS DE UM TRANSPORTADOR DE CORREIA DE ALTO-FORNO

Fatigue analysis of welded supports of a blast furnace belt conveyor

Marcos Cordeiro Fonseca ¹; Flávio Teixeira de Souza ²; Geraldo Donizetti de Paula ³

Recebido em 17 de novembro de 2017; aceito em 23 de abril de 2018; disponível on-line em 12 de setembro de 2018.



PALAVRAS CHAVE:

Transportador de correia;
 Suportes de apoio;
 Uniões soldadas;
 Fadiga;
 Análise.

KEYWORDS:

Belt conveyor;
 Support;
 Welded connections;
 Fatigue;
 Analysis.

RESUMO: Transportadores de correia utilizados em altos-fornos de usinas siderúrgicas normalmente estão sujeitos a condições severas de carregamento que requerem longo período de vida em constantes carregamentos e descarregamentos de material durante o transporte. Essa condição resulta em ciclos alternados de fadiga cuja intensidade pode ocasionar descontinuidades na estrutura, sobretudo nas uniões soldadas. O presente trabalho tem por objetivo expor os métodos de análise de fadiga em uniões soldadas e apresentar a avaliação de um suporte de apoio de estruturas de transportadores de correia através dos requisitos estabelecidos por normas regulamentadoras vigentes em consonância com os métodos computacionais adequados. Para desenvolver a análise foi seguido o procedimento metodológico composto por levantamento de dados em campo e com hipóteses assumidas nas condições mais próximas às reais. Os resultados obtidos neste trabalho apresentam os ciclos de vida e as faixas de tensão para o suporte de apoio soldado em comparação com dados observados no contexto siderúrgico. É apresentado, também, um diagrama da rotina de análise de fadiga em elementos estruturais soldados que pode ser utilizado em análises semelhantes a fim de obter uma visão sistêmica das etapas de desenvolvimento da análise.

ABSTRACT: Blast furnaces belt conveyors of steel mills are usually subject to severe loading conditions which require a long life with constant loading and unloading of material during transportation. This condition results in alternating cycles of fatigue whose intensity can cause cracks in the structure, especially in welded joints. The present work aims to expose the methods of fatigue analysis in welded joints and to show the evaluation of a belt conveyor structure support through the requirements established following regulatory standards in parallel with the appropriate computational methods. A methodologic procedure with filed data and hypothesis was followed to develop the analysis. The results achieved present the life cycles and the stress ranges on the welded support comparing with data of a Steel Making Plant. A diagram of fatigue analysis is proposed aiming to get a general view of the fatigue analysis steps.

* Contato com os autores:

¹ e-mail: marcoscofonseca@hotmail.com (M. C. Fonseca)

Engenheiro Mecânico, Mestre, Universidade Federal de Ouro Preto.

² e-mail: flavio.souza@ifmg.edu.br (F. T. Souza)

Engenheiro Civil, Dr., professor, Instituto Federal de Minas Gerais - Campus Ouro Preto.

³ e-mail: geraldo@em.ufop.br (G. D. Paula)

Engenheiro Civil, Dr., professor, Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto.

1. INTRODUÇÃO

Transportadores de correia industriais são largamente utilizados nos segmentos industriais de mineração, siderurgia, indústria alimentícia, área automotiva, entre outros. Devido à sua extrema importância logística, e também aos elevados carregamentos a que está submetida, a estrutura em sua totalidade deve ser devidamente avaliada a fim de garantir um dimensionamento que seja tanto estável quanto econômico (CEMA, 2007).

Segundo a NBR 8800 (ABNT, 2008), em edifícios, a ocorrência dos efeitos máximos, terremoto ou de fortes ventos são raros no Brasil e não requerem considerações quanto à fadiga. Entretanto, estruturas de sustentação de pontes rolantes e de máquinas normalmente estão sujeitas às condições de fadiga. Inseridos no segmento das máquinas industriais, os transportadores de correias, em determinadas situações, podem estar em casos extremos de aplicação, assim, o colapso inesperado da estrutura de um transportador pode causar prejuízos drásticos à produção, à segurança e ao meio ambiente. Baseado em histórico de falhas registradas em campo, na siderurgia é possível notar que o colapso da estrutura de um transportador apresenta-se em dois modos mais comuns: (i) devido ao excesso de material na correia - ocasionando flambagem nos elementos comprimidos e (ii) devido à propagação de trincas nas uniões soldadas em função do número de ciclos aplicados, sendo este o mais recorrente e conexo ao conceito de fadiga em ligações

soldadas.

Neste artigo apresenta-se como objetivo central a avaliação da vida em fadiga de suportes de apoio de estruturas de transportadores de correia em acordo com o mais apropriado método de análise selecionado para concatenar os métodos analíticos e computacionais. Além disso, são apresentados o modelo gerado para analisar o suporte de apoio estrutural mais solicitado e a proposta de uma rotina geral de análise para avaliação da vida em fadiga de uniões soldadas. A análise tem o objetivo de avaliar a vida útil do suporte para evitar danos inesperados em suportes soldados de transportadores através da estimativa do número de ciclos visando à adoção de métodos preventivos quando da proximidade do final de ciclo previsto.

Para conduzir as análises de fadiga de um elemento estrutural, estimativas de tensões devido às solicitações externas também devem ser procedidas. Tais estimativas podem ser feitas através de medições em campo, que são onerosas, ou por meio de aproximações algébricas, que podem ser imprecisas. Como alternativa aos métodos teóricos aproximados e às medições em campo, pode ser utilizada a avaliação de tensões em elementos estruturais utilizando o método dos elementos finitos, que possibilita a simulação de comportamentos mais próximos aos reais além da avaliação de como as variáveis de contorno influenciam nos resultados obtidos, tornando-se justificável sua utilização a fim de buscar a otimização de recursos e custos envolvidos no desenvolvimento de um projeto.

2. ANÁLISE DE FADIGA

Segundo Lira Júnior (2006), fadiga é um dos modos de falha estrutural mais ocorrentes em elementos mecânicos, cujo percentual de avarias é registrado em torno de 90% nas máquinas e em equipamentos em geral que estão submetidos a carregamentos cíclicos. A Figura 1 ilustra a representação gráfica da nomenclatura essencial das solicitações de fadiga em casos de combinação de uma solicitação estática com uma solicitação cíclica, como na maioria das situações práticas relacionadas à fadiga (Branco, 1999).

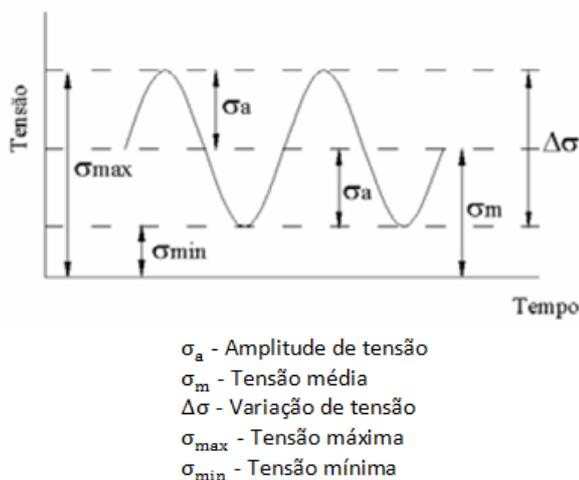


FIGURA 1: Representação gráfica das solicitações de fadiga.

FONTE: Adaptado de Branco (1999).

2.1 FADIGA NOS METAIS

Segundo Lira Júnior (2006), na bibliografia moderna há três métodos comumente utilizados para o cálculo de fadiga: método da vida sob tensão (curvas S-N), método da vida sob deformação (curvas ϵ -N) e o método da mecânica da fratura linear elástica (da/dN). No método da vida sob tensão a avaliação à fadiga é baseada nas curvas tensão (S) versus números de ciclos para falha (N), curvas S-N, cuja obtenção é realizada de modo experimental e podem ser encontradas para diferentes tipos de material através de bibliografias específicas e de normas e códigos de projeto que dizem respeito ao tema. O Método da

vida sob deformação é essencialmente utilizado para analisar casos em que a solicitação externa aplicada resulta na ocorrência de deformação plástica cíclica, isso por se tratar de uma metodologia que considera os efeitos oligocíclicos¹ em suas hipóteses. A relação empírica que gera a curva ϵ -N entre o número de ciclos até a ruptura e a deformação do elemento é dada pela Equação 1.

$$(\mathbf{N})^{\frac{1}{2}} \Delta\epsilon = \mathbf{C} \quad \text{Eq. [1]}$$

Em que:

N = número de ciclos até a ruptura;

ϵ = deformação do elemento (mm);

C = constante.

A análise pela mecânica da fratura tem por objetivo prever a vida à fadiga integrando a lei de crescimento de fissura relevante, sendo possível obter o número de ciclos requerido para a propagação da trinca do tamanho inicial, a_i , até o tamanho final, a_f , conforme a Equação 2.

$$\mathbf{N} = \mathbf{N}_i + \frac{1}{\mathbf{A}} \int_{a_i}^{a_f} \frac{1}{(\Delta\mathbf{K})^m} da \quad \text{Eq. [2]}$$

Em que:

N = número de ciclos para a propagação da trinca;

N_i = vida para iniciação da fissura;

A = constante de material;

m = constante de material;

a_i = tamanho inicial da trinca (mm);

a_f = tamanho final da trinca (mm);

$\Delta\mathbf{K}$ = Amplitude do fator de intensidade de tensão.

2.2 FADIGA EM ESTRUTURAS SOLDADAS

A soldagem é uma das técnicas de união mais difundidas no âmbito das estruturas metálicas devido à sua aplicabilidade em diversas configurações geométricas. Contudo, o processo de soldagem engloba alguns fatores que afetam o processo de fadiga. Segundo Branco (1999), os fatores mais importantes que afetam o processo de fadiga são a presença de concentração locais e

¹ Fadiga oligocíclica está relacionada aos casos em que a solicitação externa aplicada acarreta a deformação plástica cíclica e, nesses casos, as considerações devem ser tratadas a parte (BRANCO, 1999).

o meio ambiente que envolve o objeto de análise. Esses parâmetros podem conduzir ao principal modo de falha observado nas ligações soldadas: fissuras relacionadas à fadiga.

Segundo Lira Júnior (2006), as falhas por fadiga nas regiões soldadas são mais recorrentes quando comparadas às bases metálicas no geral. Por essa razão, métodos específicos foram desenvolvidos para análise de ligações soldadas, sendo quatro os métodos geralmente utilizados para conduzir às análises de fadiga: Tensão Nominal (*Nominal Stress*), Tensão Estrutural (*Geometric Stress, Structural Stress* ou *Hot Spot Stress*), Tensão de Entalhe (*Notch Stress*) e Mecânica da Fratura (*Linear Elastic Fracture Mechanics - LEFM*) (Bak, 2013).

Segundo Malikoutsakis e Savaidis (2009), a precisão da análise de fadiga está relacionada com a complexidade de obtenção dos respectivos resultados em função do esforço requerido para realizar a análise. A Figura 2 mostra uma comparação qualitativa entre os métodos de análise de fadiga em questão.

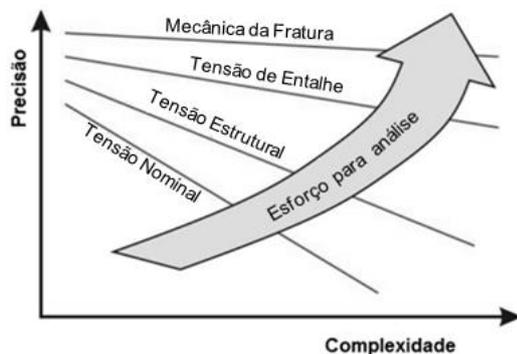


FIGURA 2: Comparação qualitativa entre os métodos de análise de fadiga em uniões soldadas.

FONTE: Adaptado de Malikoutsakis e Savaidis (2009).

A seleção do método adequado para avaliar a vida do elemento soldado depende dos seguintes parâmetros: a natureza do problema; se o método é válido para a aprovação de um componente particular; se o projeto da união soldada é catalogado em um padrão de soldagem; e a capacidade de criar modelos numéricos para análises detalhadas das regiões de solda locais (Bak, 2013).

Segundo Aygül (2012), o método da tensão nominal baseia-se principalmente na tensão média da seção transversal considerando o comportamento elástico linear geral. A tensão local, que maximiza os efeitos entre a solda e a placa de base, é desconsiderada nesse método. Entretanto, os efeitos das configurações geométricas ou irregularidades do componente principal devem ser incluídos na análise conforme o que normas e códigos prescrevem. A Figura 3 ilustra a distribuição de tensão para um caso de tensão nominal (σ_{nom}) em uma placa com solda de canto.

O conceito de Tensão Estrutural foi desenvolvido para permitir a avaliação da resistência à fadiga de estruturas soldadas nos casos em que a utilização da tensão nominal é inviável devido à complexidade geométrica e/ou devido às cargas de solitação (Aygül, 2012). A ideia fundamental desse método é considerar a tensão do componente ortogonal à linha da solda e reduzi-la a uma distribuição linear, conforme ilustra a Figura 4 onde se vê uma distribuição de tensões idealizada pela Tensão Estrutural, $\Delta\sigma_{hss}$ (Marin e Nicoletto, 2009).

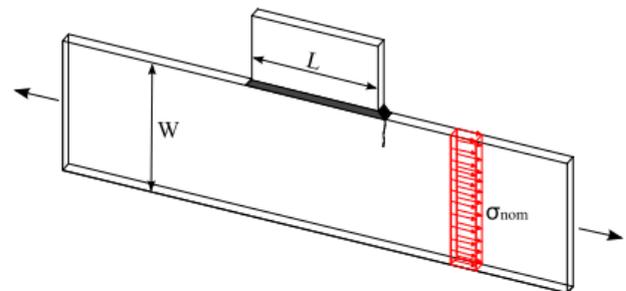


FIGURA 3: Tensão Nominal numa placa com solda de canto.

FONTE: Adaptado de Aygül (2012).

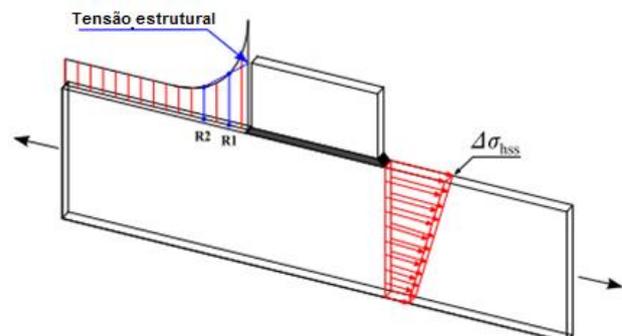


FIGURA 4: Tensão Estrutural numa placa com solda de canto.

FONTE: Adaptado de Aygül (2012).

O método da Tensão de Entalhe baseia-se principalmente no estado de tensão mais elevado calculado nos pontos críticos, ou seja, nos pontos de iniciação de fissuras. O fundamento desse método tem como referência a teoria de micro suporte de acordo com a Regra Neuber. A Figura 5 ilustra a distribuição de tensões ($\Delta\sigma_{\text{Eff}}$) na união soldada de acordo com o conceito de Tensão de Entalhe.

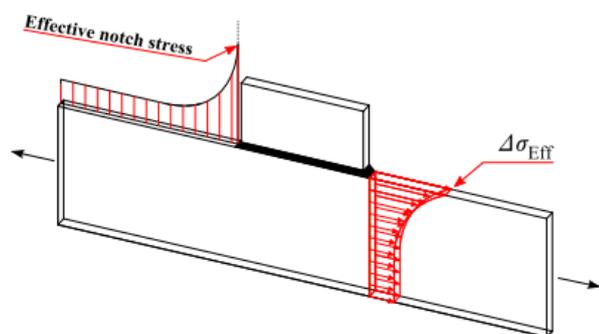


FIGURA 5: Tensão de Entalhe numa placa com solda de canto.

FONTE: Adaptado de Aygül (2012).

2.3 VERIFICAÇÃO À FADIGA: CÓDIGOS E ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO

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. Como um terceiro estado limite, a fadiga pode ser considerada, sabendo que esta vem ganhando cada vez mais importância nas normas vigentes (Afonso, 2007). Nos mais difundidos códigos, os procedimentos de cálculo se baseiam no conceito de resistência à fadiga e são representados por diagramas S-N (tensão cíclica causadora do fenômeno versus o número de ciclos). E, quando se fazem verificações à fadiga de uma estrutura soldada, de modo implícito é assumido que as ligações foram dimensionadas consistentemente para suportar as solicitações máximas que são aplicadas em condições estáticas (Branco, 1999).

Considerando a norma NBR 8800 (ABNT, 2008), o anexo K de caráter normativo salienta que as prescrições aplicam-se a elementos estruturais de aço e ligações metálicas que estão sujeitos a

ações com elevado número de ciclos e com variação de tensões no regime elástico em que as frequências e magnitudes podem resultar em fissuras e colapso por fadiga. Outros critérios estipulados pela NBR 8800 (ABNT, 2008) relacionam-se com a faixa de variação de tensões e com o número de ciclos de aplicação das ações variáveis. No primeiro caso, é salientado que nenhuma verificação de resistência à fadiga é necessária se a faixa de variação de tensões for inferior aos limites definidos nas tabelas dos detalhes construtivos de ligações soldadas. Para o segundo caso, é prescrito que não se faz necessária nenhuma verificação de fadiga caso o número de ciclos de aplicação das solicitações variáveis for menor que 20.000. De acordo com as categorias dos detalhes de ligação soldada, a faixa de variação de tensões não deve exceder os valores definidos pela classe correspondente ao detalhe.

Segundo Hobbacher (2008), a resistência à fadiga geral da estrutura é dependente da resistência à fadiga dos diversos detalhes de ligações soldadas que integram a própria estrutura. Dessa forma, a resistência à fadiga depende de dois fatores cruciais: (i) da faixa de tensões aplicadas ($\Delta\sigma = \sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{min}}$) e (ii) da concentração de tensões condicionadas pela geometria da junta ou imperfeições presentes na solda (Branco, 1999). Conhecidos os carregamentos, é possível definir o espectro de solicitações com as respectivas faixas de tensões. Assim, deve-se definir a categoria do detalhe da união correspondente a uma curva S-N que caracteriza seu comportamento à fadiga. Após essas definições torna-se possível estimar a vida da ligação soldada e compará-la com a duração requerida no projeto da estrutura.

O EUROCODE 3 considera que os métodos de análise de resistência à fadiga são provenientes de testes com corpos-de-prova que incluem efeitos geométricos e imperfeições de fabricação do material, por exemplo, efeitos de tolerância geométrica e tensões residuais de soldagem. As especificações dessa norma são para

previsão de vida à fadiga de barras e ligações soldadas, cujas resistências estabelecidas são aplicadas às estruturas que operam sob condições atmosféricas normais providas de adequada proteção contra corrosão. Efeitos de corrosão devido às águas marinhas e danos macroestruturais devido à alta temperatura (maior que 150°C) não são cobertos pela norma.

3. METODOLOGIA

O estudo teórico na literatura específica conduziu às definições dos métodos mais apropriados para o dimensionamento e análise da estrutura de um transportador e seus suportes com ligações soldadas. As definições dos parâmetros necessários são de fundamental importância para o levantamento dos dados de entrada do projeto. O levantamento dos dados em campo conduziu às ponderações coerentes em termos de definição dos carregamentos e hipóteses que podem ser assumidas para o posterior dimensionamento que engloba os fatores mais básicos de um projeto: segurança, viabilidade, aspectos ambientais e eficiência. Por fim, a verificação e a análise do projeto são determinantes à confiabilidade e à garantia do produto final.

Com o intuito de analisar o comportamento à fadiga das uniões soldadas do suporte de apoio de um transportador de correia para alto-forno, o dimensionamento e a análise estrutural são cruciais para a determinação dos esforços atuantes em cada apoio do sistema, cuja função se resume em fazer a conexão entre a estrutura principal do transportador e seus pilares. A Figura 6 ilustra o transportador de correia objeto de estudo.

Definidas as características mecânicas do transportador de correia em função da demanda de produção que deve ser atendida pela linha, tornou-se possível estimar as solicitações atuantes na estrutura do transportador, cujo funicular natural são os suportes de apoio seguidos dos pilares engastados à fundação. Dessa forma, conhecidas as solicitações de projeto, a análise do suporte de apoio objeto de estudo torna-se factível para proporcionar a avaliação de fadiga.

As principais solicitações que atuam na estrutura do transportador de correia em análise são: carregamento devido ao vento, carga de material em transporte na correia (solicitação cíclica), carga dos acessórios do transportador (roletes, correia de lona, suportes, tambores, dentre outros), carregamento devido à cobertura e fechamentos e o peso próprio da estrutura do transportador (FEM, 1997).

O carregamento imposto pelos ventos é definido conforme a NBR 6123 (ABNT, 1988). As solicitações referentes ao material transportado na correia e às majorações de carga em movimento e de derramamento são determinadas de acordo com os procedimentos estabelecidos por CEMA (2007). Os acessórios que compõem o transportador de correias podem ter suas respectivas massas estimadas através de catálogos de fabricantes. O carregamento devido à cobertura e aos fechamentos verticais também é determinado a partir de catálogos técnicos. Por fim, o peso próprio da estrutura pode ser determinado pelas características dos perfis selecionados através de catálogos, embora neste trabalho esta determinação seja feita através do próprio *software* de modelagem e análise. A Tabela 1 mostra as solicitações que atuam na estrutura e no suporte de apoio do transportador.

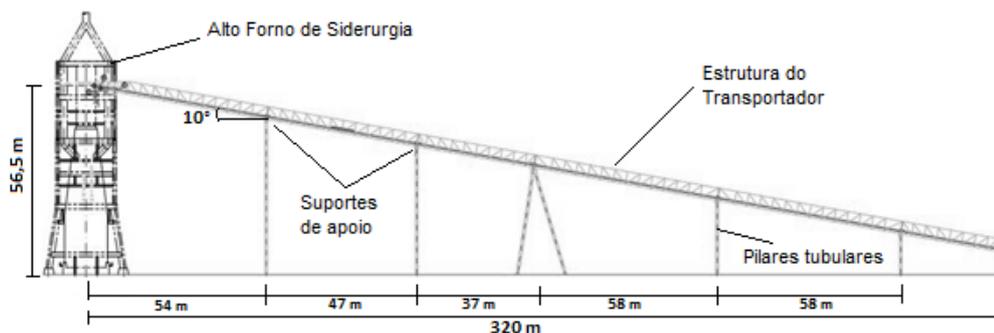


FIGURA 6: Transportador de correias para abastecimento de alto-forno na siderurgia.

FONTE: Acervo do autor.

TABELA 1: Solicitações atuantes na estrutura e no suporte de apoio do transportador.

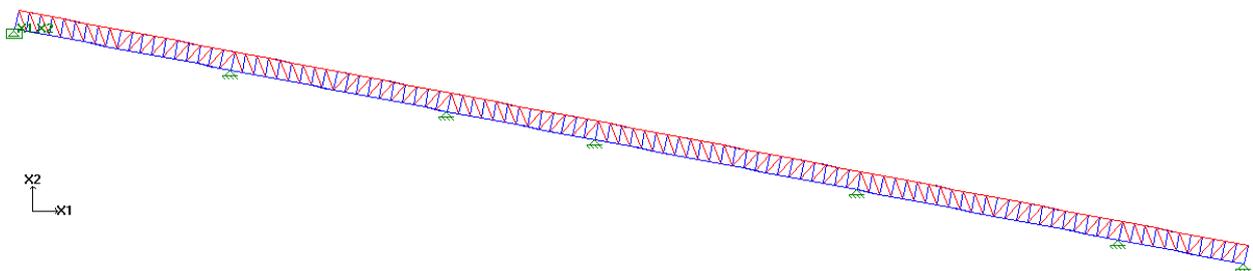
Cobertura:	312,5 kgf/m
Carga dos acessórios:	363,0 kgf/m
Carga de vento por galeria:	
Altura 5,0m:	36,83 kgf/m ²
Altura 10,0m:	42,14 kgf/m ²
Altura 15,0m:	45,89 kgf/m ²
Altura 20,0m:	48,80 kgf/m ²
Altura 30,0m:	52,82 kgf/m ²
Altura 40,0m:	55,95 kgf/m ²
Altura 50,0m:	59,16 kgf/m ²
Altura 60,0m:	61,35 kgf/m ²
Sobrecarga de material na correia:	816,6 kg/m
Percentual de majoração carga em movimento:	20%
Percentual de majoração derramamento:	10%
Sobrecarga de material corrigida:	1061,58 kg/m
Peso próprio dos perfis estruturais:	Através do <i>software</i>

FONTES: Autoria própria.

Conhecidos os carregamentos que atuam na estrutura do transportador, torna-se possível modelá-la e analisar seu comportamento, bem como as reações impostas por esta aos suportes de apoio alvo do desenvolvimento deste trabalho. A Figura 7 ilustra a modelagem da estrutura através de elementos de barra com seus devidos suportes de apoio, cuja implementação foi realizada com o auxílio do software STRAP 2008². (STRAP, 2008).

As reações nos suportes e os deslocamentos estimados que definem o ciclo alternado de fadiga são obtidos para as condições

do transportador sem sobrecarga de material (situação que resultará na tensão mínima do diagrama de fadiga) e com material em transporte (situação que resultará na tensão máxima do diagrama de fadiga), além das demais solicitações que atuam em ambos os casos mostradas na Tabela 1. A Tabela 2 apresenta a combinação das solicitações adotadas em função das condições de serviço do transportador de correia em estudo, conforme FEM Section II (FEM, 1997) para a condição de combinação que pode se apresentar durante a operação normal.

**FIGURA 7:** Vista lateral da estrutura em barras do transportador em análise.

FONTES: Autoria própria.

² O *software* STRAP 2008[®] é desenvolvido pela ATIR Engineering Software Development LTD e utiliza dois tipos de elementos para análise: elementos de barras unidirecionais e elementos finitos bidimensionais.

TABELA 2: Combinação das solicitações (FEM, 1997).

Condição de solicitação	Solicitações atuantes
Sem sobrecarga de material na correia	Cargas permanentes (acessórios, cobertura e peso próprio da estrutura) e carga devido ao vento.
Com sobrecarga de material na correia	Carga de material na correia, cargas permanentes (acessórios, cobertura e peso próprio da estrutura) e carga devido ao vento.

FONTE: Adaptado de FEM (1997).

Na primeira condição, sem sobrecarga de material na correia, o suporte mais solicitado apresentou as reações de 28,16 kN na direção horizontal e de 905,24 kN na direção vertical do apoio. Na segunda condição, considerando a sobrecarga de material em transporte, o suporte mais solicitado apresentou as reações no apoio de 1318,21 kN na direção vertical e 29,15 kN na direção horizontal. Conhecidas essas reações, as tensões atuantes no suporte de apoio são estimadas para posterior análise dos ciclos de fadiga.

Um modelo tridimensional do suporte de apoio foi gerado a fim de identificar os pontos críticos das uniões soldadas após a análise numérica. Tal suporte é composto por ligações entre os pilares e a estrutura própria do transportador, com a inclusão de enrijecedores, a

fim de que a ligação tenha elevada rigidez, aproximando-se do tipo engastado. Para gerar o modelo do suporte de apoio, foi utilizado o software NX 9.0³ (NX9.0, 2013). A Figura 8 ilustra o modelo CAD (*Computer Aided Design*) do suporte de apoio com as suas ligações soldadas e as condições de contorno assumidas, as quais foram baseadas nas condições mais próximas em relação ao transportador de correia real. Entre essas condições, as fundamentais são o engastamento das extremidades inferiores do suporte de apoio e os carregamentos localizados nas regiões de fixação da estrutura do transportador de correias. O material de construção do suporte de apoio é o aço ASTM A-36 com massa específica de 7,86 ton/m³ e tensão de escoamento à tração de 250 MPa.

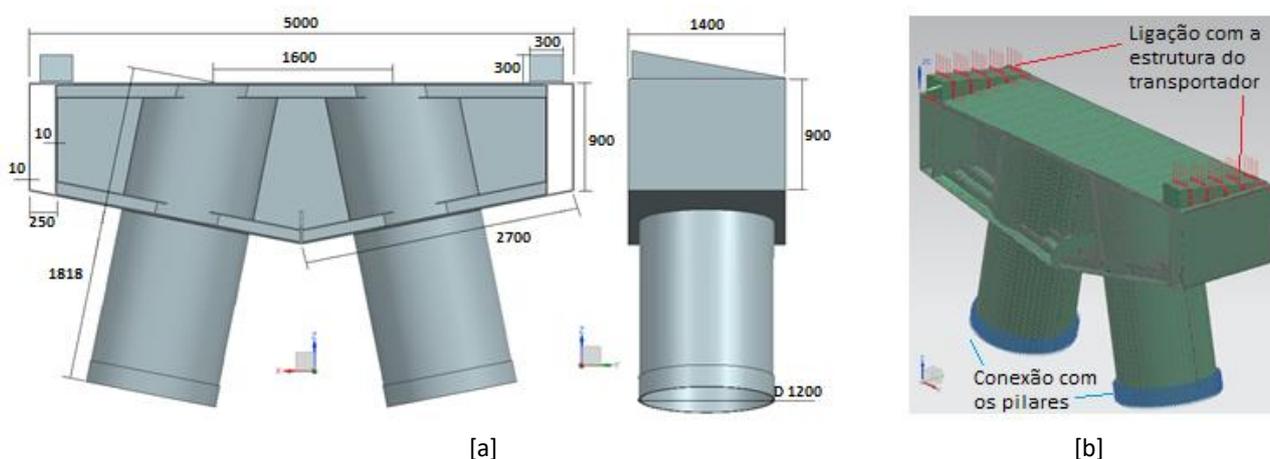


FIGURA 8: [a] Detalhes do suporte de apoio e [b] condições de contorno.

FONTE: Autoria própria.

³ O software NX9.0[®] é distribuído pela Siemens PLM Software e tem por característica a integração das modalidades *Computer Aided Design* (CAD), *Computer Aided Engineering* (CAE) e *Computer Aided Manufacturing* (CAM).

Posterior à modelagem do suporte foi desenvolvida a análise numérica com o intuito de estimar a faixa de tensão atuante devido às situações de carregamento apresentadas na Tabela 1. Para tal análise utilizou-se a plataforma NASTRAN da MSC Software® disponível no próprio software NX 9.0®. Os dados da malha de

elementos finitos utilizada na análise são apresentados na Tabela 3.

As Figuras 9 e 10 ilustram, respectivamente, as tensões de von Mises estimadas para as condições de solicitação sem sobrecarga e considerando sobrecarga de material em transporte na correia.

TABELA 3: Parâmetros da malha de elementos finitos.

Tipo dos elementos	Volume - 3D
Com sobrecarga de material na correia	Quadrilateral – CTETRA (10)
Tamanho médio dos elementos	3,05 pol.
Número total de elementos da malha	458.279 unid.
Número total de nós	690.212 unid.

FONTE: Autoria Própria.

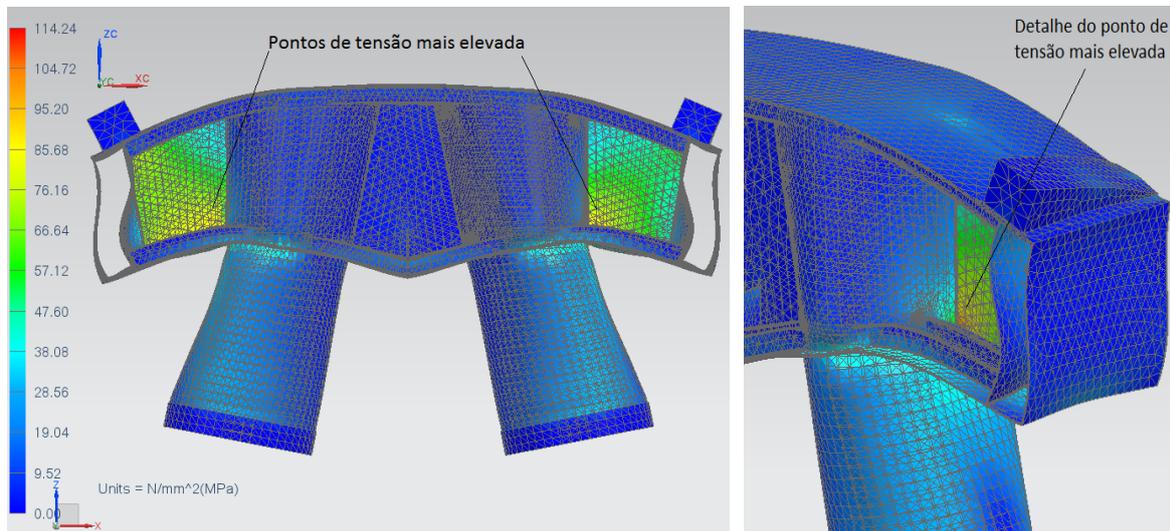


FIGURA 9: Tensão de von Mises no suporte sem sobrecarga de material: 114,24 N/mm². Escala 1:10.

FONTE: Autoria própria.

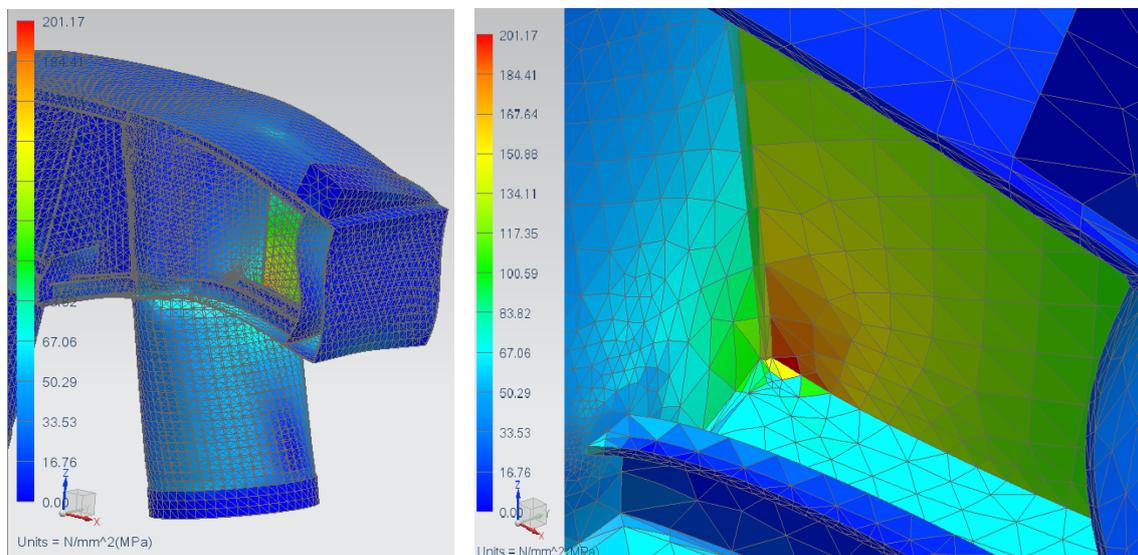


FIGURA 10: Tensão de von Mises no suporte com sobrecarga de material: 201,17 N/mm². Escala 1:10.

FONTE: Autoria própria.

Na condição de solicitação sem sobrecarga o deslocamento máximo foi de 1,33 mm e na condição de solicitação com sobrecarga de material o deslocamento máximo foi de 2,32 mm. Em ambos os casos, as análises foram conduzidas considerando um sistema estático conforme preconizado por CEMA (2007). A partir da determinação da faixa de tensões atuante no suporte, tornou-se possível desenvolver a análise de fadiga. Foram consideradas as prescrições da NBR 8800 (ABNT, 2008), do IIW (*International Institute of Welding*) e do EUROCODE 3, cujas recomendações são aplicáveis a juntas de aço soldadas, semelhantes às que compõem o suporte de apoio. Para o cálculo da vida à fadiga pelas três prescrições selecionadas, faz-se necessário conhecer a faixa de tensões que atua no detalhe analisado e a classificação que melhor enquadra tal detalhe. A categoria da solda analisada e o limite de resistência à fadiga propostos pelas três normas são mostrados na Tabela 4.

A tensão máxima de von Misses obtida pela análise tridimensional, conforme mostra a Figura 10, foi de 201,17 MPa na condição de haver sobrecarga de material na correia transportadora. A tensão mínima (valor da máxima tensão atuante sem sobrecarga de material na correia) foi de 114,24 MPa, de acordo com a Figura 9. Assim, a faixa de variação de tensões entre as duas condições de sobrecarga corresponde à variação máxima de 86,93 MPa, a qual comparada com o limite de resistência das normas implica à necessidade de avaliação da vida em fadiga, pois, tal valor está acima do limite de resistência à fadiga estabelecido pelas normas de referência, aproximadamente 20% em relação à NBR8800 (ABNT, 2008) e ao IIW e em 8% em relação ao

EUROCODE 03. Adjacente às estimativas dos ciclos para falha é possível representar as coordenadas de tensão versus ciclos nas curvas S-N provenientes das normas a fim de facilitar a comparação entre as tensões limites de fadiga e os ciclos para falha estimados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ESTIMATIVAS DA VIDA À FADIGA DO SUPORTE DE APOIO

Diante das estimativas das reações impostas pelos suportes de apoio, observa-se que as cargas atuantes na estrutura do transportador possuem magnitudes consideráveis por se tratar de ordens de grandeza próximas a 102 toneladas-força.

Quanto aos valores estimados no modelo numérico, a distinção dos valores de tensão é notável no que diz respeito à variação de carga na correia. Na condição de sobrecarga de material na correia comparada à condição sem sobrecarga observa-se uma faixa de variação de tensão da ordem de 86,93 MPa, valor este que classifica o suporte de apoio nas condições de vida à fadiga das normas adotadas.

Na condição de funcionamento do transportador de correias de alto-forno, a faixa de variação de tensões modifica-se ao longo do tempo de acordo com a demanda de abastecimento de matérias primas para o interior do forno. Caso o intervalo de tempo entre o carregamento e o descarregamento seja amplamente variável, um dos valores de tensão pode se mostrar mais recorrente em relação ao outro. Entretanto, esse evento pode não impactar diretamente na análise de fadiga pelo fato dos

TABELA 4: Categorias do detalhe da solda e limites da faixa de variação de tensão.

Norma	Categoria de Tensão	Limite de resistência à fadiga
NBR 8800:2008	C	69 MPa
IIW	FAT 71	71 MPa
EUROCODE 3	80	80 MPa

FONTE: Aatoria Própria.

itens cruciais da análise de fadiga serem a faixa de variação de tensão e o número de ciclos no qual o elemento está sujeito, ou seja, o ponto fundamental é conhecer o período de tempo que há entre as diferentes sobrecargas de material na correia.

Após a determinação da faixa de tensões atuante no suporte de apoio, é possível estimar os ciclos de vida previstos para suportar tais variações. As equações para determinação do número de ciclos de vida em função da tensão aplicada são apresentadas na Tabela 5 com as respectivas normas regentes e os números de ciclos previstos para a vida à fadiga do detalhe soldado do suporte em questão.

Para cada norma de referência é possível representar a faixa de variação de tensões do detalhe soldado em função do número de ciclo previsto. A representação da estimativa do ciclo de vida através dos gráficos S-N dispostos nas normas possibilita a constatação da coerência dos resultados em comparação à resistência a fadiga das categorias de detalhes previamente estabelecidas nas normas de referência.

Pela NBR 8800 (ABNT, 2008), a curva S-N global é gerada pela equação governante do detalhe soldado levando em consideração a constante da categoria correspondente e o limite de resistência à fadiga. A Figura 11 mostra a curva de fadiga comparando a tensão-ciclo do detalhe com a previsão de fadiga para o suporte de apoio através da NRB 8800 (ABNT, 2008).

TABELA 5: Parâmetros que regem a categoria do detalhe soldado.

Norma	Equação governante	Constante para a categoria correspondente	Número de ciclos previstos
NBR 8800:2008	$\sigma_{SR} = \left(\frac{327C_f}{N}\right)^{0,2333}$	$C_f = 44 \times 10^8$	$2,16 \times 10^6$
IIW	$N = \frac{B}{\Delta\sigma^m}$	$B = 7,158 \times 10^{11}; m = 3$	$1,09 \times 10^6$
EUROCODE 3	$\sigma_{SR}^m N = \sigma_c^m 2 \times 10^6$	$\sigma_c = 80 \text{ MPa}; m = 3$	$1,60 \times 10^6$

FONTE: Autoria Própria.

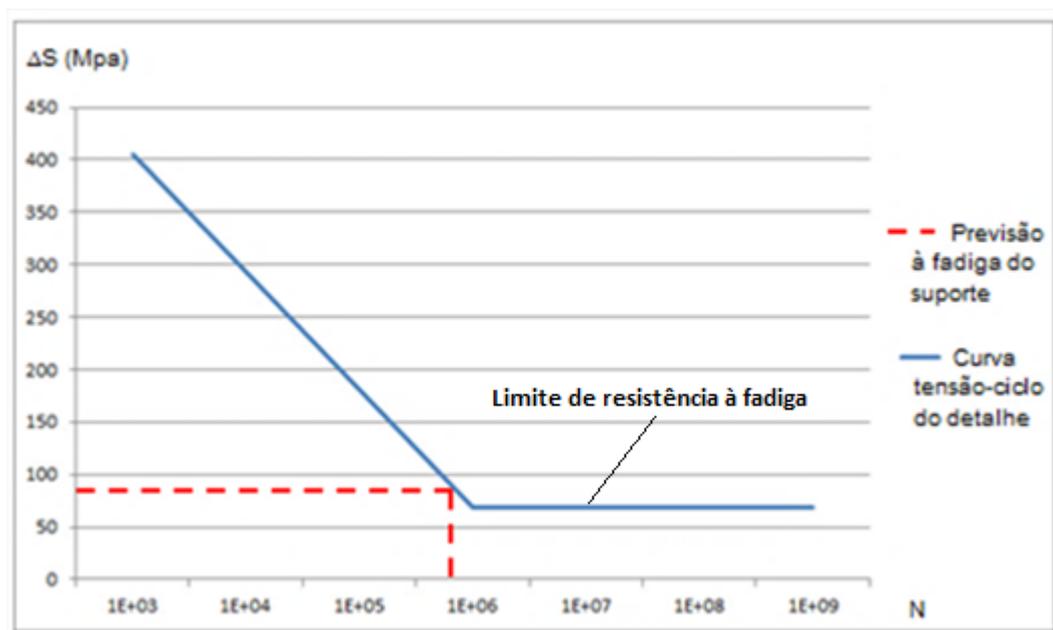


FIGURA 11: Curva S-N com previsão de fadiga pela NBR 8800 (ABNT, 2008).

FONTE: Autoria própria.

De modo análogo à NBR 8800 (ABNT, 2008), o IIW e o EUROCODE 3 também consideram equações governantes para as categorias de detalhe soldado. Nos próprios textos dessas normas são disponibilizadas as curvas S-N correspondentes às classes de fadiga. Além disso, de acordo com a categoria do detalhe a resistência à fadiga é preliminarmente

estabelecida. As representações da previsão de fadiga para o suporte em comparação com a tensão-ciclo do IIW e do EUROCODE 3 são mostradas nas Figuras 12 e 13, respectivamente. Em tais Figuras, a simbologia para os valores de 36 a 160 MPa diz respeito à resistência à fadiga das categorias abrangidas pelas normas em questão.

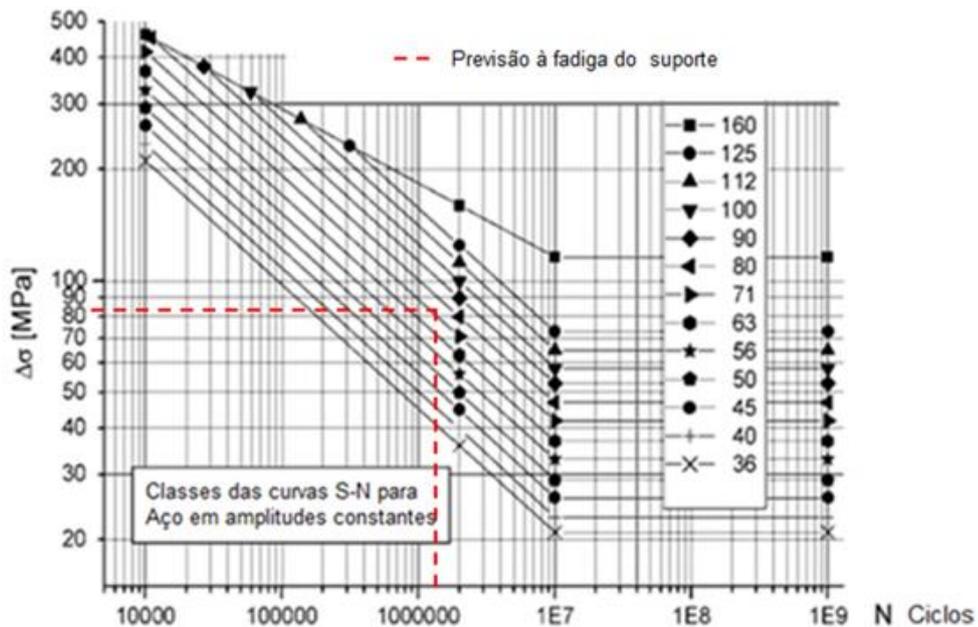


FIGURA 12: Curva S-N com previsão de fadiga pelo IIW.
FONTE: Adaptado de Hobbacher (2008).

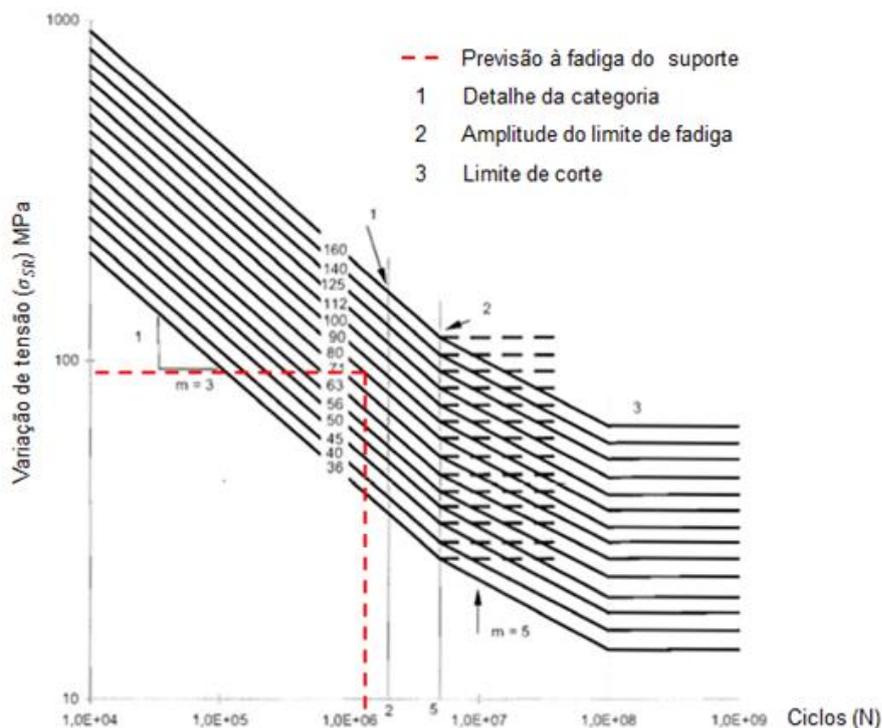


FIGURA 13: Curva S-N com previsão de fadiga pelo EUROCODE 3.
FONTE: Adaptado de EUROCODE 3 (2005).

A partir da análise das curvas geradas para as condições de solicitação do suporte de apoio é possível comprovar a consistência dos resultados obtidos quanto ao ciclo de vida previsto do suporte. As estimativas baseadas nas normas se assemelham à recorrência de falha que é observada no local de instalação do transportador de correia objeto de análise. A Tabela 6 ilustra as condições de utilização observadas em campo para um transportador de correia de alto-forno bem como a recorrência de falha em função do número de ciclos no qual ocorrem as falhas dos suportes de apoio.

De acordo com o número de ciclos para falha mostrado na Tabela 6, é possível observar que as estimativas apresentadas na tabela 5 e nas curvas S-N indicam que a falha ocorreria antes do número do número de ciclos registrado em

campo, quando se trata dos métodos IIW e EUROCODE 3. Nota-se, dessa forma, que esses valores são menores e, portanto, mais conservadores em relação à NBR8800 (ABNT, 2008), que por sua vez apresentou um resultado parcialmente superior ao número de ciclos para a falha observados *in loco*.

4.2 PROCEDIMENTO GERAL DE ANÁLISE DE FADIGA

Junto aos procedimentos utilizados para avaliar o suporte soldado sujeito à fadiga, um fluxo lógico do processo foi seguido para desenvolver as etapas da análise. Dependendo do objetivo da análise de fadiga, algumas etapas podem ser desconsideradas a fim de simplificar a formulação do problema. A Figura 14 ilustra a rotina de análise utilizada no desenvolvimento deste trabalho.

TABELA 6: Condições reais de utilização do transportador de correias em estudo.

Variável	Grandeza
Intervalo de tempo da sobrecarga	2 min
Funcionamento diário	20 h
Funcionamento mensal	30 dias
Funcionamento anual	12 meses
Índice de utilização do transportador	85%
Tempo total de utilização sem falhas	2 anos
Número de ciclos para falha do suporte	$1,47 \times 10^6$ ciclos

FONTE: Autoria Própria.

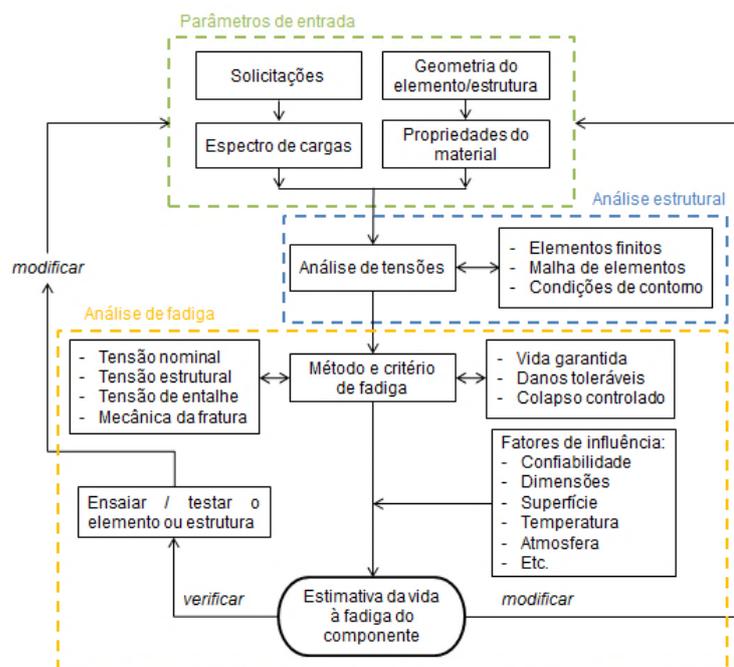


FIGURA 14: Rotina de avaliação da vida à fadiga de um componente soldado.

FONTE: Autoria própria.

Os principais benefícios que podem ser observados ao se seguir tal rotina são: tornar a análise dinâmica à interação entre as etapas e fornecer uma visão global do procedimento a fim de estabelecer as variáveis necessárias para conduzir a análise. Esses benefícios são também sustentados pela facilidade em retornar ou seguir em cada fase da análise, tendo assim uma orientação coerente do procedimento.

5. CONCLUSÕES

O suporte de apoio do transportador de correia de alto-forno foi avaliado quanto à fadiga com base nas prescrições normativas e, após a modelagem e a identificação da região soldada mais crítica em termos das tensões de solicitação, a faixa de tensões encontrada foi de 86,93 MPa, a qual considera a diferença da combinação das solicitações. Esse valor, superior ao limite de resistência à fadiga, mostra que o suporte de apoio deve ser avaliado quanto à vida à fadiga em função do número de ciclos.

A estimativa do número de ciclos através das normas apresenta uma proximidade razoável quando comparada ao número de ciclos levantados em campo até a falha do suporte de apoio, $1,47 \times 10^6$ ciclos. Pela NBR8800 (ABNT, 2008) o número de ciclos para falha é de $2,16 \times 10^6$. De acordo com o IIW e o EUROCODE os valores são, respectivamente, $1,09 \times 10^6$ e $1,60 \times 10^6$.

Na perspectiva de evitar a falha do suporte num período pré-estabelecido, medidas de otimização do modelo podem ser consideradas, por exemplo, modificação da geometria para obter menores valores de tensão, redução da quantidade de material em transporte para gerar menor esforço na estrutura do transportador e adotar maior quantidade de suportes de apoio/pilares objetivando a distribuição do carregamento em maior número de pontos.

Como contribuição às áreas de análise de fadiga, o trabalho propôs uma rotina metodológica para análise de fadiga em elementos estruturais soldados que pode ser utilizado em análises

semelhantes a fim de se obter uma visão sistêmica das etapas de desenvolvimento da análise.

6. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido com o essencial apoio da USIMINAS, a qual se agradece por ter disponibilizado acesso aos programas utilizados na pesquisa.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro, Brasil, 1988.

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

AFONSO, D. F., **Verificação à Fadiga de Pontes Metálicas Ferroviárias**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.

AYGÜL, M., **Fatigue Analysis of Welded Structures Using the Finite Element Method**. Chalmers University Of Technology, Gothenburg, Sweden, 2012.

BAK M., **Fatigue Analysis of a Welded Structure in a Random Vibration Environment**. ANSYS Users Conference. Framingham, United States, 2013.

BRANCO, M. C., **Fadiga de Estruturas Soldadas**. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1999.

CEMA – CONVEYOR EQUIPMENT MANUFACTURERS ASSOCIATION. **Belt Conveyors for Bulk Materials**. Sixth Edition, 2nd Printing, Florida, USA, 2007.

EUROCODE 3, EN 1993-1-9: **Design of Steel Structures – part 1.9: Fatigue**. European Committee for Standardization – CEN. Brussels, 2005.

FEM – FÉDÉRATION EUROPÉENNE DE LA MANUTENTION. **Rules for the Design of Mobile Equipment for Continuous Handling of Bulk Materials**. Paris, France, 1997.

HOBACHER, A., **Recommedations for Fatigue Design of Welded Joints and Components**. International Institute of Welding, doc. XIII-2151r4-07/XV-1254r4-072008. Paris, França, 2008.

LIRA JÚNIOR, J. D., **Análise de Fadiga em Juntas Soldadas pelo Processo MIG/Laser Utilizando o Método dos Elementos Finitos**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.

MALIKOUTSAKIS M.; SAVAJDIS G., **An Approach to the Effective Notch Stress Concept to Complex Geometry Welds Focusing on the FE Modeling of Weld Ends.** Aristotle University of Thessaloniki, Greece, 2009.

MARIN T.; NICOLETTO G., **Fatigue Design of Welded Joints Using the Finite Element Method and the 2007 ASME Div. 2 Master Curve.** Department of Industrial Engineering, University of Parma, Italy, 2009.

NX 9.0, Siemens Product Lifecycle Management Software Inc, 2013.

STRAP, ATIR Engineering Software Development LTD, 2008.