

ANÁLISE DE FADIGA COM O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS PARA MELHORAR PERFORMANCE DO EQUIPAMENTO DE LAMINAÇÃO A FRIO DO CORDÃO DE SOLDA DE TUBOS DE AÇO INOXIDÁVEL

Vinícius Damásio e Silva, viniciusdamasioesilva@gmail.com

Leandro Cardoso da Silva, leandro.cardoso@sp.senai.br

Antônio Carlos Carvalho, acarvalho@sp.senai.br

Nelis Evangelista Luiz, nelis.evangelista@sp.senai.br

Escola e Faculdade de Tecnologia SENAI “Roberto Simonsen”, R. Monsenhor Andrade, 298 - Brás, São Paulo - SP, 03008-000.

Resumo: Em determinadas aplicações como a construção de caldeiras, trocadores de calor e condensadores das indústrias, são utilizados tubos de aço inoxidável com costura que atendam a Norma ASTM A-249, devido às propriedades mecânicas exigidas no projeto e características específicas de processo. Uma das exigências para atender a norma regulamentadora é a realização do trabalho de laminação interna a frio do cordão de solda. O Bead Hammer é um dos equipamentos utilizados nas indústrias de conformação de tubos de aço inoxidável com costura para realização desse processo de laminação a frio em linha, porém é um equipamento que realiza a laminação através de pequenos golpes de uma ferramenta e um eixo excêntrico. Essa excentricidade necessária no eixo acaba provocando a falha prematura do equipamento por fadiga, devido a vibração que é gerada no processo. Esta pesquisa tem como objetivo determinar os esforços atuantes durante o processo de laminação e através do método de elementos finitos desenvolver uma solução de engenharia para aumentar a vida útil do equipamento.

Palavras-chave: Laminação a Frio, Fadiga, Excêntrico, Vibração, Vida Útil.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de aços inoxidáveis está presente nos mais variados setores da sociedade e nas indústrias, e que muitas vezes não percebemos o quanto interagimos com esse tipo de material. Devido suas características de ser um considerado esteticamente moderno, apresentar elevada resistência mecânica com maleabilidade e conformabilidade, ser inerte, e também ser uma material durável, faz com que o aço inoxidável venha sendo utilizado nas mais abrangentes aplicações, que incluem a indústria alimentícia, química, petroquímica, papel e celulose, usinas de açúcar e álcool, mobiliário, decoração em diferentes aplicações desses segmentos (Abinox, 2015).

Na fabricação de caldeiras, aquecedores, trocadores de calor e condensadores são utilizados tubos de aço inoxidável regulamentados pela Norma ASTM A-249, esta especificação abrange tubos soldados de espessura nominal feitos de aços austeníticos com laminação interna a frio da solda interna e com tratamento térmico após a soldagem (American Society for Testing and Materials, 2009).

Para a realização do processo de laminação interna existe um equipamento utilizado pelas indústrias de fabricação de tubos chamado Bead Hammer, esse equipamento tem por característica de funcionamento trabalhar com um eixo excêntrico aplicando pequenos golpes sobre o tubo contra um mandril de laminação, dessa forma laminando o tubo de forma contínua em linha de produção (Carneiro et al., 2005).

Devido a esses golpes gerados pelo eixo excêntrico faz com o eixo desse equipamento sofra severos desgastes por fadiga. Muitos estudos já foram realizados neste equipamento de forma empírica nas empresas onde utilizam o equipamento, com objetivo de minimizar o índice de quebra, mas não foi atingido o objetivo de melhorar a performance do equipamento.

O desenvolvimento desse trabalho tem como objetivo realizar um estudo por elementos finitos do equipamento Bead Hammer, avaliando os esforços necessários para realização da laminação interna de tubos de aço inoxidável.

Dessa forma, propor melhorias no projeto, utilizando diferentes tipos de materiais na fabricação do eixo e/ou aplicação de tratamento térmico, aumentando a vida útil do equipamento, validando a melhoria de performance do equipamento. Estudo foi realizado no equipamento de uma empresa de fabricação de tubos de aço inoxidável situada no Grande ABC Paulista, APERAM Inox Tubos do Brasil LTDA.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Histórico sobre Tubos

Os tubos atualmente são aplicados em diversas aplicações que exigem alto desempenho devido às novas necessidades e tecnologias, mas a utilização de tubos já vêm acontecendo desde muitos anos atrás auxiliando o desenvolvimento da sociedade e das cidades, pois contribuíram na fixação de nômades no avanço da agricultura, geração de energia com as máquinas a vapor entre outras aplicações importantes para prosperidade dos povos (Armendro et al., 2011).

Um dos destaques na história do desenvolvimentos dos tubos ocorreu no século XX, devido o surgimento de novas técnicas de soldagem e o aperfeiçoamento de outras técnicas já conhecidas. Fatores esses que contribuíram para a indústria no surgimento dos tubos com costura soldados longitudinalmente. Devido aos desenvolvimentos que ocorrem na fabricação dos tubos com costura foram elaboradas as primeiras normas técnicas as quais contribuíram para a padronização e aprimoramento dos processos de produção refletindo na qualidade dos tubos (Armendro et al., 2011).

Com as diferentes aplicações dos perfis tubulares estruturais e do transporte de fluidos, há a necessidade de desenvolver novos estudos e pesquisas nessa área possibilitando que sejam propostos novos e melhores projetos sem deixar de ser economicamente viáveis (Gerken, 2003).

2.2 Método de Elementos Finitos

Os processos produtivos modernos procuraram cada vez mais ser competitivos devido à grande concorrência do mercado, impactando no desenvolvimento de novos processos de produção e fabricação, desta forma é necessário melhorar o rendimento e a diminuição de mão de obra necessária para realização de diversas atividades. Na engenharia o método de projeto por tentativa e erro, baseado na forma empírica e experiência do projetista não cabe mais nos novos métodos, por demandar muito tempo e custo (Filho, 2017).

Na engenharia com os problemas cada vez mais complexos, com a necessidade de resolver de maneira mais ágil e satisfatória, juntamente com os constantes desenvolvimentos tecnológicos as ferramentas de CAD (Desenho Assistido por Computador) / CAE Engenharia Auxiliada por Computador) permitem a realização de simulações de modelos numericamente precisos e confiáveis antes mesmo de sua fabricação (Vieira, 2019).

Essas ferramentas utilizam um método para resolver equações diferenciais, que discretizam o sistema sob análise em diversos elementos, conhecido como Método dos Elementos Finitos. Essa teoria foi desenvolvida na década de 60 e está em constante desenvolvimento devido a capacidade de processamento dos computadores. Dessa forma nos dias de hoje é possível encontrar essas ferramentas para soluções complexas de diversas áreas da engenharia, medicina e odontologia (Filho, 2017).

2.3 Laminação

A laminação é um processo de deformação plástica que modifica a geometria dos materiais que ocorre através de agentes mecânicos externos denominados de rolos laminadores. Esse tipo de processo de produção é bastante utilizado na indústria metal mecânica, pois é possível realizar o beneficiamento do material, por ser um processo de grande produtividade, ser possível ter um bom controle dimensional e bom acabamento do produto acabado. O processo de laminação consiste na aplicação de tensões compressivas, devido a ação dos rolos laminadores, dessa forma as tensões e a força de atrito entre o material provoca a deformação e encruamento do material (Neto, 2016).

A aplicação de tubos de aço inoxidável com costura laminados para fabricação de caldeiras, aquecedores, trocadores de calor e condensadores são regulamentados pela Norma ASTM A-249, pois o processo de laminação faz com que a região da solda sofra taxas de encruamento, modificando sua estrutura cristalina, o que auxilia na recristalização quando o tubo são recozidos e outro motivo é devido a característica de processo, pois os tubos normalmente são extrudados para atender diferentes aplicações e diâmetros (Barbosa, 2004).

2.4 Fadiga

Fadiga é uma das formas que as estruturas e componentes mecânicos, como eixos rotativos, componentes de máquinas vibratórias e aeronaves, pontes rolantes, entre outros elementos de máquina falham, devido às tensões e deformações dinâmicas e cíclicas que são impostas ao conjunto, sendo caracterizado pela geração e propagação lenta e gradual de trincas que levam à ruptura e ao colapso súbito. Nas falhas ocorridas pela fadiga normalmente são devido às tensões variáveis relativamente inferiores aos necessários para ruptura em carregamentos estáticos (Callister, 2012).

Pode-se observar esse comportamento através do método do diagrama S-N, onde é caracterizado pela relação entre a variação da tensão versus o número de ciclos. Esse desenvolvimento foi realizado por Wöhler, em meados do século XIX, demonstrando que um metal sofrendo pela ação de tensões alternadas e com baixos níveis de tensão, método bastante utilizado até nos dias atuais (Lemos, 2005).

Esse tipo de falha que ocorre nas estruturas, é devido o material conter pequenas fendas cujo tamanho e distribuição dependem do material e de seu processamento. Elas podem variar desde inclusões não metálicas e micro lacunas até defeitos de solda, rachaduras de afiação, rachaduras de têmpera, dobras de superfícies, entre outras causas. Independente da forma de origem ou do tamanho, todos os materiais contêm trincas e falhas invisíveis a olho nu (Pestana, 2022).

Nos eixos excêntricos o efeito da fadiga é intensificado ainda mais devido a rotação do eixo e a sua excentricidade caracterizando o esforço de flexo-torção que intensifica os ciclos de tensão ao material, impactando diretamente na vida útil do componente e, ou equipamento, podendo ser visto na “Fig.1” a falha que ocorre neste tipo de eixo excêntrico utilizado no equipamento de laminação do cordão de solda dos tubos com costura na empresa APERAM Inox Tubos.



Figura 1. Falha do eixo excêntrico do Bead Hammer

2.5 Processo de Fabricação

O processo de fabricação de tubos de aço inoxidável se inicia no corte das bobinas em tiras com larguras menores pré-determinadas para os diferentes diâmetros de tubos. Com as fitas cortadas com as respectivas larguras são encaminhadas para as formadoras de tubos onde as fitas são desbobinadas passando por um acumulador, equipamento utilizado quando há a necessidade de emendar duas fitas sem que haja a parada da máquina, posteriormente a fitas entram no rolos formadoras onde ocorre o processo de conformação da fita para que seja possível realizar o processo de soldagem em formato tubular. Com o tubo formado se dá início ao processo de soldagem na chamada caixa de solda, onde as sapatas de solda posicionam as bordas da fita para que seja possível realizar o processo de soldagem.

A soldagem é realizada pelo processo TIG, sem adição de material, com o tubo soldado, atendendo a norma ASTM A-249, é realizado o processo de laminação do através equipamento Bead Hammer onde são aplicados pequenos golpes realizados através dos rolos laminados contra a solda e o mandril interno ao tubo. Os golpes realizados pelo Bead Hammer são devido ao eixo excêntrico do equipamento. Posteriormente, o tubo passa por um processo de pré-calibração antes do forno de recozimento. Depois do tubo passar pelo forno de recozimento é calibrado para o atender as especificações de tolerância dimensionais da norma e cortado em barras de diferentes comprimentos. Na “Fig.2” é demonstrado o processo de conformação e soldagem de tubos (Carneiro et al., 2005).

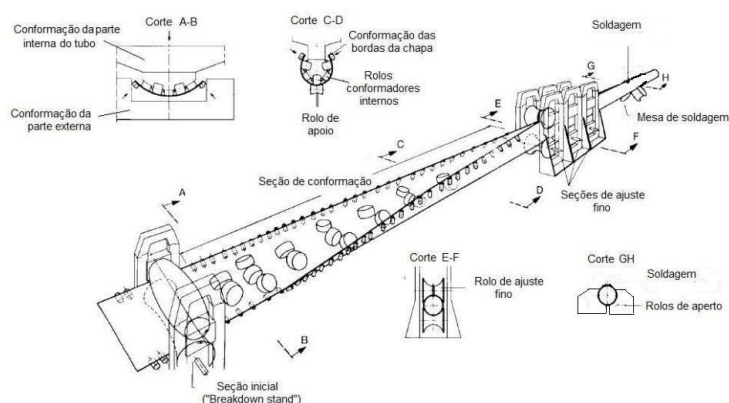


Figura 2. Diagrama ilustrativo dos estágios de formação para fabricação de tubos (Brensing & Sommer, 2014)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Foi utilizado o equipamento Bead Hammer da empresa APERAM Inox Tubos do Brasil, que é aplicado em algumas linhas de produção denominadas Formadoras 103, 202 e 206. Os tubos fabricados atendem a norma ASTM A-249, nas respectivas formadoras são fabricados os tubos de Ø19,05 mm, Ø25,40 mm e Ø38,10 mm variando a espessura nominal da parede do tubo entre 1,2 mm, 1,6 mm e 2,0 mm.

O tubo utilizado para realização deste estudo foi fabricado na formadora F-206 no material AISI 304L com o diâmetro de Ø38,10mm com espessura nominal de 1,2mm, seguindo a norma regulamentadora ASTM A-249, velocidade da linha de fabricação 5m/min. Foram coletadas amostras do tubo não laminado e após a laminação pelo Bead Hammer, conforme demonstrado na “Fig. 3”. As medições foram realizadas no microscópio estereoscópio com aplicação de 30x.

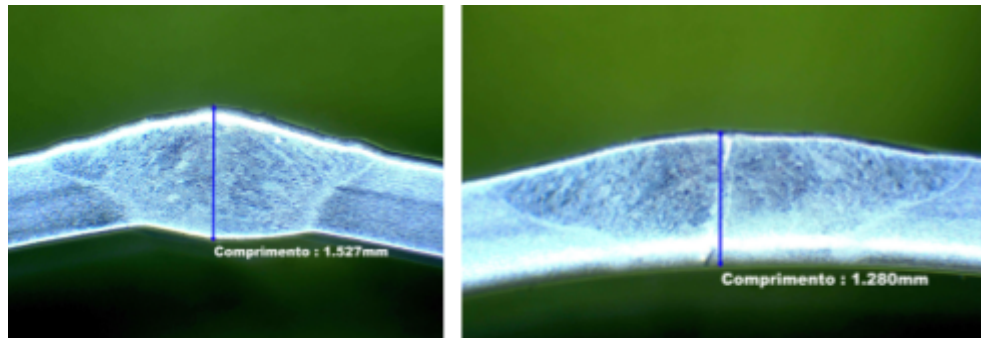


Figura 3. Amostras do tubo sem laminar e laminado (ampliadas 30x).

O laminador Bead Hammer é acionado através de uma correia sincronizadora por um motor elétrico de corrente alternada com potência de 10cv e rotação de trabalho de 1600 rpm.

O eixo excêntrico do Bead Hammer é fabricado no material SAE 8620 com tratamento superficial de cementação, e normalizado com dureza entre 56 a 58 HRC com profundidade de 2,5 a 3,0 mm de camada cementada. A excentricidade do eixo é de 0,7mm. Os mancais são refrigerados com água a 20 °C montados com 02 rolamentos autocompensadores 22215 cada mancal e lubrificados com graxa a base lítio duas vezes por dia durante o funcionamento. Os rolos laminadores também são montados com os mesmos rolamentos dos mancais e não são tracionados, portanto a velocidade tangencial é igual a do tubo (5m/min).

Por dentro do tubo é colocado o mandril de laminação que é fixado pelo varão que por sua vez é fixado na estrutura da máquina, e é através do mandril que os rolos laminadores aplicam os golpes sobre o tubo fazendo a laminação interna do cordão de solda.

Na “Fig. 4” pode-se observar a montagem dos rolos laminadores e o mandril no tubo.



Figura 4. Montagem do mandril de laminação.

Para determinação dos esforços necessários para realização do processo de laminação foram coletadas informações de outro sistema de laminação semelhante ao Bead Hammer. Na APERAM Inox Tubos existe uma outra formadora de tubos denominada de Formadora 205 que também fabrica tubos de Ø38,10mm com outra forma de laminação, através de um sistema hidráulico. O princípio de funcionamento é similar, a diferença está na forma de aplicação de forças nos rolos laminadores e no comprimento do mandril de laminação. No sistema hidráulico existe um cilindro hidráulico responsável por aplicar carga sobre o tubo contra o mandril ao invés do eixo excêntrico do Bead Hammer. Sendo assim foram coletadas as dimensões do cilindro hidráulico contendo um êmbolo de Ø125mm e haste Ø56mm e pressão de

trabalho de 65 bar, desta forma através da “Eq. (1)” é possível determinar a força necessária para a laminação do cordão de solda.

$$P = \frac{F}{A} \quad F = 6,5 \times 9,81 \cdot 10^3 = 63,76 \text{ KN} \quad (1)$$

onde P é a pressão (MPa), F é a força (N) e A é a área (mm^2).

Para a determinação da potência de entrada foi coletada a tensão e a corrente de trabalho do motor elétrico. A tensão de alimentação do motor é de 380V, a corrente de trabalho de aproximadamente 12A e o rendimento de transmissão por correia de 98% com a “Eq. (2)” foi determinada a potência de entrada no eixo.

$$P = V \times I \times \eta \quad P = 380 \times 12 \times 0,98 = 4,47 \text{ kW} \quad (2)$$

onde P é a potência de entrada no conjunto (W), V é a tensão (V), I é a corrente (A) e η é a rendimento da transmissão.

Com a potência de entrada no eixo e a rotação de trabalho de 1600 rpm foi possível determinar o torque aplicado sobre o eixo através da “Eq. (3)”.

$$P = \omega \times T \quad P = 2\pi \times f \times T \quad T = \frac{4,47 \times 10^3 \times 60}{2\pi \times 1600} = 26,7 \text{ N.m} \quad (3)$$

onde P é a potência elétrica do motor (W), f é a frequência (Hz) e T é o torque (N.m).

Para a determinação do torque de resistência ao rolamento foi obtida a variação de corrente do motor elétrico, em comparação do respectivo motor rodando em vazio, a variação de corrente do motor elétrico foi de aproximadamente 5A. A tensão de alimentação do motor é de 380V com a “Eq. (4)” foi possível determinar o torque resistente ao movimento.

$$P = P = (V \times I) / \eta \quad P = (380 \times 5) / 0,98 = 1.938,8 \text{ W} \quad (4)$$

onde P é a potência de resistência ao rolamento (W), V é a tensão do motor (V), I é a variação de corrente no motor (A) e η é a rendimento da transmissão.

$$P = \omega \times T \quad P = 2\pi \times f \times T \quad T = \frac{1900 \times 60}{2\pi \times 1600} = 11,57 \text{ N.m} \quad (3)$$

onde P é a potência elétrica do motor (W), f é a frequência (Hz) e T é o torque (N.m).

Com a determinação dos esforços atuantes sobre o eixo foi realizado o modelamento do conjunto do eixo excêntrico para a realização da simulação por elementos finitos do eixo de laminação do Bead Hammer.

Para realização da simulação foi utilizado o software Ansys 2020 R2 e Solidworks 2016 disponibilizado na Escola e Faculdade de Tecnologia SENAI “Roberto Simonsen”.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise Modal do Eixo Excêntrico do Bead Hammer

Para o desenvolvimento da análise modal do conjunto foi utilizado o critério de estabilidade (ressonância) onde $f_n \geq 1,5f_{op}$.

onde f_n é a frequência natural do modo fundamental (Hz) e f_{op} é a frequência de operação (Hz).

Foram obtidas as seguintes frequências e seus respectivos modos de vibração, conforme “Tab. 1” e demonstrado que atende ao critério de estabilidade visto “Fig. 5”.

Tabela 1. Freqüências e modos de vibração.

	Modo	Frequência (Hz)
1	1	269,39
2	2	830,75
3	3	834,37
4	4	1726,8
5	5	3942,2
6	6	4015,1

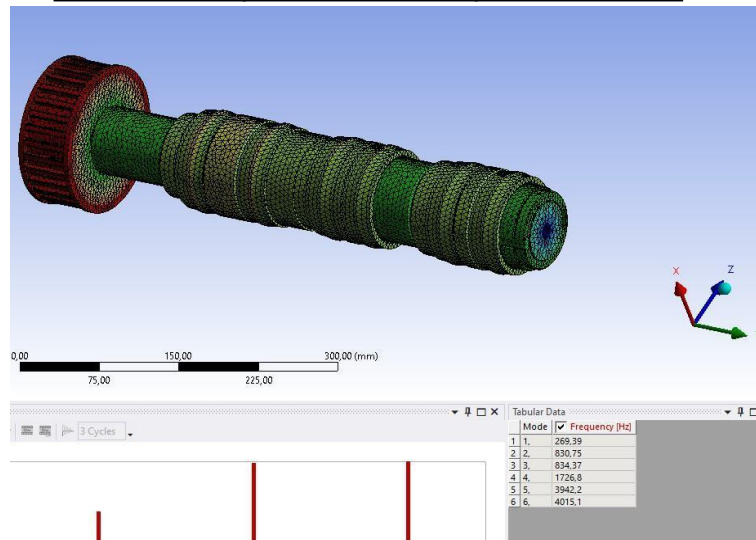


Figura 5. Análise modal do eixo excêntrico

4.2 Análise de Estática do Eixo

Na simulação de análise de estática é demonstrado que os esforços atuantes no eixo não ultrapassam o limite de escoamento do material de 590,6 MPa, por tanto dentro do regime elástico do material. Pelo critério de von Mises a máxima tensão atuante sobre o eixo está na região de mudança de seção com 158,05 MPa de tensão, podendo ser verificado na “Fig. 6” da plotagem de tensão von Mises.

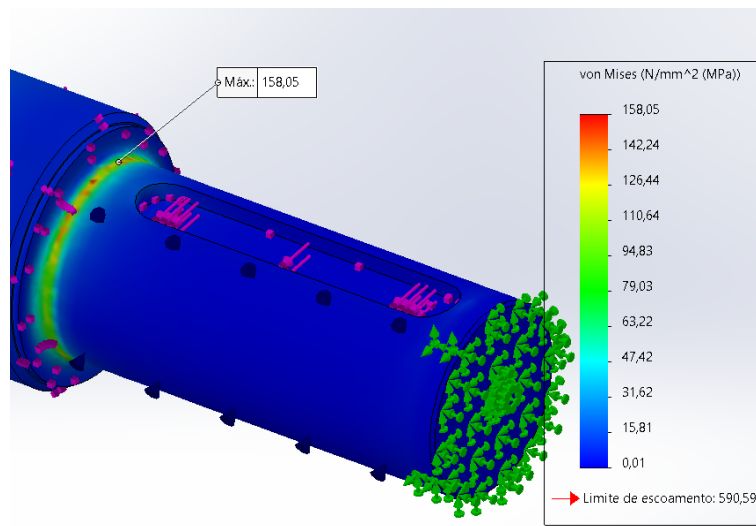


Figura 6. Plotagem de tensão pelo critério de von Mises

A análise estática também indica o deslocamento resultante de 0,015mm na região onde está localizado o excêntrico do eixo, região onde é aplicada a força de laminação do tubo, podendo ser observado na plotagem de deslocamento na “Fig. 7”.

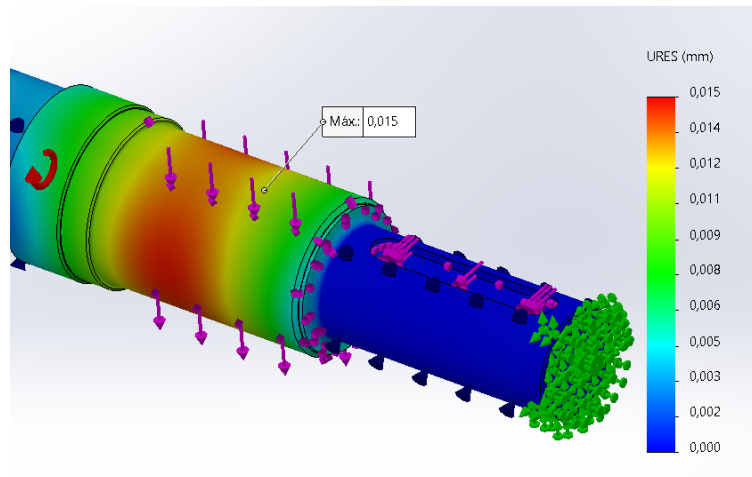


Figura 7. Plotagem de deslocamento pelo critério de von Mises

Em conclusão sobre análise estática não é a causa de falha do equipamento que sofre com quebras frequentes de em média a cada 3 meses de uso contínuo, o fator de segurança obtido na simulação foi de 3,74, conforme plotagem do fator de segurança apresentado na “Fig. 8”.

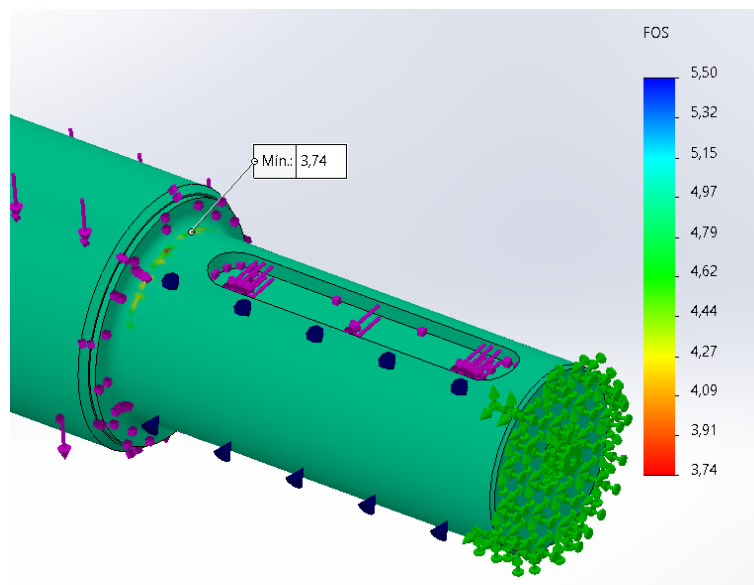


Figura 8. Plotagem do fator de segurança

4.3 Análise de Fadiga do Eixo

A vida do equipamento foi determinada para uso contínuo por 24h horas por dia, desconsiderando apenas 1 dia da semana sem uso, durante 1 ano totalizando 6,4.108 ciclos, caso o equipamento sofra falha após esse período será considerado como vida infinita, conforme parâmetro necessário para realização da simulação no software Solidworks. Também foram considerados os fatores de redução de fadiga, de acordo com os fatores de Marin, devido ao ensaio de fadiga não ser possível a realização.

Foram obtidos os seguintes valores para os respectivos fatores: K_a - Fator de Acabamento de Superficial de 0,9 / K_b - Fator de tamanho de 0,7717 / K_c - Fator de carregamento de 0,59 / K_d - Fator de temperatura de 1 e K_e - Fator de confiabilidade de 0,814, obtendo um fator de redução da fadiga de 0,334 (Norton, 2013).

Na simulação sobre análise de fadiga demonstra que os esforços atuantes no eixo ciclicamente provocam uma geração e propagação de trincas no eixo após um determinado número de ciclos, exatamente no local onde ocorre a falha real do eixo demonstrado na “Fig. 1”. A “Fig. 9” apresenta a plotagem de vida total em ciclos do equipamento obtida através da simulação por elementos finitos.

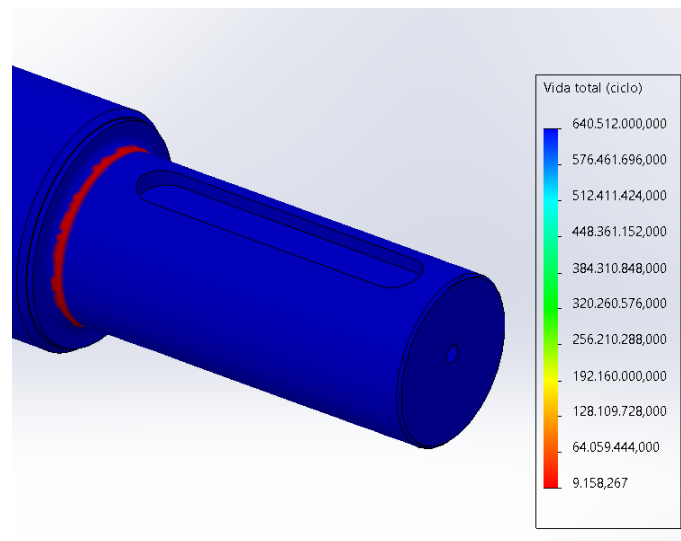


Figura 9. Plotagem da vida total do eixo.

A plotagem do fator de carga da “Fig. 10” indica que para o eixo não falhar por fadiga a solicitação sobre o eixo deverá ser reduzida em aproximadamente 56,7%, um valor bastante expressivo à ser reduzido. Demonstrando que o esforço cíclico tem um impacto bastante expressivo consequência da concepção do projeto de utilização de um eixo excêntrico.

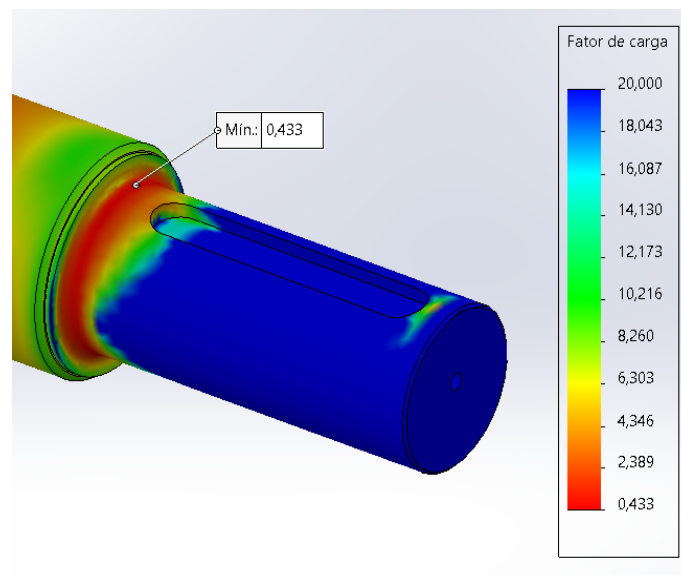


Figura 10. Plotagem de fator de carga.

5. CONCLUSÕES

O processo de laminação de tubos com costura é extremamente importante para determinadas aplicações onde há a necessidade de maior resistência à corrosão, melhores propriedades mecânicas ou quando é necessário realizar conformação mecânica posterior. Devido aos diferentes processos de laminação possuírem suas limitações devido a velocidade de funcionamento e/ou aos controles de processo, o Bead Hammer é o equipamento com maior perspectiva para melhoramento de performance, através das soluções de engenharia.

Considerando que o material utilizado para realização da simulação no software Solidworks foi o aço 8620 com tensão de escoamento de 590,6 MPa sem tratamento superficial de cementação, sabendo que a cementação superficial auxilia no ganho de vida à fadiga, os resultados encontrados não são conclusivos, mas é possível observar pela análise de elementos finitos que a causa da falha que ocorre no equipamento é devido à fadiga demonstrando o real comportamento do equipamento em funcionamento, sendo possível discutir possíveis melhorias para que a performance do equipamento seja melhorada expressivamente.

Primeiramente pode ser analisada a mudança na geometria da peça, deixando mais robusto para esforços atuantes, mas esse tipo de mudança impacta efetivamente tanto no preço de fabricação do eixo quanto na mudança construtiva do equipamento, pois haveria a necessidade de modificar uma série de outras peças de todas as máquinas que apresentam esse tipo de equipamento de laminação, impactando de maneira expressiva no custo para modificação do projeto, a princípio inviabilizando sua realização. Mas sendo válido a reavaliação e/ou modificação das folgas de ajustes das peças existentes do conjunto, visto que possíveis folgas de ajuste podem prejudicar na rigidez e vibração do conjunto.

Muitos estudos são realizados sobre a fadiga, por ser o principal motivo de falha de componentes dos mecânicos, estima-se que 90% das falhas mecânicas de componentes sejam produzidas por processos de fadiga (Pastoukhov, 1994).

Tratamentos térmicos superficiais têm sido bastante utilizados em aços com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas como a vida em fadiga, resistência ao desgaste e corrosão. Tratamentos termoquímicos a plasma, como a nitretação e a nitrocarbonetação, têm mostrado bons resultados no aumento de dureza, propriedades de fadiga e proteção contra corrosão (Abdalla et al, 2010).

Estudos realizados sobre o material SAE 4340 temperado e revenido mostram que a nitretação iônica é um processo de modificação superficial do material que aumenta a resistência à fadiga, desgaste e resistência à corrosão e dureza superficial. Esse comportamento é devido a formação de altas tensões residuais compressivas na região revestida, o aumento da dureza superficial e da profundidade do revestimento causa uma expressiva melhora nas propriedades da fadiga do aço (Sirin, 2008).

A camada formada pelo processo de nitretação, faz com que as curvas de fadiga sejam modificadas, com um desempenho positivo para a condição bainítica, mostrou melhor desempenho na curva de fadiga, elevando o limite de fadiga de 700 MPa para um valor próximo a 900 MPa (Ranieri, 2010).

Com os estudos realizados e os resultados obtidos com o tratamento superficial de nitretação iônica do aço 4340, o uso desse material para solicitações onde a causa da falha por fadiga é predominante, o uso se torna bastante promissor sendo assim possível ser utilizado neste estudo de caso antes de realizar modificações mais radicais no projeto do Bead Hammer.

6. REFERÊNCIAS

- Abinox. A onipresença do inox. Disponível em: <<https://www.abinox.org.br>>. Acesso em 10 de jan. 2022.
- Abdalla, A. J. Hashimoto, T. M., Moura Neto, C., Pereira, M. S.; Souza, N. S.; Mendes, F. A., Alterações nas propriedades mecânicas em aços 4340 e 300M através de tratamentos térmicos isotérmicos e intercríticos. In: CONG ANUAL ABM, 59, São Paulo, 2004. Anais do 59º Congresso da ABM, São Paulo: ABM, 2004, 8p. (em CD-ROM)
- Armendro, B. N.; Ribeiro, F. M. P.; Fiori, M. A. P. Tubos com e sem costura: breve histórico e principais processos produtivos. PMT2404 - Transformação Mecânica I - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Departamento de Engenharia e Materiais - São Paulo, 2011.
- Barbosa, Reginaldo P.; Campos, Simone Gonçalves Silva; Fonseca, Marcelo A. Recristalização de um Aço Inoxidável Austenítico/ Uma Abordagem Estatística. Depto. Engenharia Mecânica, Unileste, MG, 2004.
- Barros, Renato Araújo. Influência da nitretação a plasma e carbonetação a laser nas propriedades tribológicas do par aço AISI/SAE 4340 e liga bronze-alumínio 630. Guaratinguetá, 2017.
- Calister, W. D. *Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução*. 8ª ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2012.
- Carneiro, I.; Casas, J. **Manual de Operação de Formadora** - Inox Tubos, São Paulo, 2005.
- Cetlin, C. L. Simulação numérica de Laminação a frio no laminador sendmizir número 2 da acesita. Tese (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais, p. 86. 2006.
- de Castro Vieira, Antonio Fernando. Otimização do Processo de Laminação a Frio através de planejamentos de Experimentos. 2007. Tese de Doutorado. PUC-Rio.
- Filho, A.A. Elementos finitos: A base da tecnologia CAE. São Paulo, SP: Érica, 2018

- Gerken, F. S. Perfis tubulares: aspectos arquitetônicos e estruturais. Dissertação de Mestrado. Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto, 2003.
- Lemos, C. A. D. Análise de fadiga em risers flexíveis, *Tese de Doutorado*, UFRJ, pp 265, 200 NETO, Carlos Lovato.
- Cetlin, C. L. Simulação numérica de laminação a frio no laminador sendzimir número 2 da acesita. Belo Horizonte, 2006.
- Norton, Robert L. Projeto de máquinas. *bookman editora*, 2013.
- Pastouknow, V.A.; Voowald, H.J.C., Introdução à Mecânica da Integridade Estrutural, Editora UNESP, São Paulo / SP, 1994, 192p.
- Pestana, C. C. Introdução sobre as vibrações mecânicas - rev. 02. “*Apostila de sala de aula*”. São Paulo, 2022.
- Ranieri, A. et al. Influence of plasma nitro carburization on fatigue properties in a 4340 steel with different microstructure; Influencia da nitrocarbonetacao a plasma nas propriedades de fadiga de um aco 4340 com diferentes microestruturas. 2010.
- Sirin, Sule Yildiz; Sirin, Kahraman; Kaluc, Erdinc. Effect of the ion nitriding surface hardening process on fatigue behavior of AISI 4340 steel. *Materials Characterization*, v. 59, n. 4, p. 351-358, 2008.
- Vieira, D. F., Coelho, R. C., Dias, M. J., Neto, A. M. S., & Fontes, W. A. (2019). Elementos Finitos para o Dimensionamento de uma Viga Perfil “I” Utilizada em um Pórtico Móvel. *Revista Processos Químicos*, 13(25), 31-44. <https://doi.org/10.19142/rpq.v13i25.474>.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

FATIGUE ANALYSIS WITH THE FINITE ELEMENT METHOD TO IMPROVE PERFORMANCE OF COLD ROLLING EQUIPMENT OF THE STAINLESS STEEL TUBE WELDING BEAD

Vinicius Damásio e Silva, viniciusdamasiosilva@gmail.com

Leandro Cardoso da Silva, leandro.cardoso@sp.senai.br

Antônio Carlos Carvalho, acarvalho@sp.senai.br

Nelis Evangelista Luiz, nelis.evangelista@sp.senai.br

Escola e Faculdade de Tecnologia SENAI “Roberto Simonsen”, R. Monsenhor Andrade, 298 - Brás, São Paulo - SP, 03008-000.

Abstract: In specific applications such as boiler construction, heat exchangers and condensers in industries, stainless steel welded tube that fulfill ASTM A-249 standard are used, due to the mechanical properties required on the project. One of the requirements to fulfill the regulatory standard is to perform internal cold rolling of the weld bead. The Bead Hammer is one of the equipments used in the stainless steel tube forming industries to perform this cold rolling process in line, although it is an equipment that performs rolling through small blows of a tool and an eccentric shaft. This necessary eccentricity in the shaft ends up causing premature failure of the equipment by fatigue, due to the vibration that is generated in the process. This research aims to determine the forces acting during the rolling process and through the finite element method develop an engineering solution to increase the life of the equipment.

Keywords: Cold Rolling, Fatigue, Eccentricity, Vibration, Shelf life.