

ANÁLISE DE FADIGA PARA OS AÇOS ABNT 1045 E ABNT 4140 PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Brenda Martins Fernandes, b.martinsf4@gmail.com¹
Reny Angela Renzetti, reny@unifei.edu.br¹

¹Universidade Federal de Itajubá, Rua Irmã Ivone Drumond, 200 - Distrito Industrial II, Itabira, Minas Gerais,

Resumo. O objetivo do presente trabalho foi realizar simulações de fadiga pelo método dos elementos finitos a partir de dados estáticos provenientes de ensaios de tração para o aço ABNT 1045 e ABNT 4140 e comparar os resultados obtidos com outras literaturas da área. A metodologia utilizada para a simulação baseou-se no pré-processamento, solução e pós processamento. No pré-processamento, foi desenhada a geometria em CAD (do inglês, computer-aided design), definidas as propriedades do material, gerada a malha e aplicadas as condições de contorno. A solução foi processada pelo software ANSYS® e o pós processamento baseou-se na avaliação dos resultados da simulação. As análises se mostraram próximas das encontradas na literatura quando utilizados dados de propriedades do material do estudo em análise, embora as simulações não tenham considerado tensões residuais, rugosidade ou até mesmo possíveis defeitos na peça. Assim, o método dos elementos finitos se mostrou uma ferramenta valiosa na análise de fadiga, e se combinada com ensaios experimentais pode ser de grande auxílio no desenvolvimento de projetos.

Palavras chave: Fadiga de alto ciclo, simulação, método dos elementos finitos, aços.

Abstract. The aim of the present work was to carry out fatigue simulations by the finite element method using static data from tensile tests for steel ABNT 1045 and ABNT 4140 and to compare the results obtained with other literature in the area. The methodology used for the simulation was based on pre-processing, solution and post-processing. In pre-processing, CAD geometry (computer-aided design) was designed, material properties were defined, mesh was generated and boundary conditions were applied. The solution was processed by the ANSYS® software and the post-processing was based on the evaluation of the simulation results. The analyzes were found to be close to those found in the literature when data on the properties of the study material under analysis were used, although the simulations did not consider residual stresses, roughness or even possible defects in the part. Thus, the finite element method proved to be a valuable tool in fatigue analysis, and if combined with experimental tests it can be of great help in the development of projects.

Keywords: High cycle fatigue, simulation, finite element method, steel.

1. INTRODUÇÃO

Os componentes mecânicos estão sujeitos a diversos carregamentos durante sua vida útil, os quais podem ser de origem estática ou dinâmica. Mas independentemente do tipo, falhas podem ocorrer caso não seja realizado um estudo e dimensionamento correto do sistema. A fadiga, por exemplo, é uma falha muito comum proveniente de carregamentos dinâmicos. Por meio de carregamentos cíclicos ou flutuantes, uma peça pode apresentar ruptura sem que se tenha um indício característico ou variação marcante, mesmo trabalhando com tensões abaixo do limite de escoamento do material.

A fadiga de alto ciclo ocorre quando tensões cíclicas menores que o limite de escoamento do material são aplicadas, o que promove a deformação plástica de modo localizado. Nesta situação, as falhas acontecem para um número alto de ciclos, $N > 10^5$ ciclos (Oliveira, 2001).

Condições de serviço com altas tensões e baixos números de ciclos também ocorrem na prática, é o caso de turbinas a vapor, por exemplo. Definidas como fadigas de baixo ciclo, essas apresentam tensões relativamente altas (comumente maiores que o limite de escoamento do material) e baixos números de ciclos ($N < 10^5$ ciclos). É comum ocorrer em função de tensões de origem térmica, uma vez que as tensões térmicas promovem a expansão ou contração do material. Assim, a fadiga de baixo ciclo resulta de deformações cíclicas (Dieter, 1985).

Uma maneira de auxiliar nos estudos de fadiga é por meio de simulações, as quais, quando realizadas de modo correto, se mostram uma ferramenta vantajosa. Apesar de ser um método de solução aproximado, as simulações podem minimizar a necessidade de inúmeros testes experimentais e são capazes de ajudar na tomada de decisões sem a construção de vários protótipos físicos, reduzindo a necessidade de uma metodologia baseada na tentativa e erro. Recursos e tempo podem ser melhores administrados através de simulações.

Além disso, os aços ABNT 1045 e ABNT 4140 são amplamente empregados na indústria. O aço ABNT 1045 apresenta uma boa usinabilidade, boa resistência mecânica, média soldabilidade, alta forjabilidade e é comumente utilizado em eixos e peças. Já o ABNT 4140 é um aço empregado em eixos, pinos, bielas e virabrequins, apresentando boa resistência mecânica, média usinabilidade, baixa soldabilidade e alta temperabilidade (Callister, 2012; Chiaverini, 2005).

Assim, este artigo teve como objetivo estudar a vida em fadiga para as ligas ABNT 1045 e ABNT 4140 pelo método dos elementos finitos.

3. METODOLOGIA

Para o presente estudo utilizou-se uma metodologia baseada no pré-processamento, solução e pós-processamento. No pré-processamento, foi realizada a construção da geometria em CAD, definição das propriedades dos materiais no *software*, discretização, análise de convergência e aplicação das condições de contorno. O modelo adotado para o corpo de prova foi o formato padrão para ensaios de fadiga (Pereira, 2019). Foi necessário simplificar a geometria, uma vez que ela possuía roscas na extremidade para fixar o corpo de prova em uma máquina universal de ensaios marca MC, modelo WDW-300E. Para a simulação, a rosca acrescentaria um maior tempo de processamento, mesmo não sendo a região de interesse para o trabalho. Por essa razão, a geometria utilizada neste estudo é mostrada na Figura 1.

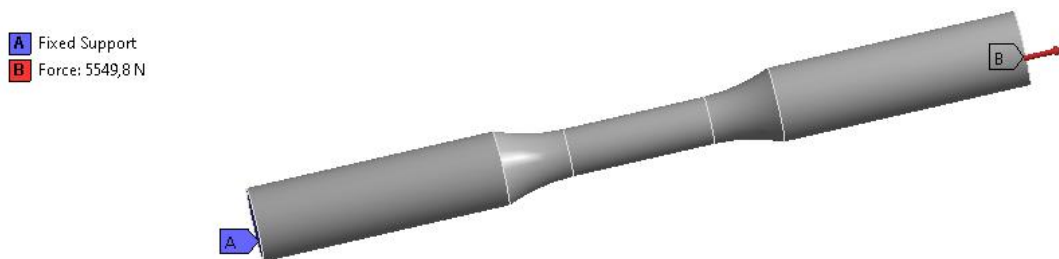
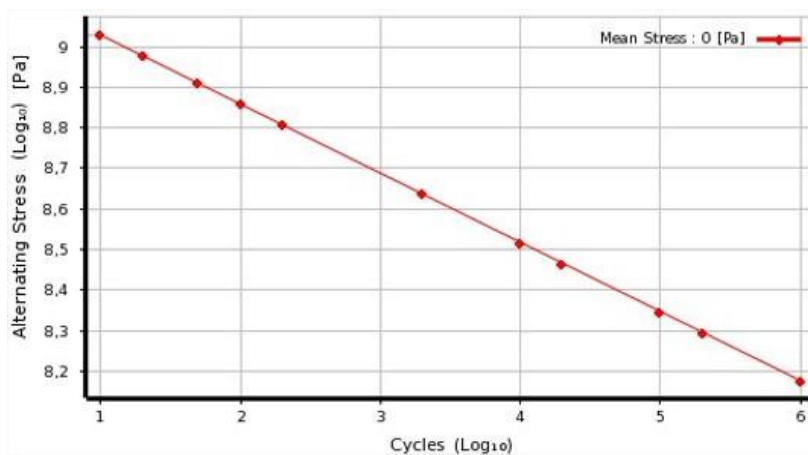


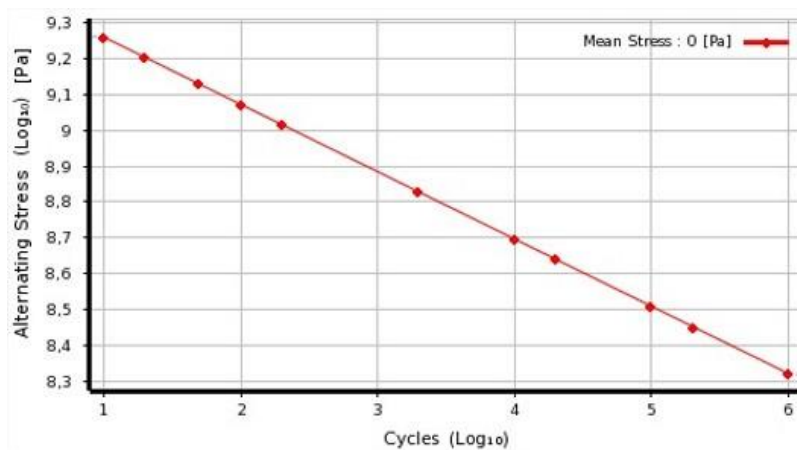
Figura 1: Geometria CAD do corpo de prova para ensaio de fadiga. A região de fixação do corpo de prova está em azul e em vermelho a região de aplicação da força (Autor, 2020).

O ANSYS® apresenta uma biblioteca com alguns materiais, no entanto, caso algum não se encontre no sistema é necessário criar o material com dados que a simulação irá demandar. Para um ensaio de fadiga, é preciso acrescentar propriedades que descrevam como o material irá se comportar, como por exemplo, expoente de resistência à fadiga, coeficiente de ductilidade, além de propriedades como resistência à tração, módulo de elasticidade e limite de escoamento. Desta maneira, os aços ABNT 1045 e ABNT 4140 foram obtidos da literatura (Pereira, 2019) e adicionados manualmente à biblioteca.

Foi necessário acrescentar também a curva S-N característica do material. Como não se tinha conhecimento dessa curva, optou-se por estimar o comportamento dela através de propriedades estáticas. Por meio de condições que o corpo de prova estaria sujeito na simulação (temperatura, carregamento e diâmetro, por exemplo) e propriedades do material como limite de resistência a tração e limite de fadiga médio para 10^3 ciclos, foi levantada a curva para o aço 1045 (Fig. 2a) e para o aço 4140 (Fig. 2b). Vale ressaltar que todo o equacionamento tomou como base a bibliografia de Norton (2013).



(a)



(b)

Figura 2: Curva S-N estimada no software ANSYS® para (a) Aço ABNT 1045 (b) Aço ABNT 4140

A malha para o estudo contou com 7928 nós e 1620 elementos do tipo adaptativo de 3 mm com controle de malha 1 mm. Optou-se pelo controle de malha, pois refiná-la por completo aumentaria o tempo de processamento sem necessidade, sendo que é possível aplicar o refinamento somente em locais de interesse. A Figura 3 mostra a malha adotada no estudo.

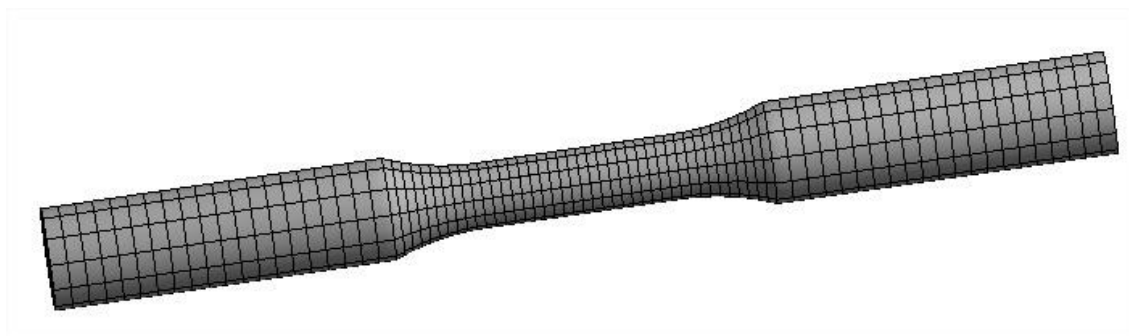


Figura 3: Malha corpo de prova (Autor, 2020).

Para garantir a convergência estudou-se o refinamento em função da tensão máxima de von Mises, considerando uma tensão aplicada de 0,8 da tensão de ruptura do ABNT 1045.

Tabela 1: Comportamento da Tensão máxima de von Mises para refinamento de malha (Autor, 2020).

Variável	Tensão máxima de von Mises [MPa]	Erro relativo [%]
Malha adaptativa 3 mm.	516,23	-
Malha adaptativa 3 mm com controle de malha na região de estudo de 2 mm.	522,88	1,27
Malha adaptativa 3 mm com controle de malha na região de estudo de 1 mm.	529,69	1,29
Malha adaptativa 3 mm com controle de malha na região de estudo de 0,5 mm.	526,41	0,62

Depois da malha, foram definidas as condições de contorno do problema. Azevedo (2016) definiu condições de contorno como fatores que devem ser atribuídos pelo usuário, os quais influenciarão o comportamento da análise. As condições de contorno são: tipos de contato, carregamentos, restrições e cargas de corpos. As escolhas para aplicação de engaste e força foram escolhidas de modo a simular uma máquina de ensaios realizando um teste de fadiga. O engaste foi feito na base do corpo de prova e a força foi aplicada na face contrária ao engaste (Fig. 1), embora a magnitude da força tenha sido alterada durante o estudo, o local de aplicação se manteve o mesmo. Vale ressaltar que o ANSYS® permite aplicar uma força, assim, para submeter a peça a uma tensão específica foi preciso multiplicar a tensão pela área do corpo de prova e obter a força necessária para provocar tal tensão.

Definidos a geometria, material, malha e condições de contorno, foi estabelecido o tipo de carregamento. Para garantir uma carga que provoque fadiga variando entre tração e compressão de mesma amplitude, o carregamento do processo teve uma razão de tensão igual a -1. Para o presente trabalho não foi adotada nenhuma teoria de correção de falha visto que a tensão média foi zero.

A solução foi processada através do programa ANSYS® e para o pós-processamento foi analisado se o resultado obtido era aceitável ou não. Nesse estágio, foi importante saber se o resultado representa o problema físico. Caso a solução não fosse aceitável seria necessário retornar a etapa de pré-Processamento, rever as condições e realizar uma nova simulação.

4. RESULTADOS

Para analisar se as simulações estavam corretas buscou-se literaturas de fadiga para o aço ABNT 1045 e o ABNT 4140 a fim de comparar os resultados. O primeiro trabalho analisado foi o de Rodas (2019), o qual realizou um estudo analisando fadiga de altos ciclos para o aço ABNT 1045 afim de repotenciar uma máquina de ensaios mecânicos.

A Tabela 2 mostra uma comparação para a mesma amplitude de tensão entre os resultados das simulações e de Rodas. Na simulação 1 o número de ciclos até a falha obtido pela simulação é menor do que o valor reportado na literatura. Na simulação 2 os dados se mostraram muito mais próximos. A diferença pode ser explicada pelos valores adotados para o limite de fadiga corrigido e o limite de resistência à tração, uma vez que esses valores mudam de acordo com a microestrutura do material e, conseqüentemente, afetam o comportamento em fadiga.

Enquanto na simulação 1 a resistência a tração foi de 649,8 MPa e $S_e = 150,14$ MPa, dados obtidos através de ensaios estáticos. Na simulação 2 foi utilizado 637,26 MPa e $S_e = 318,09$ MPa, valores encontrados no trabalho de Rodas (2019). Desta forma, utilizando os valores encontrados na literatura, tem-se a quantidade de ciclos fica próxima à do ensaio experimental, Tabela 2.

Tabela 2: Comparação dos dados da simulação e literatura (RODAS, 2019) aço ABNT 1045 (Autor, 2020).

Amplitude de Tensão [MPa]	Número de Ciclos [Literatura]	Número de Ciclos [Simulação 1]	Número de Ciclos [Simulação 2]
442,12	2929	1503	2338
432,69	3949	1706	3370
428,76	4548	1800	3935
427,12	4676	1841	4199
425,55	4915	1881	4470

A Figura 4 mostra a distribuição da quantidade de ciclos ao longo do corpo para uma amplitude de tensão de 427,12 MPa da simulação 2. A região que ocorreu a falha foi na parte central do corpo de prova, o que condiz com o esperado, uma vez que foi dimensionado com este intuito.

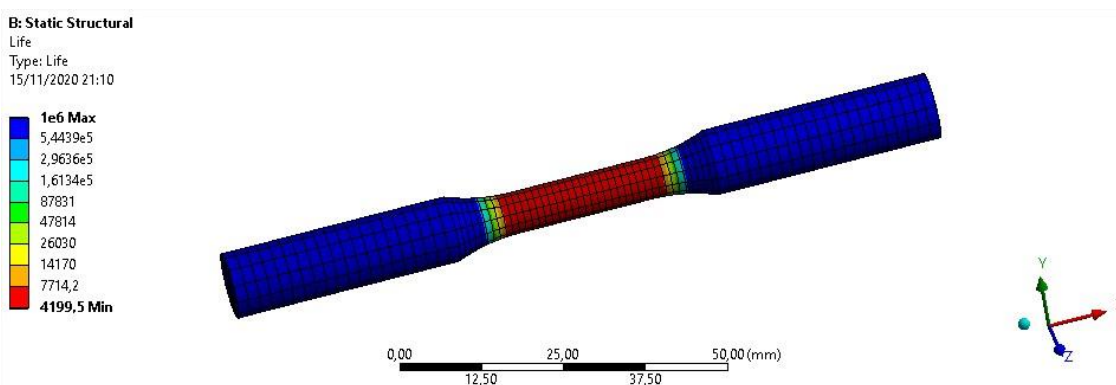


Figura 4: Resultado da simulação do aço ABNT 1045 para uma tensão de 427,12 MPa (Autor, 2020).

Meuren (2018) também realizou um estudo sobre a análise em fadiga, mas para o aço ABNT 4140. No qual uma parte de seu trabalho foi dedicada a examinar o número de ciclos até a falha de forma experimental. Foi elaborado também uma comparação (Tabela 3) entre os resultados dos ensaios da bibliografia adotada e da simulação.

Novamente os resultados apresentam uma grande divergência na simulação 1. A diferença entre a literatura e a simulação pode ser explicada pelo fato de que as tensões estimadas no estudo de Meuren e do presente trabalho para a

curva S-N do material foram diferentes. Enquanto na pesquisa de Meuren os valores foram de $S_m = 675 \text{ MPa}$ e $S_e = 388,8 \text{ MPa}$, para a simulação os dados foram de $S_m = 766,05$ e $S_e = 209,23$. Mas quando se considera os dados apresentado por Meuren e refaz os cálculos para uma nova curva S-N (Simulação 2), tem se os resultados da Tabela 3.

Tabela 3: Comparação dos dados da simulação e literatura (MAUREN, 2018) aço ABNT 4140 (Autor, 2020).

Amplitude de Tensão [MPa]	Número de Ciclos [Literatura]	Número de Ciclos [Simulação 1]	Número de Ciclos [Simulação 2]
547,5	10167	5152	9706
483,8	62560	9953	45678
413,8	338148	22868	323330

A Figura 5 mostra o resultado da simulação 1 para uma tensão de 547,5 MPa. E a Figura 6 mostra o resultado da simulação para tensão de 413,8 MPa da simulação 2. A escala de cores indicam as regiões e suas respectivas faixas de quantidade de ciclos.

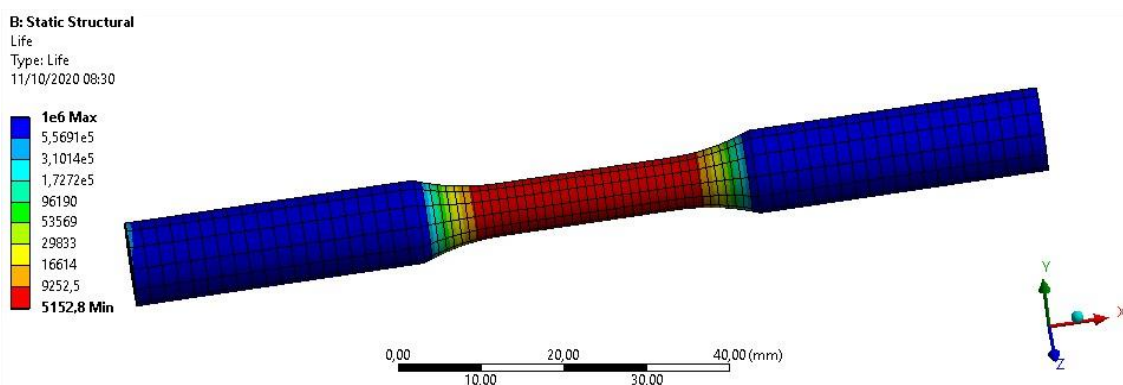


Figura 5: Simulação fadiga aço ABNT 4140 para tensão de 547,5 MPa (Autor, 2020).

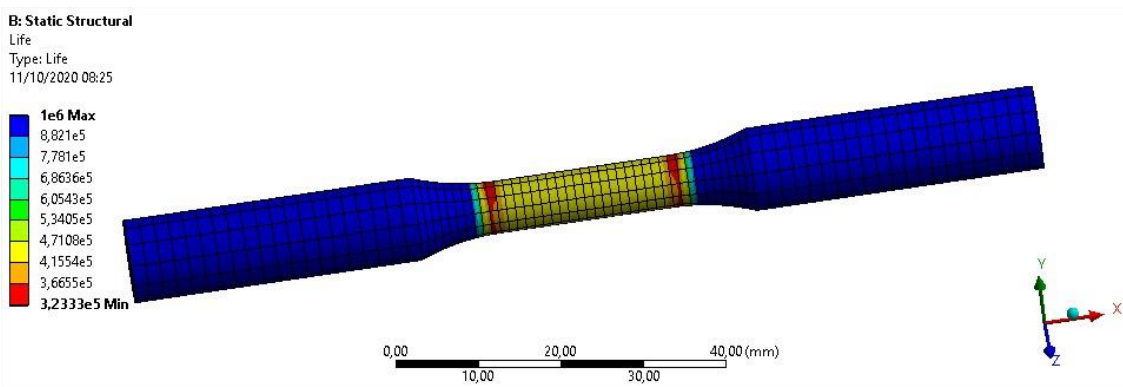


Figura 6: Resultado da simulação para aço ABNT 4140 submetido a uma amplitude de tensão de 413,8 MPa (Autor, 2020).

Comparando os resultados da literatura com os das simulações percebe-se que há diferenças nos resultados, maiores em algumas simulações e menores para outras, o que pode ser explicado por meio de alguns pontos.

Os cálculos de fadiga utilizados neste trabalho foram provenientes de dados estáticos. É comum ocorrer pequenas variações nas propriedades dos materiais, pelo fato de não serem homogêneos e isotrópicos. Pequenas diferenças podem alterar bastante os resultados, e para a simulação são necessários vários outros dados estáticos, como por exemplo o limite de escoamento, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. Assim, um conjunto de pequenas diferenças pode levar a resultados muito diferentes. É o caso, por exemplo, do estudo realizado por Meuren (2018) e Rodas (2019), quando utilizados valores obtidos dos trabalhos de cada autor os resultados foram muito próximos.

Vale ressaltar também que a vida em fadiga é uma quantidade estatística de acordo com Dieter (1985), logo é esperado que ocorra um desvio considerável com dados levantados a partir de poucos corpos de prova. Porém, essa variação não ocorreu para simulações pelo método dos elementos finitos realizadas neste estudo, para um mesmo valor de tensão o

resultado se manteve o mesmo. Isso se deve ao fato de que a simulação utilizada neste estudo calcula análises estruturais através do conceito de rigidez, enquanto ensaios experimentais levam em consideração tensões residuais provenientes de processos de fabricação, defeitos no material, trincas e todas as variáveis que vão influenciar na vida em fadiga, porém não foram possíveis de serem adicionadas à simulação.

5. CONCLUSÕES

A simulação pelo método de elementos finitos é um método aproximado, quando se trabalha nesse campo o cálculo das equações que descrevem o comportamento do sistema é feito para um número finito de pontos do domínio, os quais o usuário julga serem capaz de descrever um acontecimento real.

Assim, observou-se com a pesquisa que a análise de fadiga por elementos finitos pode ser muito útil. Contudo, para resultados mais precisos com curvas S-N estimadas, são necessários dados estáticos do material a ser simulado. Portanto, a simulação pode auxiliar na análise de fadiga dos componentes. A junção do estudo de fadiga com o de simulação pelo método de elementos finitos pode ser de colaboração mútua no desenvolvimento de pesquisas.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- CALLISTER, Jr. W. D.; Ciência e Engenharia dos Materiais: uma introdução. Tradução Sérgio Murilo Stamile Soares. 8 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- CHIAVERINI, V. Aços e ferros fundidos. 7ª ed. São Paulo: ABM, 2005, 518p
- DIETER, G. E. Metalurgia Mecânica. 2ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1985.
- DOWLING, N. E. Mechanical Behavior of Materials - Engineering, deformation, fracture and fatigue. 4 ed. Pearson 2013.
- MEUREN, A. L. Análise em Fadiga do Aço 4140. Projeto de graduação em Engenharia Mecânica - Universidade de Brasília, 60p., 2018.
- NORTON, R. L. Projeto de Máquinas: uma abordagem integrada. 4. ed. Tradução de Konstantinos Dimitriou Stavropoulos et al. Porto Alegre: Bookman, 2013. 1055 p. Título original: Design of Machinery.
- OLIVEIRA, A. C. Propriedade mecânicas de fadiga de baixo ciclo à temperatura de 300° C do aço inoxidável austenítico do sistema Fe-Cr-Mn-N. Dissertação de mestrado - Escola de engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 2001.
- PEREIRA, D. A. Desenvolvimento e construção de um sistema de aquecimento indutivo para ensaios de fadiga isotérmica de baixo ciclo em ligas ferrosas. Dissertação de Mestrado em Ciências em Materiais para Engenharia - Universidade Federal de Itajubá, 121 p., 2019.
- RODAS, C. D. R. Repotenciación de la máquina a fatiga em ciclos altos en el acero AISI 1045 com la finalidad de adquirir datos em los laboratorios de la carrera de ingeniería mecânica. Projeto de graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Técnica de Ambato, 126p., 2019.
- TAKAHASHI, B. X. Metodologia Moderna para Análise de Fadiga Baseada em Elementos Finitos de Componentes Sujeitos a Fadiga Uni e Multiaxial. Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Universidade de São Paulo, 2014.