

ESTIMATIVA DE VIDA À FADIGA PARA O AÇO AISI 1045 TREFILADO E NORMALIZADO COM MICRO DEFEITO

Hélio de Souza Queiroz, helio.queiroz@ueg.br^{1,2}

Edgar Nobuo Mamiya, mamiya@unb.br³

¹Departamento de Engenharia Agrícola, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Estadual de Goiás - UEG, Anápolis, GO, Brasil

²Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA, Anápolis, GO, Brasil. helio.queiroz@unievangelica.edu.br

³Universidade de Brasília - UnB, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil

Resumo: Este artigo aborda a estimativa de vida à fadiga para o aço AISI 1045 na presença de pequenos defeitos superficiais. Foram obtidas curvas de fadiga axial e torcional realizando experimentos com controle de força e torque para vidas compreendidas entre 10^4 e 10^6 ciclos. O artigo discute o comportamento de iniciação da trinca, destacando a influência do micro defeito na vida à fadiga. Para estimar o número de ciclos para falha do material com defeito foi verificado a influência do tamanho do defeito na relação de Basquin. Para realizar os estudos foram impostas histórias de carregamento axial e torcional a um conjunto de corpos de prova sem e com defeitos artificiais superficiais de geometria cilíndrica com tamanhos de 500 e 700 μm .

Palavras-chave: defeitos superficiais, fadiga axial e torcional, raiz de área, iniciação de trincas

1. INTRODUÇÃO

Os estudos sobre fadiga dos materiais vêm sendo abordados por pesquisadores há muitas décadas, onde o mecanismo de fratura devido a este fenômeno é responsável pelas principais falhas de peças e componentes mecânicos/estruturais. A presença de carregamentos axial, torcional ou combinados, somados a presença de entalhes e defeitos na forma de concentradores de tensão propiciam a iniciação e propagação de trincas que provocam a falha ou ruptura do material, muitas vezes catastrófica.

Os processos de fabricação e operação de estruturas e componentes mecânicos podem gerar defeitos tipo inclusões, cavidades e riscos que em determinadas condições apresentam influência significativa na vida à fadiga, constituindo problemas de grande interesse do segmento industrial (Yanase & Endo; 2014).

A presença de um defeito ou irregularidade em uma peça ou componente mecânico apresenta deformações plásticas acumuladas em seu entorno quando submetidos a carregamentos cíclicos, podendo levar à nucleação de trincas, podendo ou não se propagar de acordo com as condições limiares do defeito (Socie & Marquis, 2000).

Murakami & Endo (1980) mostram que desde a década de 70 foram realizados importantes estudos sobre o efeito de inclusões e entalhes no limite de resistência à fadiga de materiais metálicos. A partir da década de 80 intensificaram as investigações sobre a influência de defeitos superficiais na resistência à fadiga, destacando a utilização do parâmetro geométrico, definido por Murakami & Endo, (1983), denominado de raiz quadrada de área - $\sqrt{\text{área}}$ que define o tamanho do defeito. Estes estudos propuseram quantificar o limite de resistência à fadiga axial do material utilizando apenas propriedades estáticas do material, dureza e o tamanho de defeito.

Os estudos referentes à fadiga axial, torcional e multiaxial utilizam propriedades e características como dureza e limite de resistência à tração (Murakami, 2002; Bandara *et al*, 2015), amplitude de tensão ou deformação cisalhante, amplitude de tensão ou deformação normal (Socie & Marquis, 2000), fator de intensidade de tensão, fator de concentração de tensão à fadiga, tamanho do defeito (Vincent *et al*, 2016), distância crítica da raiz do entalhe (Susmel & Taylor, 2006) e gradiente de tensão na vizinhança do defeito (Nasr *et al*, 2017). Os resultados disponíveis na literatura ainda predominam com ênfase em resistência à fadiga, com abordagem ainda incipiente para previsão de vida à fadiga na presença de pequenos defeitos.

Este trabalho consiste em estudar a ocorrência de falha no material AISI 1045 submetido a carregamentos cíclicos axial e torcional alternados na presença de micro defeitos com geometria cilíndrica de tamanhos de 500 e 700 μm , realizando previsão de vida à fadiga em regime compreendido entre 10^4 e 10^6 ciclos.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1. Usinagem, Normalização e Lixamento dos Corpos de Prova

Os estudos foram realizados com o material aço AISI 1045, laminado, trefilado, normalizado e eletropolido. Foram confeccionados um total de 48 corpos de prova, sendo 4 do tipo “vazado” com seção útil de 2 mm (Fig. 1.b) e 44 corpos de prova do tipo “cheio” com seção útil de 8 mm de diâmetro (Fig. 1.a). Os corpos de prova foram fabricados em torno comando numérico computadorizado (CNC) apresentando uma rugosidade de 0,30 Ra no final do processo de usinagem.

Os corpos de prova cilíndricos cheios foram utilizados para ensaios monotônicos de tração e ensaios de fadiga axial e torcional e os corpos de prova vazados para ensaios monotônicos de torção (Fig. 1).

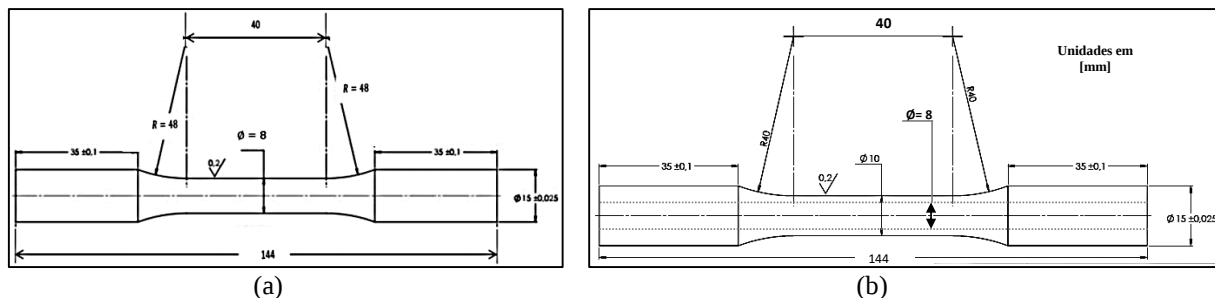


Figura 1. Corpos de prova utilizados nos experimentos: (a) Corpo de prova “cheio” para ensaios monotônicos de tração e ensaios de fadiga axial e torcional e (b) Corpo de prova “vazado” para ensaios monotônicos de torção.

Após usinagem os corpos de prova foram normalizados em forno tipo mufla com controle automático de aquecimento e resfriamento adotando a temperatura de aquecimento com rampa de 4 horas para uma isoterma de 850°C por 20 minutos e resfriamento ao ar, com a finalidade de refinar e homogeneizar os grãos e promover alívio de tensão devido aos processos de trefilamento e usinagem. Posteriormente, os corpos de prova passaram por lixamento e polimento mecânico utilizando lixas de n°s 200, 400, 500, 600, 800 e 1200 obtendo uma rugosidade entre 0,08 e 0,10 Ra.

Para análise qualitativa do processo de normalização foram preparadas 7 amostras de acordo com a norma ASTM E112 (2004) para medição do tamanho do grão perlítico-ferrítico. Para isto, realizou Ataque químico com os ácidos Nital 3% por 10 minutos e Picral 5% por 5 minutos. Utilizou-se microscopia eletrônica de varredura (MEV) e o software ImageJ para tratamento das imagens. Observou um tamanho médio de grão de $(7,5 \pm 1,5) \mu\text{m}$ e uma composição de 59% de ferrita e 41% de perlita, características típicas para o aço AISI 1045 normalizado (Turner *et al*, 2017).

2.2. Confeção dos Micro Defeitos Artificiais

Foram produzidos dois diferentes tamanhos de micro defeitos artificiais de geometria cilíndrica utilizando processo de eletroerosão com eletrodo de grafite industrial (Figs. 2 e 3). Utilizou-se um equipamento de eletroerosão modelo CHMER 50 HZ automático. As medições da geometria dos defeitos foram realizadas em microscopia confocal de varredura laser e apresentaram tamanhos de: micro defeito I - $\sqrt{\text{area}} = 500 \mu\text{m}$ ($d = 520 \mu\text{m}$ e $h = 480 \mu\text{m}$) e micro defeito II - $\sqrt{\text{area}} = 700 \mu\text{m}$ ($d = 710 \mu\text{m}$ e $h = 690 \mu\text{m}$). A Figura 2 mostra a localização do defeito e o sentido/direção utilizados para aplicar os carregamentos de tração e torção alternados.

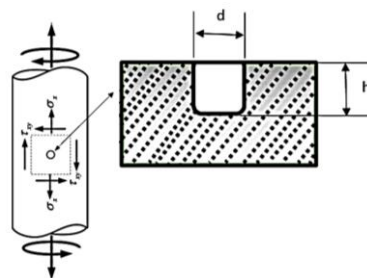


Figura 2. Esquema do micro defeito e direção de aplicação dos carregamentos cíclicos axial e torcional. Yanase (2013) - Modificado

A Figura 3 mostra um dos corpos de prova com micro defeito cilíndrico de tamanho de 700 μm .

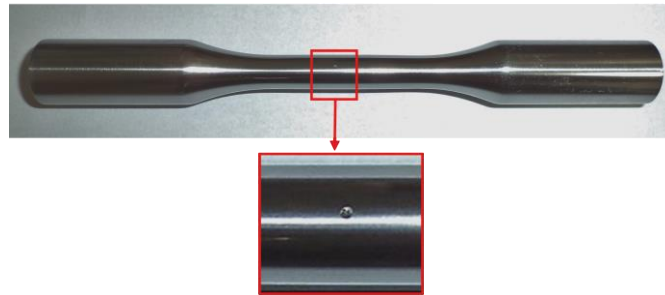


Figura 3. Corpo de prova com micro defeito cilíndrico de tamanho - $\sqrt{\text{area}} = 700 \mu\text{m}$

2.3. Realização de Eletropolimento para Alívio de Tensões Internas

Com a finalidade de promover alívio das tensões internas geradas pelos processos de lixamento e micro usinagem por eletroerosão, os corpos de prova passaram pelo processo de eletropolimento. Este processo foi baseado na norma ASTM B 91-00 utilizando 1000ml de solução de 50% de ácido sulfúrico e 50% de ácido fosfórico a uma temperatura de 70°C em recipiente de vidro, eletrodos (catodo e anodo) de aço inoxidável 304, uma corrente elétrica de 4,5A-cc e uma tensão de 5 Volts durante 5 minutos. Todo o processo de eletropolimento foi realizado em ambiente com capela de exaustão para eliminação dos gases gerados no processo de eletrólise. Estes experimentos foram realizados nos laboratórios de química da FATEC Senai Roberto Mange e no Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA.

2.4. Experimentos para Identificação das Propriedades Mecânicas Estáticas e Dureza do Material

Os ensaios estáticos e cíclicos foram realizados utilizando uma máquina MTS série 646 *Hydraulic Collet Grip, Model - 809 Axial/Torsional Test System*. Equipamento com capacidade de carga axial de 100 KN e carga torcional de 1100 Nm. Foram determinadas as propriedades monotônicas do material: tensão de escoamento à tração (σ_y), tensão de escoamento à torção (τ_y), tensão última à tração (σ_u); Módulo de Young (E), Módulo de cisalhamento (G) e a dureza do material (HV). Para realizar os ensaios monotônicos de tração e torção utilizou-se como referência as normas ASTM E8/E8M-11 e ASTM E143-02. As propriedades estáticas experimentais estão apresentadas na Figura 4 e nas Tabelas 1 e 2.

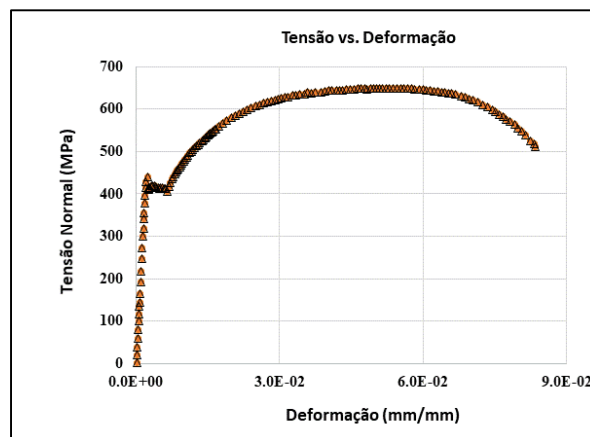


Figura 4. Curva Tensão vs. Deformação com dados experimentais para determinação do módulo de Young; módulo de cisalhamento e tensão última. Material aço AISI 1045 Trefilado e Normalizado.

A tensão última de torção (τ_u) não foi determinada devido à limitação de deslocamento angular da máquina utilizada no ensaio (*MTS - 809 Axial/Torsional Test System* – deslocamento angular variando entre -45° e +45°), faixa de deslocamento insuficiente para promover a fratura do corpo de prova por meio de carregamento estático de torção.

A propriedade mecânica dureza (HV) dada em [$\text{Kgf} \cdot \text{mm}^{-2}$] foi utilizada por Murakami *et al.* (Murakami, 2002) como parâmetro para análise do limite de resistência à fadiga axial e torcional. Neste trabalho os testes de dureza foram baseados na norma ASTM A833-08^a e ASTM-E18-15. Utilizou-se um equipamento tipo durômetro Rockwell em escala HRB. A aproximação para a escala de dureza Vickers (HV) baseou-se na norma ASTM E 140-02, obtendo uma dureza média nas direções longitudinais e transversais idênticas de (210 ± 8) HV.

A Tabela 1 apresenta as propriedades estáticas de tração e a Tab. 2 as propriedades estáticas de torção utilizadas como referências para realização dos ensaios cíclicos de fadiga axial e torcional.

Tabela 1. Propriedades mecânicas estáticas de tração e dureza do aço AISI 1045 trefilado, normalizado e eletropolido. Dados experimentais.

Material	Tensão última (σ_u) MPa	Limite de escoamento (σ_y) MPa	Módulo de Young (E) GPa	Dureza (HV) Kgf mm ⁻²
Aço AISI 1045	647	405	208	210

Tabela 2. Propriedades mecânicas estáticas de torção do aço AISI 1045 trefilado, normalizado e eletropolido. Dados experimentais.

Material	Limites de escoamento (τ_y) MPa	Módulos de Cisalhamento (G) GPa
Aço AISI 1045	230	76

Os resultados experimentais estáticos mostram que o material estudado apresenta um bom comportamento elástico para relação de Mises ($\tau_y/\sigma_y = 230/405 = 0,5679$) com uma diferença inferior a 2% com a relação original de Mises ($\tau_y/\sigma_y = \sqrt{3}/3$).

2.5. Condições para Obtenção das Curvas SN de Fadiga Axial e Torcional

Para realização dos ensaios de fadiga foram considerados os procedimentos da ASTM E 466-96 (Reapproved 2002). Foram estabelecidos 5 níveis de amplitude de tensão normal alternada para os ensaios cíclicos axiais: 219, 235, 251, 267 e 283 MPa ($R = -1$) e para os ensaios cíclicos torcionais 5 níveis de amplitude de tensão cisalhante alternada 161, 170, 179, 188 e 197 MPa ($R = -1$), ambos os ensaios foram realizados com frequência de carregamento de 5 Hz.

Para verificação do comportamento cíclico do material, investigou-se o material apresenta ou não comportamento de amolecimento ou endurecimento nas condições estabelecidas para os carregamentos. Foram realizados ensaios cíclicos axiais e torcionais com controle de força em 5 níveis de tensão. Utilizou-se extensômetros (axial e torcional) para monitoramento do comportamento da deformação ao longo de 2×10^3 ciclos, observando em todos os casos o comportamento de estabilidade da deformação sem presença de laços de histerese. Este resultado está de acordo com os estudos realizados por Eifler & Macherauch (1988) apud Mughrabi & Christ, (1997) que mostraram que o aço SAE 1045 normalizado ensaiado em temperatura ambiente apresentou estabilidade para níveis de amplitudes de tensão até próximo a 300 MPa, na presença de pequenas deformações plásticas. Estudos experimentais apresentados pela SAE AE-14 (1989) também mostram que o aço 1045 normalizado apresenta relativa estabilidade a partir de 100 ciclos de carregamento com razão de deformação nula para condições de amplitudes de tensão axial inferiores a 300 MPa em concordância com o diagnóstico obtido neste trabalho.

3. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FADIGA AXIAL E TORCIONAL

Os experimentos de fadiga realizados com controle de força e torque em regime considerado elástico apresentaram como resultados os coeficientes e expoentes de resistência à fadiga, conforme Tab.3.

Tabela 3. Resultados experimentais dos coeficientes e expoentes da Relação de Basquin para fadiga axial e torcional ($R = -1$). Corpos de prova com e sem micro defeito.

Tipo de Carregamento / Presença de defeito	Coeficiente de Resistência σ_f' ou τ_f' [MPa]	Expoente de Resistência b ou b'
Fadiga Axial sem defeito	675.7925	-0.078223
Fadiga Axial com defeito de 500 μ m	978.7184	-0.118150
Fadiga Axial com defeito de 700 μ m	1171.8302	-0.136960
Fadiga Torcional sem defeito	584.2226	-0.089332
Fadiga Torcional com defeito de 500 μ m	1076.7359	-0.148910
Fadiga Torcional com defeito de 700 μ m	1131.9881	-0.158410

* σ_f' e b – parâmetros para Fadiga Axial

* τ_f' e b' – parâmetros para Fadiga Torcional

Os valores de limite de resistência à fadiga axial ($\sigma_{fl} = 167$ MPa) e limite de resistência à fadiga torcional ($\tau_{fl} = 134$ MPa) estimados pelas equações propostas por Murakami (Murakami, 2002) foram adicionados nos gráficos das Figuras 5 e 6 considerando uma vida de 10^6 ciclos e comparados com os valores de extrapolação das curvas ajustadas

com os dados experimentais. Para aços é comum na literatura a consideração de valores de vida entre 10^6 e 10^7 ciclos para *runouts* de ensaios considerados de alto cíclicos (Murakami, 2002; Schönbauer *et al.*, 2016).

A Figura 5 apresenta curvas SN comparativas para fadiga axial, mostrando que a presença do micro defeito artificial de tamanho de 500 μm desviou para esquerda a curva de vida na ordem de 2 a 6 vezes entre 10^3 e 10^6 ciclos. Mostra também que o micro defeito de tamanho de 700 μm desviou a curva de vida para esquerda na ordem de 3 a 11 vezes entre 10^3 e 10^6 ciclos.

A Figura 6 apresenta curvas SN comparativas para fadiga torcional, mostrando que a presença do micro defeito artificial de tamanho de 500 μm desviou para esquerda a curva de vida na ordem de 2 a 4 vezes entre 10^4 e 10^6 ciclos. Mostra também que a presença do micro defeito artificial de tamanho de 700 μm desviou para esquerda a curva de vida na ordem de 3 a 7 vezes entre 4×10^4 e 3×10^5 ciclos.

Estes resultados estão em consonância com os apresentados por Murakami (2002) para uma vida próxima de 10^6 ciclos tanto para fadiga axial quanto torcional.

As Figuras 5 e 6 também mostram a diferença entre a estimativa de Murakami para os limites de resistência à fadiga axial e torcional em comparação aos valores obtidos pela extrapolação das curvas SN ajustadas aos dados experimentais, considerando uma vida de 10^6 ciclos. Todos os erros das estimativas de Murakami foram inferiores a 10%.

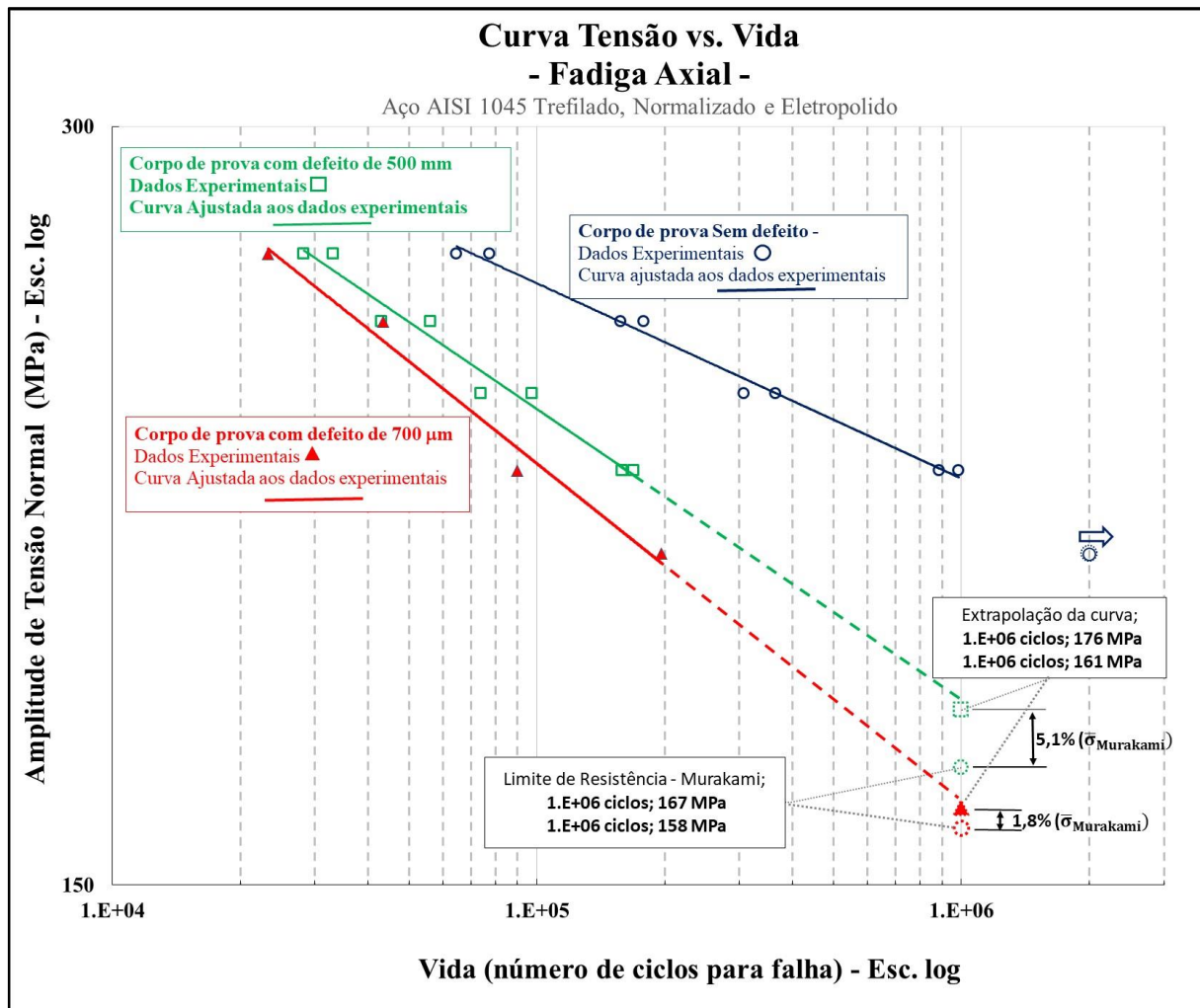


Figura 5. Curvas SN obtidas com dados experimentais de carregamento axial alternado com controle de força. Material eletropolido sem e com micro defeito artificial com geometria cilíndrica de tamanho de 500 μm e 700 μm .

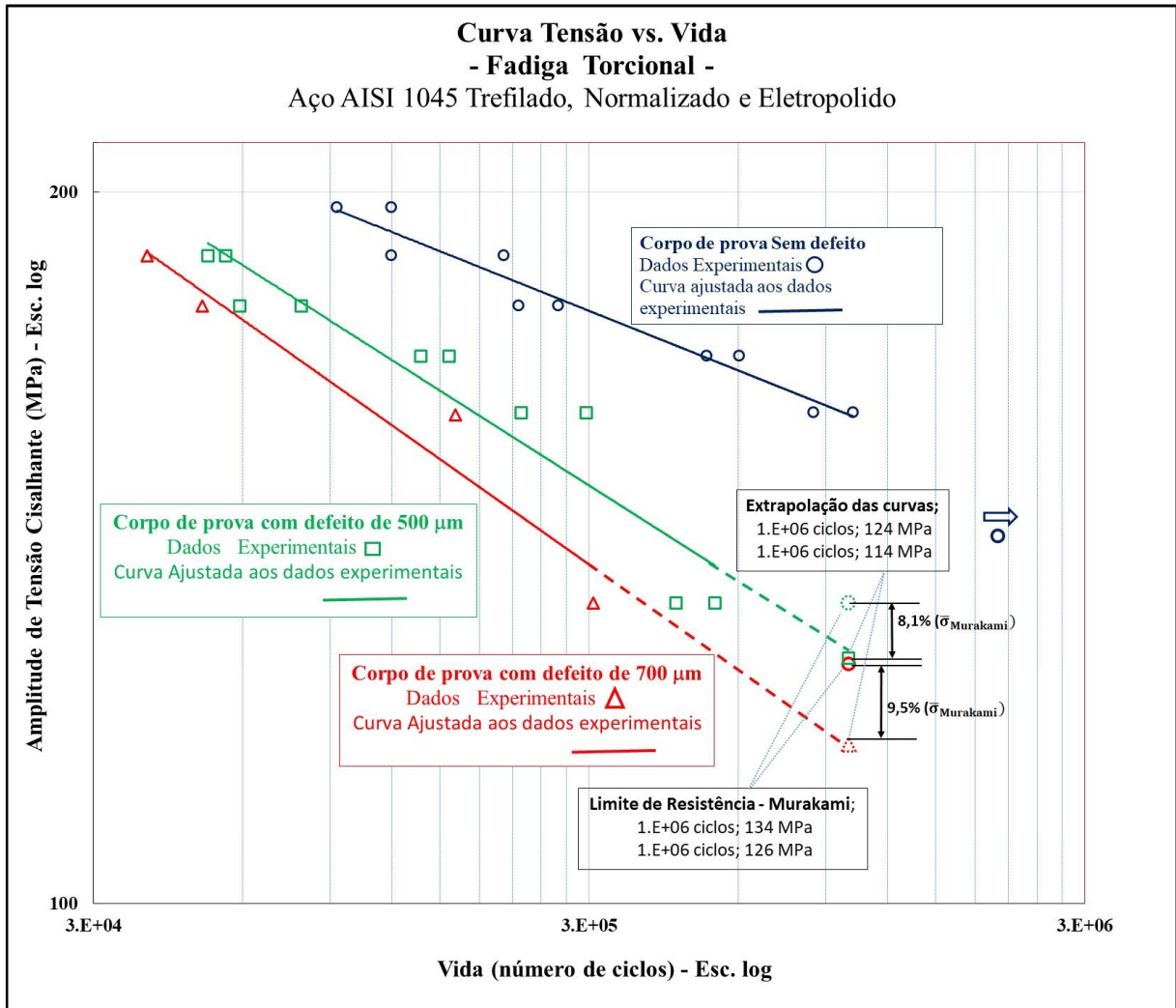


Figura 6. Curvas SN obtidas com dados experimentais para carregamento torcional alternado com controle de torque. Material eletropolido sem e com micro defeito artificial com geometria cilíndrica de tamanho de 500µm e 700µm.

4. PREVISÃO DE VIDA À FADIGA AXIAL E TORCIONAL BASEADO NA RELAÇÃO DE BASQUIN MODIFICADA

Considerando que o material investigado apresentou comportamento elástico aceitável para as condições definidas de carregamentos cíclicos axiais e torcionais, propõe-se incorporar o tamanho do defeito ($\sqrt{\text{area}}$) na relação de Basquin para estimar a vida à fadiga na presença dos micro defeitos superficiais artificiais.

A Equação 3 representa a curva de fadiga axial e a Eq. 4 a curva de fadiga torcional. Sendo σ_a e τ_a amplitudes de tensão alternada axial e torcional, respectivamente; σ'_f e τ'_f Coeficientes de resistência à fadiga; $(2N_f)$ a reversão cíclica até a falha e b e b' os expoentes de resistência à fadiga axial e torcional, respectivamente.

$$\sigma_a = (\sigma'_f) * (2N_f)^b \quad (3)$$

$$\tau_a = (\tau'_f) * (2N_f)^{b'} \quad (4)$$

Os dados experimentais dos ensaios de vida à fadiga axial e torcional presentes neste trabalho mostraram uma boa relação entre os coeficientes e expoentes de resistência à fadiga e o tamanho do defeito ($\sqrt{\text{area}}$). Observa-se que a Relação de Basquin para fadiga axial e torcional na presença do defeito pode ser estimada de acordo com as Eqs. 5 e 6.

$$\sigma_{a_estim} = (\sigma'_{f_estim}) * (2N_f)^{b_estim} \quad (5)$$

$$\tau_{a_estim} = (\tau'_{f_estim}) * (2N_f)^{b'_estim} \quad (6)$$

Onde: $\sigma'_{f_estim} = 1/C * [\sigma'_f * (1 + \sqrt{\text{area}})]$ e $b_estim = 1/C * [b * (1 + \sqrt{\text{area}})]$

$$\tau'_{f_estim} = 1/C * [\tau'_f * (1 + \sqrt{area})] \text{ e } b'_{_estim} = 1/C * [b'_f * (1 + \sqrt{area})]$$

Sendo: C uma constante material dada em [mm], $\sqrt{area}$ o tamanho do micro defeito dado em [mm], σ_{a_estim} , τ_{a_estim} , σ'_{f_estim} , τ'_{f_estim} dados em [MPa].

De forma abrangente a literatura mostra que o tamanho do defeito influencia significativamente no limite de resistência à fadiga axial e torcional (Socie & Marquis, 2000; Murakami, 2002; Billaudeau & Nadot, 2004). Estudos recentes foram propostos com a intenção de estimar vida finita à fadiga na presença de defeitos. Destaca-se os estudos realizados por Nasr *et al.*, (2017) onde é discutido o efeito do gradiente de tensão e o tamanho do defeito como parâmetros que influenciam na vida à fadiga axial, torcional e multiaxial. Estes autores propuseram uma metodologia utilizando a definição de “high stressed volume” como parâmetro que influencia a iniciação de trincas em materiais defeituosos e não defeituosos.

As Figuras 7 e 8 mostram as curvas SN ajustadas aos dados experimentais considerando o material com micro defeitos superficiais de 500 e 700 μm . Apresenta também as curvas de Basquin modificadas propostas para estimar a vida a fadiga axial e torcional em regime considerado elástico. Foi realizado uma análise do parâmetro C variando entre 0,5 e 1,5 otimizando o erro entre vida estimada e Vida obtida experimentalmente utilizando o modelo proposto. Nestas condições as curvas de estimativas de vida apresentaram resultados com largura de bandas com fator entre 1 e 2.

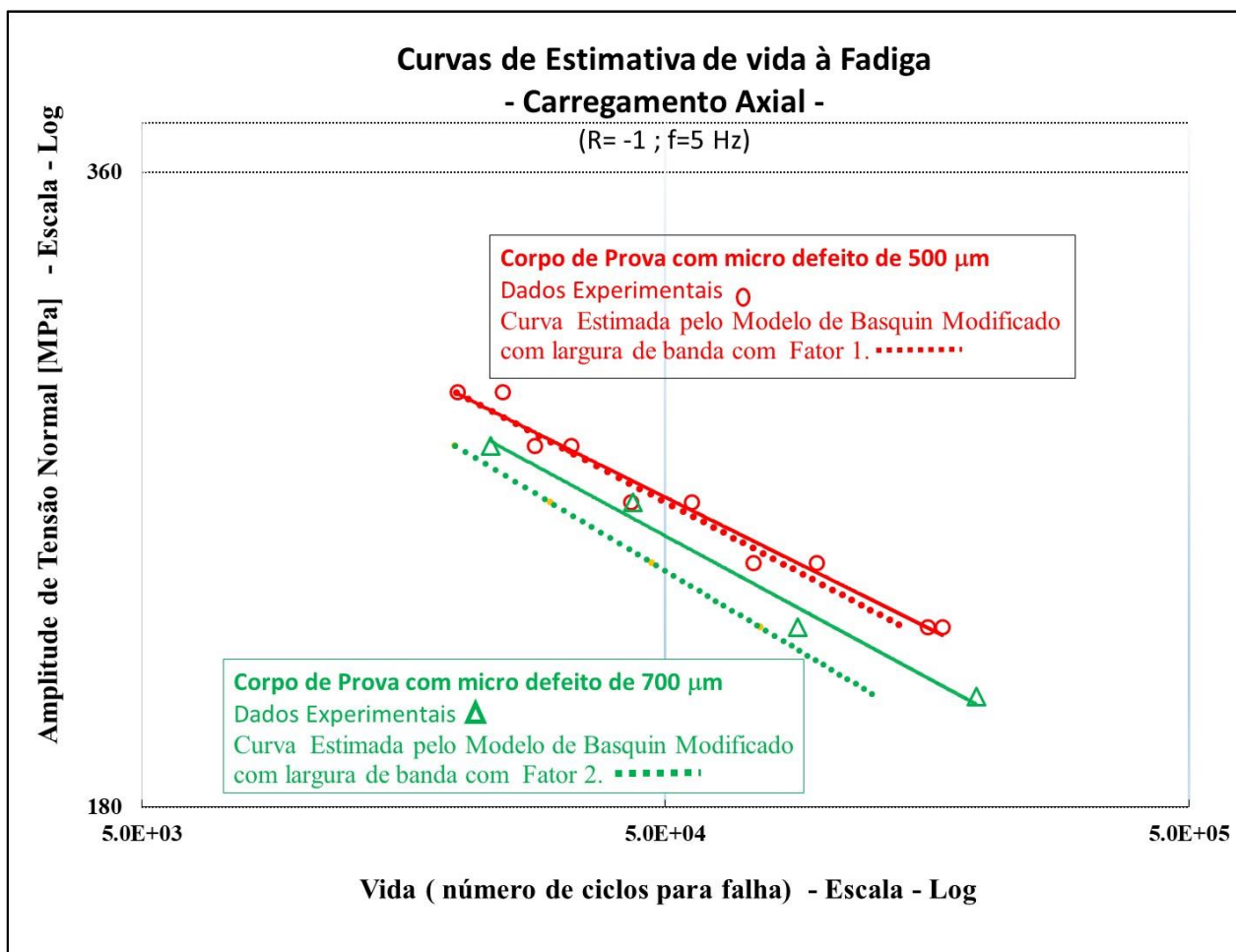


Figura 7. Curvas de Basquin Modificadas utilizadas para previsão de vida à fadiga axial em material com micro defeitos de tamanho de 500 e 700 μm

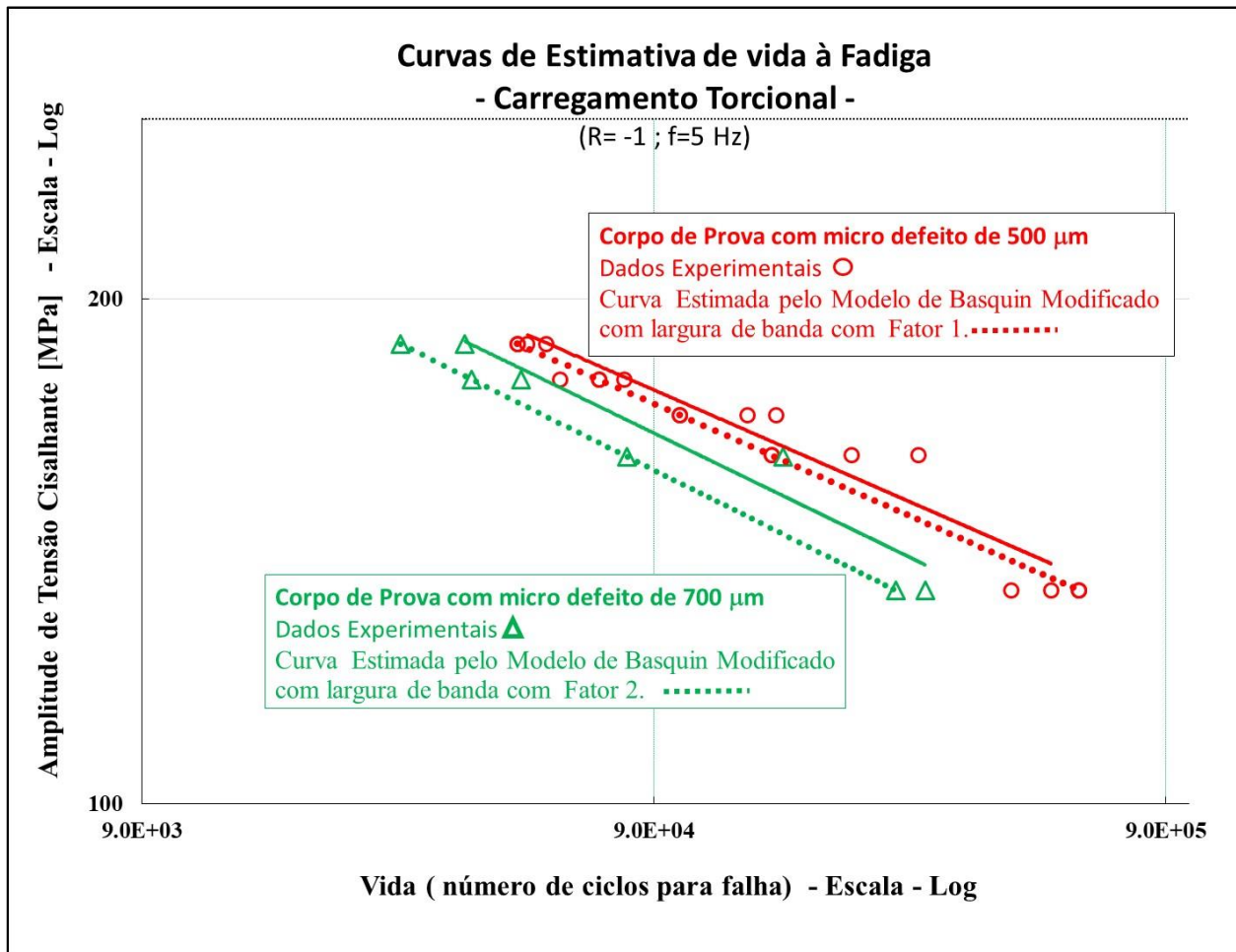


Figura 8. Curvas de Basquin Modificadas utilizadas para previsão de vida à fadiga torcional em material com micro defeitos de tamanho de 500 e 700 μm

As estimativas de vida para fadiga torcional apresentaram comportamento similar às estimativas de vida para fadiga axial (Fig. 7 e 8). Nas condições adotadas nos experimentos e efetuando otimização do erro entre vida estimada e vida obtida experimentalmente, observou-se que o parâmetro material C apresenta valores próximos de 1 para todos os resultados de fadiga axial e torcional (Tab. 3). Foram obtidos valores de $C= 0,9$ para os ensaios de fadiga axial e $C= 1$ para os ensaios de fadiga torcional.

Tabela 3. Valores estimados dos coeficientes e expoentes da Relação de Basquin Modificada para fadiga axial e torcional ($R= -1$). Corpos de prova com micro defeitos.

Tipo de Carregamento na Presença de defeito	Tamanho do defeito- $\sqrt{\text{area}}$ (mm)	Parâmetro Material- C (mm)	Coeficiente de Resistência à fadiga - Estimado $\sigma'_{f_estim} / \tau'_{f_estim}$ (MPa)	Expoente de Resistência à fadiga - Estimado b_estim / b'_{estim} -
Fadiga Axial com defeito	0.500	0.9	1126.3208	- 0.1304
Fadiga Torcional com defeito	0.500	1	876.3339	- 0.1340
Fadiga Axial com defeito	0.700	0.9	1276.4969	- 0.1478
Fadiga Torcional com defeito	0.700	1	993.1784	- 0.1518

As Figuras 9 e 10 apresentam imagens macroscópicas de corpos de prova fraturados nos experimentos de Fadiga Axial sem e com presença de micro defeito. Observa-se regiões macroscópicas mais homogêneas e regulares devido a propagação mais lenta das trincas e regiões mais irregulares com mudanças de direção antes da falha, possivelmente devido a propagação brusca e falha do material (Dowling, 2007).

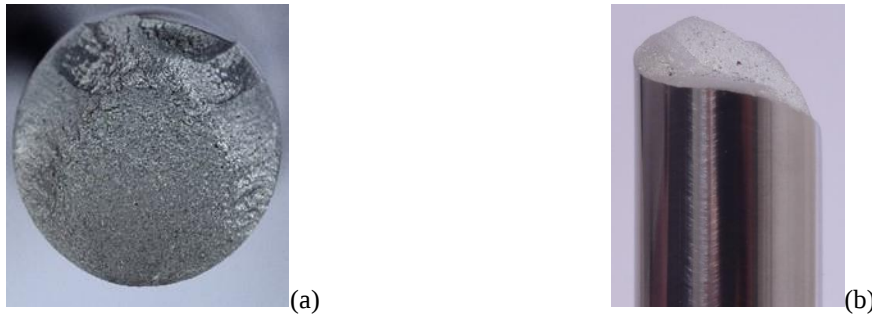


Figura 9. Macrografias de superfícies de falha de corpo de prova submetido a carregamento de Fadiga Axial sem defeito: (a) visto de topo e (b) vista lateral do mesmo corpo de prova. Amplitude de tensão normal de 251 MPa ($R=-1$ e $f=5$ Hz).

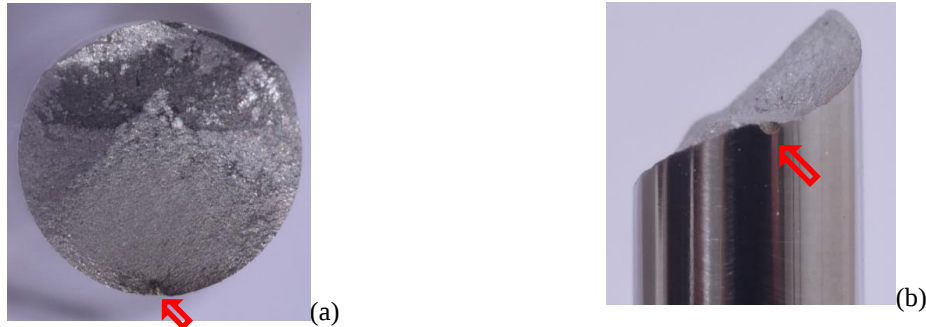


Figura 10. Macrografias de superfícies de falha de corpo de prova submetido a carregamento de Fadiga Axial com defeito: (a) visto de topo e (b) vista lateral do mesmo corpo de prova. Amplitude de tensão normal de 251 MPa ($R=-1$ e $f=5$ Hz).

Observa-se nas Figs 9 e 10 uma região perpendicular ao sentido de carregamento axial onde prevaleceu a propagação lenta no modo de falha de tensão normal (modo I) e outras regiões com propagação rápida e fratura no modo cisalhante (modo II), com inclinações próximas de 45° , de acordo Dowling, (2007).

A Figura 11 mostra zonas macroscópicas de corpos de prova fraturados devido a carregamento cíclico torcional, ocorrendo iniciação da trinca no modo cisalhante e posterior propagação e fratura no modo normal ou misto (Socie & Marquis, 2000).

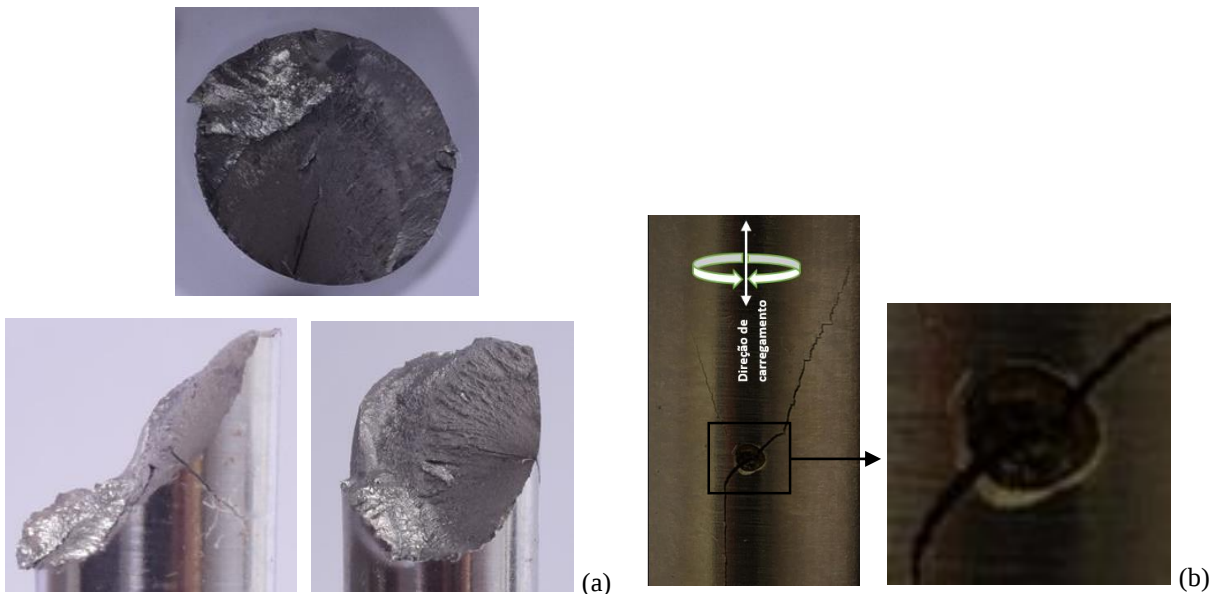


Figura 11. Macrografias da superfície de falha de corpos de prova submetido a carregamentos de fadiga torcional sem defeito (a) e com micro defeito (b). Amplitude de tensão cisalhante de 170 MPa ($R= -1$; $f=5$ Hz).

De um modo geral, corpos de prova ou peças e componentes mecânicos submetidos a carregamentos cíclicos na presença de defeitos podem apresentar deformações plásticas acumuladas em seu entorno, podendo evoluir para bandas persistentes de discordâncias, provocando ou não a iniciação e propagação de trincas, dependendo das condições limiares do defeito (Socie & Marquis, 2000).

5. CONCLUSÕES

Nas condições estabelecidas o material AISI 1045 apresentou bom comportamento elástico para relação de Mises $\tau_y/\sigma_y = 0,5679$.

Os micro defeitos de tamanhos de 500 e 700 μm reduziram a vida a fadiga axial em um fator de 2 a 6 vezes e a vida a fadiga torcional de 2 a 11 vezes entre 10^3 e 10^6 ciclos, respectivamente.

De acordo com as condições adotadas, a vida à fadiga axial e torcional na presença de micro defeito pôde ser prevista utilizando os parâmetros C e $\sqrt{\text{área}}$ com estimativa de vida conservadora variando entre fator 1 e 2.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o aporte financeiro realizado pela Universidade de Brasília através do EDITAL DPP-UnB Nº 02/2016, ao Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA, à FATEC SENAI Roberto Mange – Anápolis-GO e a empresa Elka Flex pela fabricação dos corpos de prova, pela realização dos processos de eletroerosão e eletropolimento. O 2º autor agradece ao CNPQ pelo apoio concedido por meio do Projeto de Nº 304083/2013–5.

7. REFERÊNCIAS

- ASTM E 466-96 (Reapproved 2002). Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials. New York: 2002, 05p.
- ASTM E8/E8M-11. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. New York: 2011, 27p.
- ASTM A833-08a. Standard Practice for Indentation Hardness of Metallic Materials by Comparison Hardness Testers. New York: 2008, 03p
- ASTM-E18 – 15. Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic materials. . New York: 2015, 38p
- ASTM E143-02. Standard Test Method for Shear Modulus at Room Temperature. New York: 2002, 05p.
- ASTM E112 - Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. 1996/2004.
- ASTM B 912–00. Standard Specification for passivation of stainless steels using electropolishing. B 912–00. Philadelphia, 2000.
- Bandara, C.S., Siriwardane, S.C., Dissanayake, U.I., Dissanayake, R. (2015). Full range S-N curves for fatigue life evaluation of steels using hardness measurements, *International Journal of Fatigue*.
- Billaudeau T, Nadot Y, Bezine G. (2004). Multiaxial fatigue limit for defective materials: mechanisms and experiments. *Acta Mater*, 52:3911–20.
- Dowling, N. E. (2007). *Mechanical Behaviour of materials*. Prentice Hall : NJ 2007 3.ed.
- Eifler, D., Macherauch, E. (1988): *Basic Mechanisms in Fatigue of Metals*, Proc. of Internat Colloq. Academia, Prague, 215.
- Mughrabi, H., Crhrst, H. J. (1997). Cyclic deformation and fatigue of selected ferritic and austenitic steels: Specific aspects. *ISIJ International*, 12:1154-1169.
- Murakami, Y., Endo T., (1980), Effects of small defects on fatigue strength of metals, *Int. J. Fatigue*, 0142:23-30.
- Murakami, Y., Endo, E. (1983). A Geometrical Parameter for the Quantitative Estimation of the Effects of Small Defects on Fatigue Strength of Metals, *Trans. Jpn. SOC. Mech. Eng. A*, 49(438).
- Murakami, Y., (2002), *Metal Fatigue: Effects of small defects and non-metallic inclusions*. UK. ELSEVIER. ISBN: 0-08-044064.
- Nasr, A., Nadot, Y., Bouraoui, Ch., Fathallah, R. (2017) Fatigue life assessment for material containing defects under multiaxial loading. *Metall. Res. Technol.* 114, 102. DOI: 10.1051/metall/2016060.
- SAE – Society of Automotive Engineers. (1989). *Multiaxial Fatigue. Analysis and Experiments*. AE-14. Gail E, Leese, Co-editor, MTS Systems Corporation. Darrel Socie, Co-editor, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Schönbauer, B.M., Yanase, k. Endo, M. (2016). The Influence of various types of small defects on the threshold behaviour of precipitation-hardened 17-4PH stainless steel, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*.
- Socie, D.F. e Marquis, G.B. (2000). *Multiaxial fatigue*, SAE International, 371p.
- Turner, B.; Ganti, S.; Sundar, V.; Davis, B. (2017). Three Dimensional Optical Microstructure Analysis of Ferrite and Pearlite Phases in a Medium Carbon Steel. *Microscopy Society of America. Microsc. Microanal.* 23 (Suppl 1).
- Yanase, K, Endo M. (2014). Multiaxial high cycle fatigue threshold with small defects and cracks. *Engng Fract Mech* (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2014.03.017>.
- Yanase, K. ASTM. (2013). A study on the multiaxial fatigue failure criterion with small defects. *Materials performance and characterization*, Vol. 2, No. 1. Paper ID MPC20130013.
- Susmel, L., Taylor, D. (2006). A simplified approach to apply the theory of critical distances to notched components under torsional fatigue loadin. *International Journal of Fatigue* 28: 417–430.
- Vincent, M., Nadot, Y., Nadot-Martin, C., Dragon, A. (2016). Interaction between a surface defect and grain size under high cycle fatigue loading: Experimental approach for Armco iron *International Journal of Fatigue* 87: 81–90.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

LIFE OF ESTIMATED TO FATIGUE FOR STEEL AISI 1045 TREFILATED AND STANDARDIZED WITH SMALL DEFECT

Hélio de Souza Queiroz, helio.queiroz@ueg.br^{1,2}
Edgar Nobuo Mamiya, mamiya@unb.br³

¹Department of Agricultural Engineering, Center for Exact Sciences and Technology, State University of Goiás - UEG, Anápolis, GO, Brazil

²University center of Anápolis – UniEVANGÉLICA, Department of Mechanical Engineering, Centro Universitário de Anápolis - UniEVANGÉLICA, Anápolis, GO, Brazil.

³University of Brasília – UnB, Department of Mechanical Engineering, Universidade de Brasília, 70910-900 Brasília, DF, Brazil.

Abstract: This paper addresses the fatigue life estimation for AISI 1045 steel in the presence of small surface defects. Axial and torsional fatigue curves were obtained by conducting experiments with high cycle torque and force control. The article discusses the macrographic behaviour of the initiation of the crack, emphasizing the influence of the small defect in the life to the fatigue. In order to estimate the life of the defective material, the influence of the defect size on the Basquin relationship was verified. In order to carry out the studies, axial and torsional loading histories were imposed on a set of specimens with artificial surface defects of cylindrical geometry with an average size of 500 and 700 μm .

Key words: superficial defects, axial and torsional fatigue, area root, formation / propagation of cracks