

Análise estrutural dinâmica de eixos rotativos sujeitos a entalhes

Dynamic structural analysis of rotary axles subject to notches

João Paulo Piau Oliveira

Graduando do curso de Engenharia Mecânica (UNIPAM).

E-mail: joaopiau@unipam.edu.br

João Rodrigo Andrade

Professor orientador.

E-mail: joaorandrade@unipam.edu.br

Resumo: O objetivo deste estudo foi realizar uma análise estrutural e de fadiga das consequências de um entalhe na estrutura de eixos em rotação, prevendo ainda em fase de projeto a quantidade de ciclos que o eixo suporta até se romper. Essa análise agrega grande importância na aplicação de máquinas rotativas, uma vez que estas são submetidas a uma grande quantidade de ciclos de rotação. A presença de trincas e entalhes em estruturas rotativas podem ocasionar consequências negativas, econômicas e de segurança para quem opera. O estudo foi realizado utilizando-se o Método dos Elementos Finitos, empregando-se elementos de volume.

Palavras-chave: Eixo. Entalhe. Fadiga. MEF.

Abstract: The objective of this study was to perform a structural and fatigue analysis of the consequences of a notch in the structure of rotating axes, also predicting, in the design phase, the number of cycles the axle supports until it breaks. This analysis adds great importance in the application of rotating machines, since these are submitted to a great amount of rotation cycles. The presence of cracks and notches in rotating structures may have negative consequences both economically and on safety for those who operate them. The study was carried out using the Finite Element Method, using volume elements.

Keywords: Axis. Notch. Fatigue. FEM.

1 INTRODUÇÃO

A ocorrência de fratura é um problema que o homem enfrenta desde que começou a utilizar artefatos para trabalhar. Atualmente, esse problema é agravado pelo alto desempenho que se procura dar às estruturas e aos componentes mecânicos modernos e pelas trágicas consequências que as suas falhas podem trazer. Felizmente, avanços no campo da análise dos mecanismos das fraturas têm ajudado a diminuir alguns riscos potenciais existentes devido ao aumento da complexidade tecnológica. O entendimento do mecanismo de falha dos materiais e o conhecimento tecnológico para prevenir tais falhas aumentaram consideravelmente desde a 2ª Guerra Mundial.

Apesar de ainda ter-se muito que aprender, muitos dos conhecimentos já consolidados sobre os mecanismos de fratura ainda não são utilizados apropriadamente.

Um estudo econômico estimou o custo da ocorrência de fratura nos Estados Unidos em 1978 em cerca de 119 bilhões de dólares anuais, representando aproximadamente 4% do PIB americano. Além do mais, esse estudo estimou que o custo anual poderia ser reduzido em 35 bilhões se a tecnologia atual fosse aplicada e que mais pesquisas dos mecanismos das fraturas poderiam reduzir esse quadro em mais 28 bilhões (ANDERSON, 2005, p.3). As fadigas são responsáveis por, pelos menos, metade das falhas mecânicas.

O objetivo deste artigo é uma análise estrutural e de fadiga de eixos com entalhes sujeitos à rotação, com uma metodologia que permite, ainda na fase de projeto, a previsão da quantidade de ciclos que o eixo suporta até se romper. O Método dos Elementos Finitos é utilizado empregando-se elementos de volume.

Os objetivos específicos deste artigo são:

- conhecer e estudar e diferentes tipos de eixos rotativos;
- escolher o material utilizado nos eixos;
- fazer uma modelagem computacional em software SolidWorks;
- efetuar uma análise estática de tensão, deslocamento e deformação em eixos sujeitos a rotação;
- efetuar uma análise de fadiga em eixos sujeitos à rotação;
- efetuar uma análise da quantidade de ciclos que cada eixo suporta sem romper.

A indústria brasileira e mundial conta com a grande maioria de sua produção dependente de máquinas rotativas que utilizam eixos em rotação como o principal mecanismo de troca de movimento. Além disso, diversos outros setores da economia são dependentes desse tipo de equipamento, como veículos automotores, dentre outros. A presença de trincas e entalhes nessas estruturas rotativas podem ocasionar consequências negativas tanto no âmbito econômico quanto em questões de segurança para os funcionários que lidam com esses equipamentos. O presente trabalho visa a uma análise estrutural e de fadiga para o estudo das consequências de um entalhe na estrutura do eixo em rotação. Essa análise agrega grande importância na aplicação de máquinas rotativas, uma vez que estas são submetidas a uma grande quantidade de ciclos de rotação.

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma análise matemática que consiste na discretização de um meio contínuo em pequenos elementos, mantendo as mesmas propriedades do meio original. Esses elementos são descritos por equações diferenciais e resolvidos por modelos matemáticos, para que sejam obtidos os resultados desejados. (LOTTI, 2006). O MEF pode ser utilizado em diversas áreas das ciências exatas e, devido à sua grande aplicabilidade e eficiência, existem trabalhos com essa metodologia nas diversas áreas da engenharia, como na questão de estruturas dinâmicas, quando se deseja analisar cargas, tensões ou deslocamentos. O MEF vem

revolucionando diversas formas de pesquisa, sendo hoje uma metodologia bastante eficiente, fiel e segura.

2.2 ENTALHE

Entalhes são descontinuidades geométricas, como furos, filetes, sulcos, rasgos de chaveta, ombros e roscas, inevitavelmente encontradas na maioria dos componentes estruturais. Apesar de serem necessários para a sua funcionalidade, os detalhes afetam severamente a distribuição de tensão local, aumentando as tensões nominais em torno de suas raízes. Esse efeito é quantificado pelo fator de concentração de tensão (FCT) $K_t = \sigma/\sigma_n$, onde σ é a tensão máxima na sua raiz, e σ_n é a tensão nominal que atuaria ali caso o entalhe não tivesse efeito sobre a distribuição de tensão. Altos valores de K_t podem ter um efeito muito prejudicial em mecanismos de falhas, como na iniciação de trincas por fadiga e fratura frágil.

Figura 1 – Furo em uma placa concentra linhas de fluxo imaginárias



Fonte: Simões (2012)

2.3 FADIGA

Fadiga é uma degradação das propriedades mecânicas de um material, quando é sujeito a carregamentos cíclicos, ocasionando uma falha mecânica. Ela ocorre em componentes ou materiais sujeitos a condições dinâmicas de carregamento que resultam na nucleação e propagação de trincas, que culminam em uma fratura completa após um determinado ciclo de carregamento.

Esse fenômeno foi observado pela primeira vez por volta de 1800, quando os eixos de um vagão ferroviário começaram a falhar após um pequeno período em serviço. Apesar de serem feitos de aço dúctil, eles exibiam características de fraturas frágeis e repentinas. Rankine publicou um artigo em 1843, *As causas da ruptura inesperada de munhões de eixos ferroviários*, no qual dizia que o material havia “cristalizado” e se tornado frágil devido às tensões flutuantes. Os eixos haviam sido projetados com toda a perícia e engenharia disponíveis na época, as quais se baseavam em experiências decorrentes de estudos com estruturas carregadas estaticamente. Cargas dinâmicas eram, portanto, um fenômeno novo, resultante da introdução das máquinas movidas a vapor. Esses eixos estavam fixos às rodas e giravam em conjunto com elas. Desse modo, a tensão de flexão em qualquer ponto da superfície do eixo variava ciclicamente entre valores positivos e negativos. Esse carregamento é

denominado alternado. Um engenheiro alemão, August Wohler, realizou a primeira investigação científica (durante um período de 12 anos) sobre o que estava sendo chamado de falha por fadiga, testando, em laboratório, eixos até a falha sob carregamento alternado. Suas descobertas, publicadas em 1870, identificavam o número de ciclos de tensão variante no tempo como os causadores do colapso e a descoberta da existência de uma tensão limite de resistência à fadiga para aços, isto é, um nível de tensão que toleraria milhões de ciclos de uma tensão alternada.

O termo “fadiga” foi aplicado à situação recém-descrita pela primeira vez por Poncelet em 1839. O mecanismo de falha ainda não compreendido e a aparência de uma fratura frágil na superfície de um material dúctil geraram especulações de que o material, de alguma maneira, apresentou “cansaço” e fragilizou-se devido às oscilações da carga aplicada. Wohler, mais tarde, mostrou que cada metade dos eixos quebrados ainda continuava tão resistente e dúctil, em ensaios de tração, quanto o material original. De qualquer maneira, o termo falha por fadiga permaneceu e ainda é usado para descrever qualquer falha devido a cargas variantes no tempo. (NORTON, 2004).

As falhas por fadiga sempre tem início com uma pequena trinca, que pode estar presente no material desde a sua manufatura ou desenvolver-se ao longo do tempo devido às deformações cíclicas ao redor das concentrações de tensões.

2.4 SOLIDWORKS

O SolidWorks é uma ferramenta destinada aos engenheiros, aos projetistas e a outros profissionais da área. O programa tem capacidade de oferecer experiência em 3D para criação de qualquer projeto.

Além do CAD mecânico do SolidWorks, o software oferece uma variedade de produtos de simulação que prevê detalhadamente os projetos antes de enviá-los para produção. O prospecto oferece recursos bastante intuitivos. Apenas com um esboço simples ou complexo é possível criar um sólido. Em vista disso, o usuário tem acesso a diversas ferramentas e recursos. Com o SolidWorks é viável visualizar a constituição do objeto e ainda é possível que ele seja visto na forma interna e externa. Ou seja, permite a correção de falhas.

Alguns dos principais parâmetros disponíveis são design, durabilidade, resposta dinâmica e estática, movimentos, transferência de calor, dinâmica do fluxo de fluido e moldagem e muitos outros.

2.5 AÇO 1045

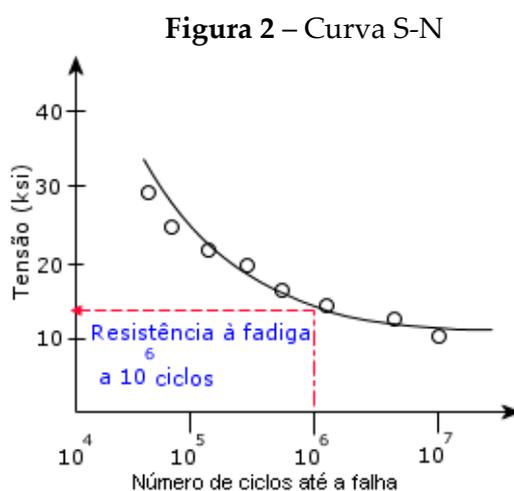
O aço AISI 1045 é um aço para beneficiamento com temperabilidade baixa, ou seja, baixa penetração de dureza na seção transversal, não se recomendando seu uso para seções superiores a 60 mm. Possui uma boa relação entre resistência mecânica e resistência à fratura. É utilizado em geral com durezas de 180 a 300 HB. Para grandes seções, utiliza-se o tratamento térmico de normalização.

Esse aço é utilizado na fabricação de componentes de uso geral onde seja necessária uma resistência mecânica superior à dos aços de baixo carbono

convencionais. É aplicado principalmente em eixos em geral, pinos, cilindros, ferrolho, parafusos, grampos, braçadeiras, pinças, cilindros, pregos, colunas, entre outros.

2.6 CURVA DE TENSÃO S-N

A resistência à fadiga é determinada pela aplicação de diferentes níveis de tensão cíclica para espécimes de teste individuais e pela medição do número de ciclos até a falha. A representação gráfica dos pontos de dados de fadiga é a amplitude da tensão cíclica ou a tensão alternada (S - eixo vertical) em relação ao número de ciclos até a falha (N - eixo horizontal). A resistência à fadiga é definida como a tensão na qual a falha por fadiga ocorre em um determinado número de ciclos. Uma curva S-N típica é mostrada abaixo:



Fonte: Systèmes (2018)

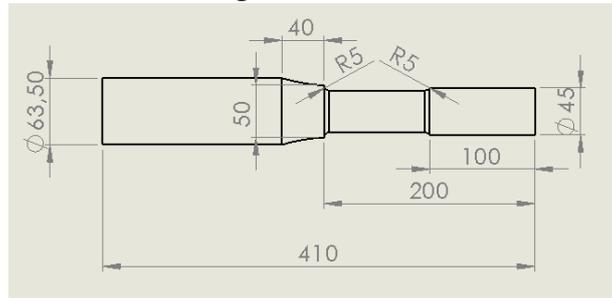
Espécimes são testadas em uma série de níveis de tensão decrescentes até que não ocorram falhas dentro de cada número máximo de ciclos selecionado.

3 METODOLOGIA

Após estudo sobre eixos rotativos, foram escolhidas as geometrias que serão utilizadas para testes. A primeira geometria (Eixo 1) foi baseada em um eixo de prova utilizado na década de 1980 pela *Society Automotive Engineers* (SAE), em um programa de ensaios envolvendo laboratórios de várias universidades e indústrias, cujo objetivo era estimar a durabilidade de componentes entalhados submetidos a carregamentos cíclicos. As dimensões utilizadas são tipicamente empregadas em componentes mecânicos da indústria. A segunda geometria (Eixo 2) foi criada com base em um eixo com um rebaixo central, representando um entalhe com grande concentração de tensão. Já a terceira geometria (Eixo 3) remete a um eixo com um rasgo de chaveta, entalhe bastante comum em eixos.

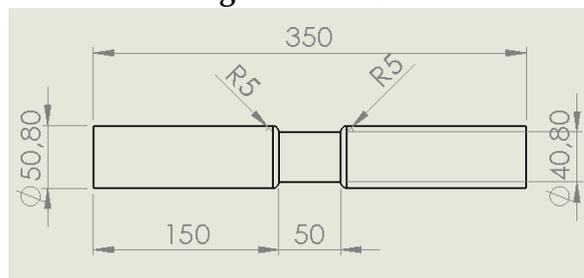
As Figuras 3, 4 e 5 representam os corpos de provas utilizados, com suas respectivas dimensões.

Figura 3 – Eixo 1



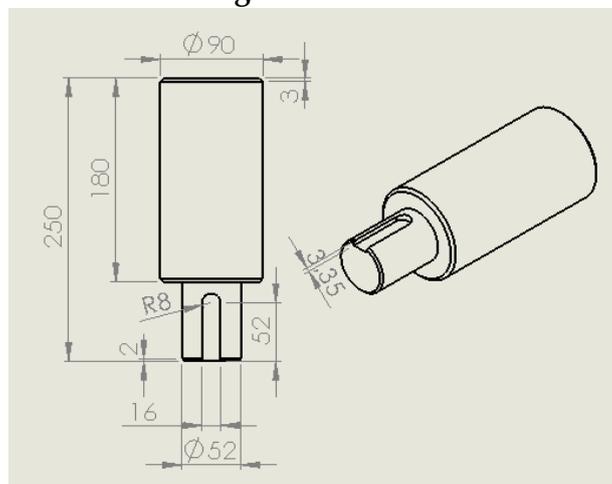
Fonte: Autoria própria (2019)

Figura 4 – Eixo 2



Fonte: Autoria própria (2019)

Figura 5 – Eixo 3



Fonte: Autoria própria (2019)

A modelagem computacional e as simulações foram feitas no software SolidWorks, sendo realizadas análises estáticas e de fadiga. O material escolhido para teste foi o Aço carbono 1045 Trefilado, por ser bastante empregado na confecção de eixos da indústria, caracterizado por sua boa resistência mecânica e baixo custo.

A análise estática de ambas geometrias foram padronizadas, sendo todos os eixos fixados em uma das extremidades, recebendo uma carga de Torque de 1000 N.m de intensidade na face oposta em que o eixo foi fixado. Além disso, foi aplicada uma malha sólida mesclada com base na curvatura de cada geometria. Como resultado do

estudo estático, obteve-se Tensão, Deslocamento e Deformação do material após o ensaio.

Feito isso, o estudo de fadiga foi realizado utilizando-se amplitude constante e um carregamento de 1000000 ciclos para cada eixo, obtendo-se então a Vida total (ciclos) e o Fator de carga. Assim, é possível encontrar a curva S-N, que representa o número de ciclos até a falha por fadiga.

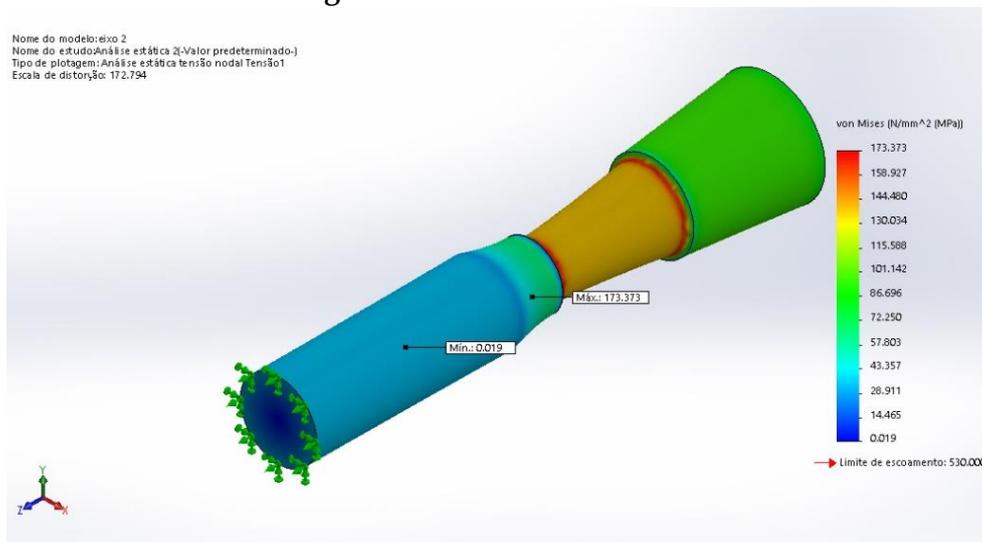
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As geometrias de teste foram divididas em Eixo 1, Eixo 2 e Eixo 3, e assim foram submetidas à análise estática e de fadiga.

4.1 EIXO 1

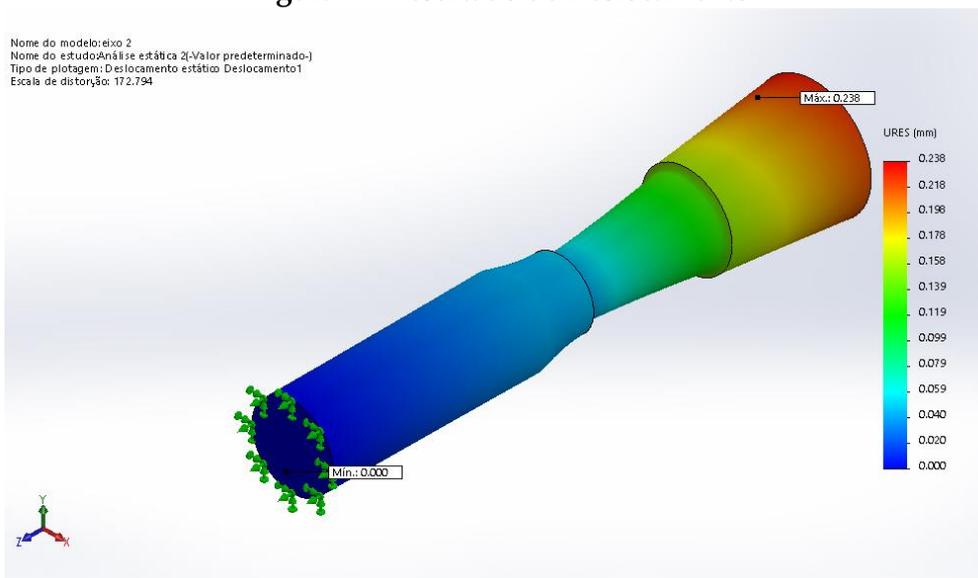
A geometria do Eixo 1 foi baseada em um eixo de prova utilizado na década de 1980 pela SAE (*Society Automotive Engineers*), em um programa de ensaios envolvendo laboratórios de várias universidades e indústrias, cujo objetivo era estimar a durabilidade de componentes entalhados submetidos A carregamentos cíclicos. Os resultados estruturais encontrados no software foram de tensão, deslocamento e deformação, mostrados nas Figuras 6, 7 e 8 abaixo.

Figura 6 – Resultado de Tensão



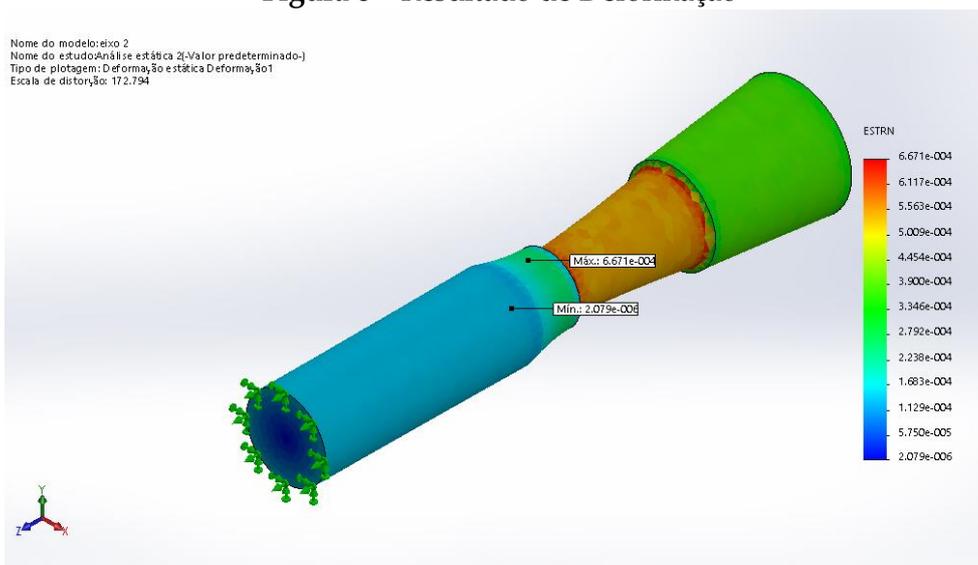
Fonte: Autoria própria (2019)

Figura 7 – Resultado de Deslocamento



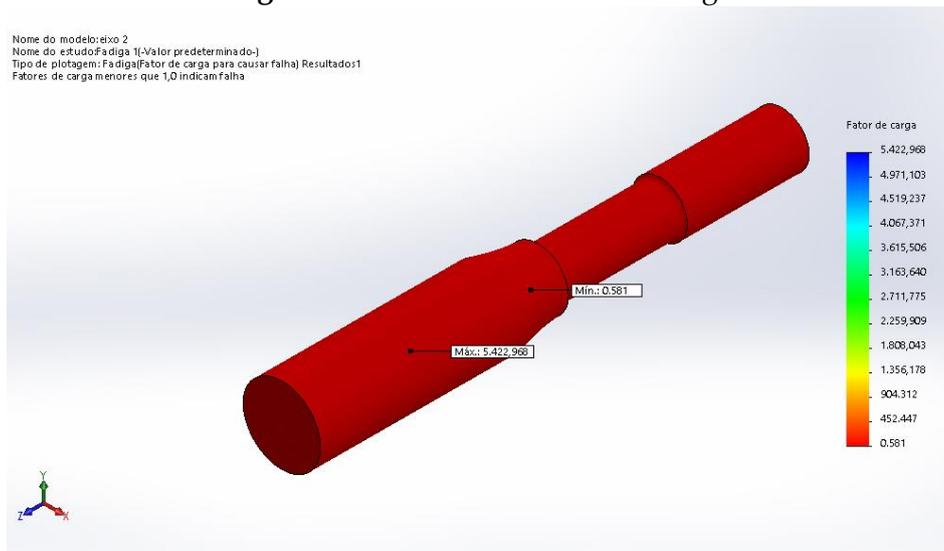
Fonte: Autoria própria (2019)

Figura 8 – Resultado de Deformação

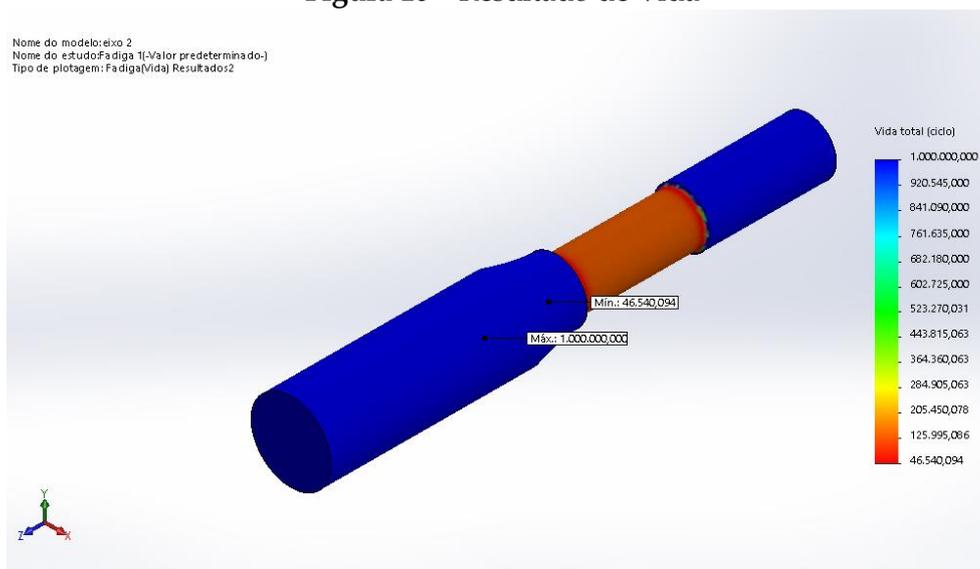


Fonte: Autoria própria (2019)

Os resultados obtidos mostram que o torque de 1000 N.m exercido sobre o eixo geraram uma tensão de 173 MPa, com concentração de tensão justamente no entalhe. Porém, a tensão gerada é inferior ao limite de escoamento do material, que é de 530 MPa. O deslocamento resultante máximo foi de 0.238mm, localizado próximo à face em que o torque foi realizado. Já a deformação equivalente máxima se encontra no filete do entalhe, região crítica da geometria. Os resultados de fadiga encontrados foram o Fator de carga e Vida, demonstrados a seguir.

Figura 9 – Resultado de Fator de carga

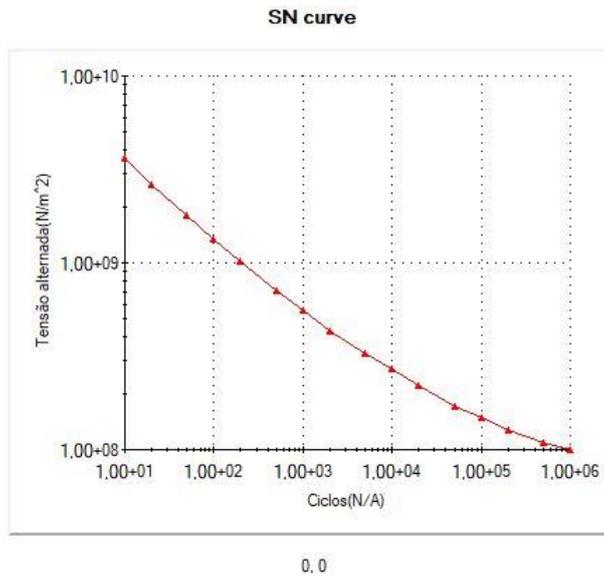
Fonte: Autoria própria (2019)

Figura 10 – Resultado de Vida

Fonte: Autoria própria (2019)

O fator de carga mínimo obtido com o experimento foi de 0.581, o que mostra que o eixo falhará, pois fatores de carga menores que 1,0 indicam falha. Já o resultado de Vida demonstra o valor mínimo de 46540 ciclos sem falhar, justamente na região do entalhe, o que mostra que entalhes em eixos diminuem sua vida útil. A curva S-N obtida com o experimento está representada na Figura 11.

Figura 11 – Curva S-N

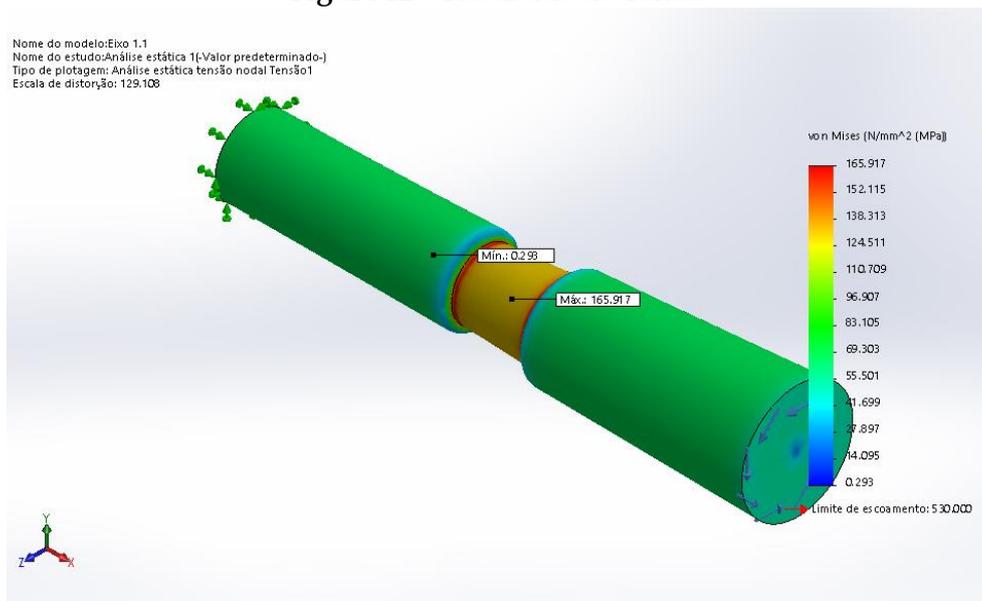


Fonte: Autoria própria (2019)

4.2 EIXO 2

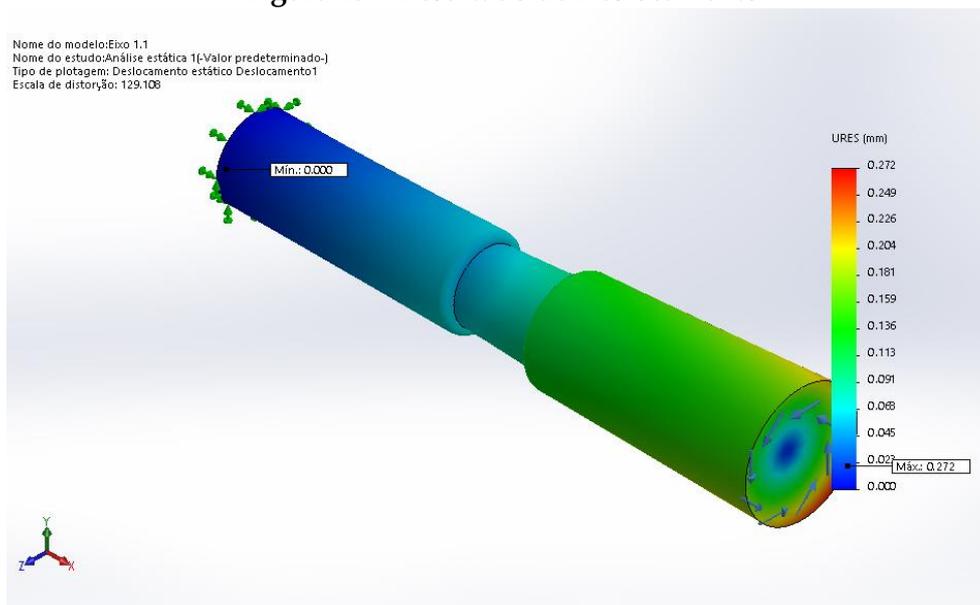
O Eixo 2 foi criado com base em um eixo com um rebaixo central, representando um entalhe com grande concentração de tensão. Os resultados estruturais encontrados no software foram de tensão, deslocamento e deformação, mostrados nas Figuras 12, 13 e 14.

Figura 12 – Resultado de Tensão



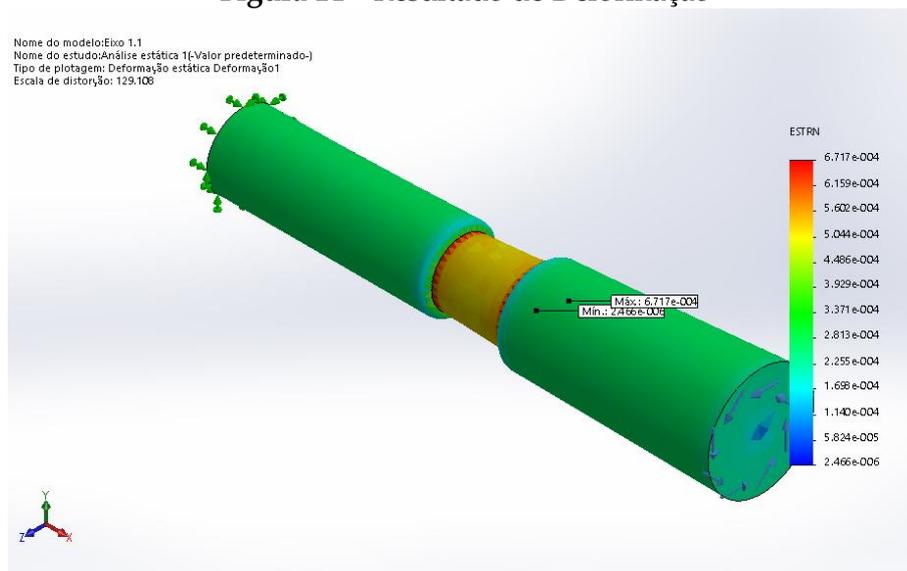
Fonte: Autoria própria (2019)

Figura 13 – Resultado de Deslocamento



Fonte: Autoria própria (2019)

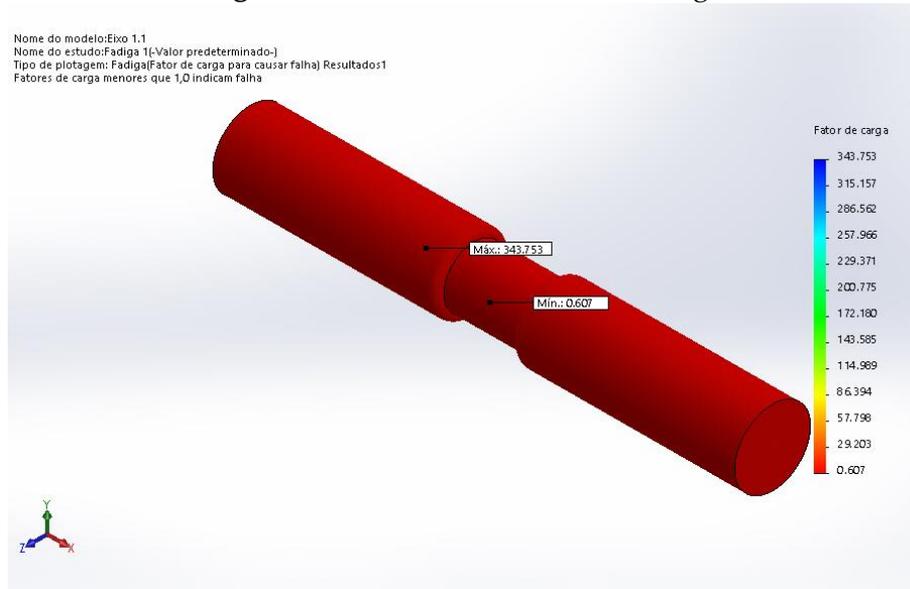
Figura 14 – Resultado de Deformação



Fonte: Autoria própria (2019)

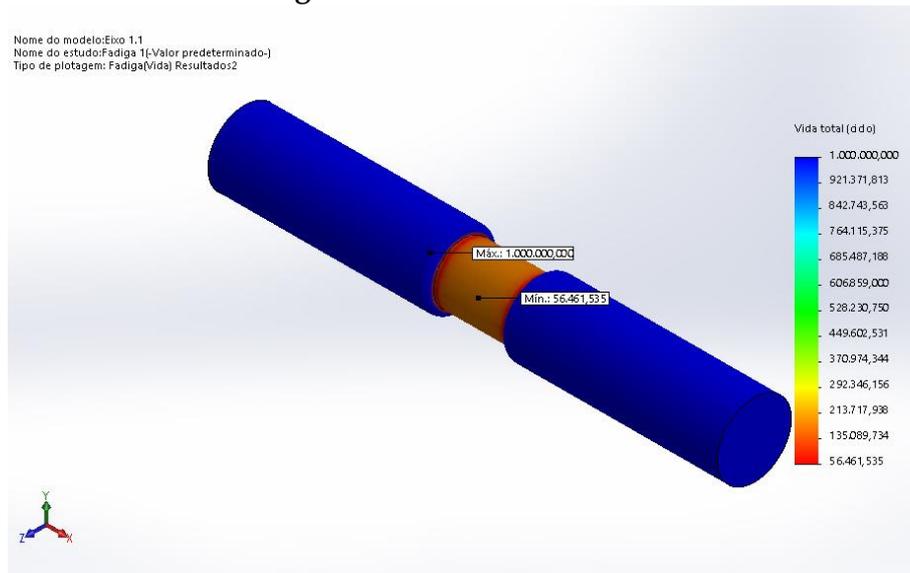
Os resultados encontrados demonstram que o torque de 1000 N.m exercido sobre o eixo geraram uma tensão de 165 MPa, com concentração de tensão justamente no rebaixo do eixo (entalhe). Porém, a tensão gerada é inferior ao limite de escoamento do material, que é de 530 MPa. O deslocamento resultante máximo foi de 0.272mm, localizado na face em que o torque foi realizado. A deformação equivalente máxima se localiza na extremidade do entalhe, região crítica da geometria. Os resultados de fadiga encontrados foram o Fator de carga e Vida, demonstrados a seguir.

Figura 15 – Resultado de Fator de carga



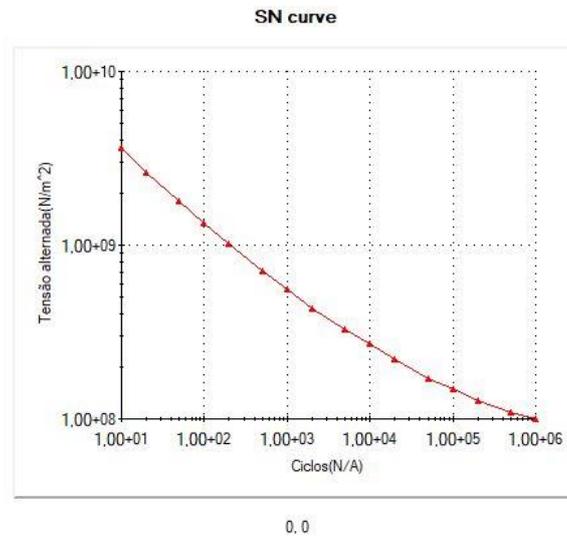
Fonte: Autoria própria (2019)

Figura 16 – Resultado de Vida



Fonte: Autoria própria (2019)

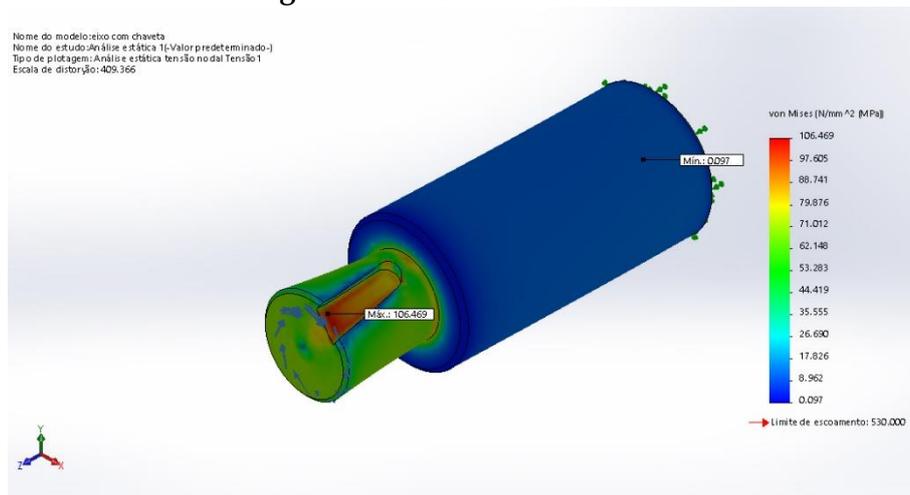
O fator de carga mínimo obtido com o experimento foi de 0.607, o que mostra que o eixo falhará, pois fatores de carga menores que 1,0 indicam falha. Toda a superfície externa do eixo apresenta fator de carga com indicação de falha. Já o resultado de Vida demonstra o valor mínimo de 56461 ciclos sem falhar, localizado na região do entalhe, o que mostra que entalhes em eixos diminuem sua vida útil e são concentradores de tensão. A curva S-N obtida com o experimento está representada na Figura 17 abaixo:

Figura 17 – Curva S-N

Fonte: Autoria própria (2019)

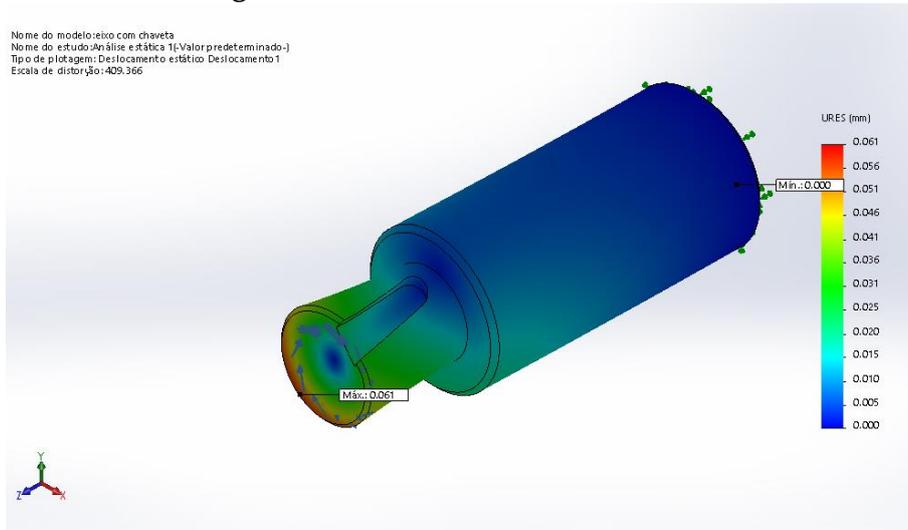
4.3 EIXO 3

A terceira geometria (Eixo 3) remete a um eixo com um rasgo de chaveta, entalhe bastante comum em eixos, que é utilizado para fixar dois elementos para realizarem uma rotação síncrona, como eixos e polias, eixos e engrenagens, entre outros. Os resultados estruturais encontrados no software foram de tensão, deslocamento e deformação, mostrados nas Figuras 18, 19 e 20.

Figura 18 – Resultado de Tensão

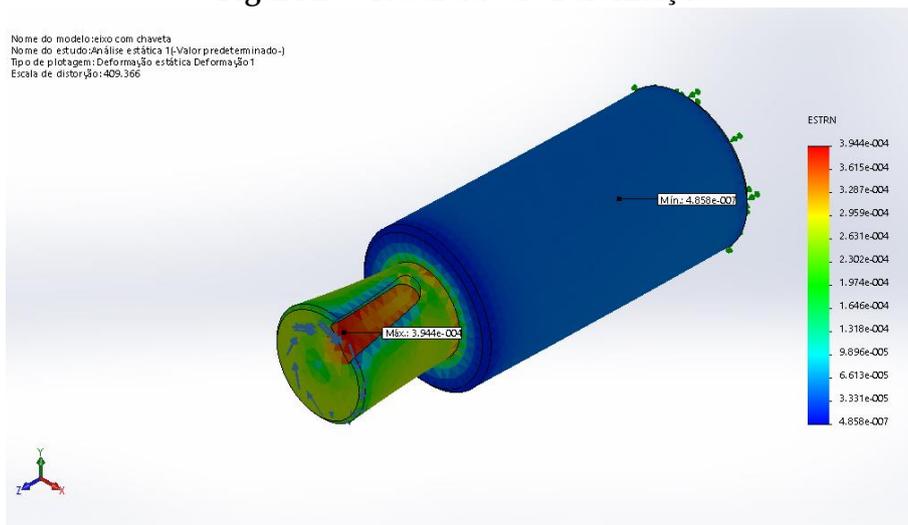
Fonte: Autoria própria (2019)

Figura 19 – Resultado de Deslocamento



Fonte: Autoria própria (2019)

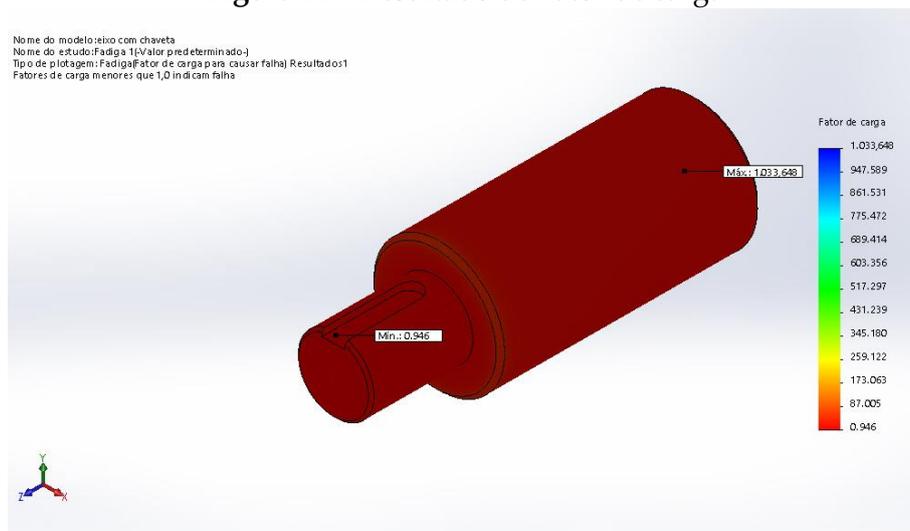
Figura 20 – Resultado de Deformação



Fonte: Autoria própria (2019)

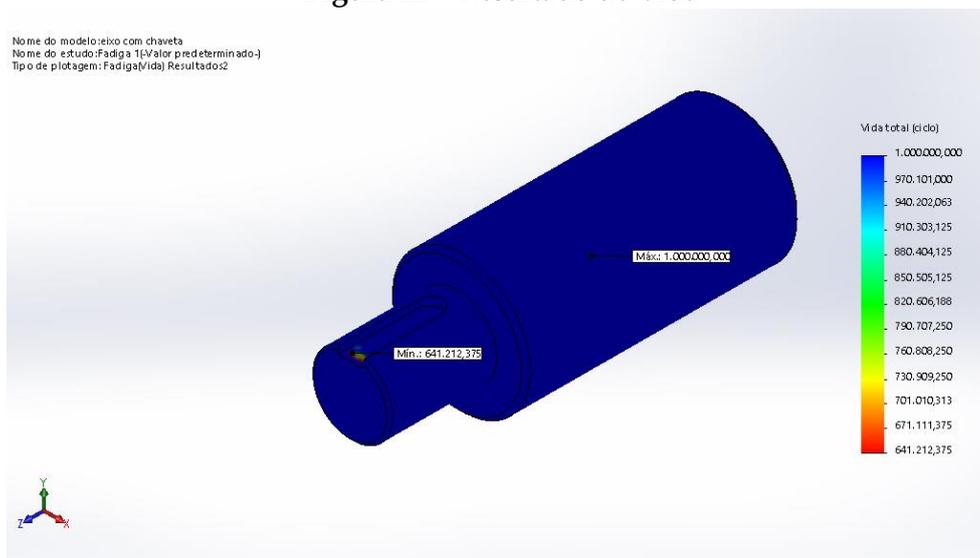
Os resultados encontrados demonstram que o torque de 1000 N.m exercido sobre o eixo geraram uma tensão de 106 MPa, com concentração de tensão no rasgo de chaveta do eixo. Porém, a tensão gerada é inferior ao limite de escoamento do material, que é de 530 MPa. O deslocamento resultante máximo foi de 0.061mm, localizado na face em que o torque foi realizado. A deformação equivalente máxima se encontra no rasgo de chaveta (entalhe), região crítica do eixo estudado. Os resultados de fadiga encontrados foram o Fator de carga e Vida, demonstrados a seguir.

Figura 21 – Resultado de Fator de carga



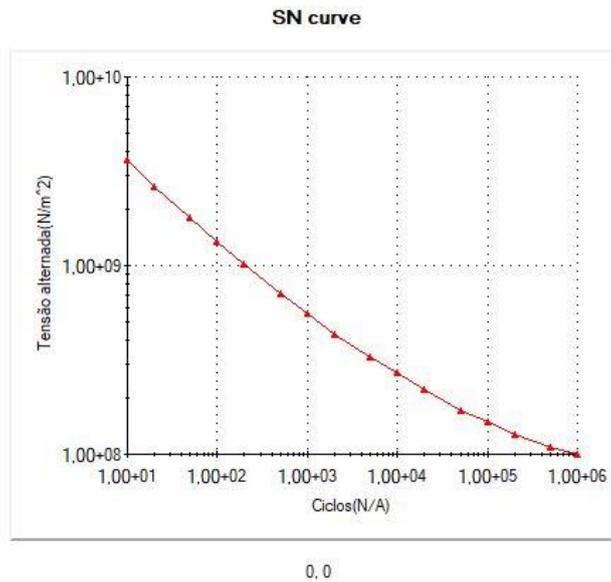
Fonte: Autoria própria (2019)

Figura 22 – Resultado de Vida



Fonte: Autoria própria (2019)

O fator de carga mínimo obtido com o experimento foi de 0.946, o que mostra que o eixo falhará, pois fatores de carga menores que 1,0 indicam falha. Já o resultado de Vida demonstra o valor mínimo de 641212 ciclos sem falhar, localizado na região do entalhe, o que mostra que entalhes em eixos diminuem sua vida útil. A curva S-N obtida com o experimento está representada na Figura 23.

Figura 23 – Curva S-N

Fonte: Autoria própria (2019)

5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, o presente estudo possibilitou uma análise estrutural e de fadiga de eixos rotativos com a presença de entalhes. Uma análise estática considerando tensão, deformação, além de análise de fadiga, foi efetuada. O estudo de fadiga é essencial, pois a grande maioria das falhas de componentes de máquinas, em serviço, se deve à fadiga. A ruptura por fadiga ocorre sem nenhum “aviso-prévio”, ou seja, num dado momento a máquina está funcionando perfeitamente e, num instante seguinte, ocorre falha inesperada. Isso ocasiona grandes transtornos e prejuízos financeiros, além de colocar em risco a integridade dos operadores dos equipamentos.

Com base nos resultados das simulações numéricas, têm-se ferramentas e métodos necessários para se modificarem os eixos estudados, minimizando assim pontos críticos das geometrias, como é o caso de regiões concentradoras de tensão presentes nos eixos. Conhecer os pontos críticos de uma estrutura é de suma importância em um projeto, sobretudo devido à possibilidade de melhorias em sua estrutura.

REFERÊNCIAS

ANDERSON, T. L. **Fracture mechanics: fundamentals and applications**, EUA, CRC Press, 2005.

BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J. Keith. **Elementos de máquinas de Shigley**. Porto Alegre: Amgh, 2016. Disponível em:

<<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580555554/>>.

FERREIRA, Bruno Fagundes. **Detecção de trincas em eixos rotativos através de medição de vibrações**. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) – Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

LOTTI, R. S. Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos. **R Dental Press Ortodon Ortop Facial**, Maringá, v. 11, n. 2, p. 35-43, abril 2006.

MELLO, Luiz Henrique Bresser Cardoso de. **Predição de vida à fadiga de eixo entalhado sob flexão-torção baseada na abordagem deformação-vida**. Brasília, outubro de 2013.

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas**: uma abordagem integrada. Tradução de João Batista de Aguiar. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

SIMÕES, Daniel de Albuquerque. **Entalhes melhorados e otimizados**. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/21361/21361_3.PDF>. Acesso em: 02 fev. 2019.

SYSTEMES, Dassault. **Curva de tensão (S-N) - ciclo de vida**. 2018. Disponível em: <http://help.solidworks.com/2018/portuguese-brazilian/SolidWorks/Cworks/c_SN_Curve.htm>. Acesso em: 10 fev. 2019.