

METODOLOGIA QUE ACOPLA O PARÂMETRO
 \sqrt{area} COM MODELOS DE PLANO CRÍTICO
PARA ESTIMAR VIDA EM FADIGA NA
PRESENÇA DE MICRODEFEITOS

Hélio de Souza Queiroz

TESE DE DOUTORADO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS

FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓSGRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS

**METODOLOGIA QUE ACOPLA O PARÂMETRO \sqrt{area}
COM MODELOS DE PLANO CRÍTICO PARA ESTIMAR
VIDA EM FADIGA NA PRESENÇA DE MICRODEFEITOS**

Hélio de Souza Queiroz

ORIENTADOR: JORGE LUIZ DE ALMEIDA FERREIRA
COORIENTADOR: JOSÉ ALEXANDER ARAÚJO
TESE DE DOUTORADO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS
PUBLICAÇÃO: ENM.DM – dez/2023
BRASÍLIA/DF: DEZEMBRO/2023

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓSGRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS**

**METODOLOGIA QUE ACOPLA O PARÂMETRO \sqrt{area}
COM MODELOS DE PLANO CRÍTICO PARA ESTIMAR
VIDA EM FADIGA NA PRESENÇA DE MICRODEFEITOS**

TESE SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS MECÂNICAS.

APROVADA POR:

Prof. Jorge Luiz de Almeida Ferreira, Dr. (UnB/ENM)
(Orientador)

Prof. José Alexander Araújo, Dr. (UnB/ENM)
(Coorientador)

Prof. Fábio Comes de Castro, Dr. (UnB/ENM)
(Examinador Interno)

Prof. Marcelo Augusto Santos Torres, Dr. (UNESP/Guaratinguetá)
(Examinador Externo)

Prof. Raphael Araújo Cardoso, Dr. (DEM/CT/UFRN)
(Examinador Externo)

BRASÍLIA/DF, 01 DE DEZEMBRO DE 2023.

FICHA CATALOGRÁFICA

QUEIROZ, HÉLIO DE SOUZA

Título: Metodologia que acopla o parâmetro \sqrt{area} com modelos de plano crítico para estimar vida em fadiga na presença de microdefeito [Distrito Federal] 2023. 110p. 210x297mm (PPGCM/FT/Unb, Doutor, Ciências Mecânicas, 2023).

Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas.

- | | | |
|-----------------------|----------------------|--------------------|
| 1. ESTIMATIVA DE VIDA | 2. FADIGA MULTIAXIAL | |
| 3. MICRODEFEITO | 4. EXPERIMENTAL | 5. PLANOS CRÍTICOS |

I.ENM/FT/UnbII.Brasília

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

QUEIROZ, H.S., Metodologia que acopla o parâmetro \sqrt{area} com modelos de plano crítico para estimar vida em fadiga na presença de microdefeitos. Tese de Doutorado em Ciências Mecânicas. Publicação ENM.DM – Dez/2023, Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas, Universidade de Brasília – Faculdade de Tecnologia, Brasília, DF, 110p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: HÉLIO DE SOUZA QUEIROZ

TÍTULO: METODOLOGIA QUE ACOPLA O PARÂMETRO \sqrt{area} COM MODELOS DE PLANO CRÍTICO PARA ESTIMAR VIDA EM FADIGA NA PRESENÇA DE MICRODEFEITOS

GRAU: Doutor ANO: 2023

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa tese de doutorado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Hélio de Souza Queiroz

odatluser@gmail.com ou helio.queiroz@ueg.br

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus e a meus pais, Marcial Gomes de Souza (*in memoriam*) e Jandira Queiroz de Souza, pela minha vida. Agradeço a minha esposa Andréa Lúcio Queiroz e meus dois filhos Angel Christopher Lúcio Queiroz e Arthur Emmanuel Lúcio Queiroz pela presença e significado em minha vida. Agradeço ao universo por todas as dificuldades e desafios que foram colocados em meu caminho. Agradeço por todas as pessoas que direta ou indiretamente me apoiaram na minha jornada de vida. Agradeço a todos os professores que passaram pela minha vida, desde a infância na zona rural até os dias de hoje. Agradeço ao Prof. Elton Fialho pelo apoio no programa de mestrado na Universidade Estadual de Goiás. Sou muito grato à Faculdade de Tecnologia SENAI Roberto Mange (FATEC-RM) pelo apoio e ampliação de minha experiência profissional e acadêmica. Sou grato à Universidade Evangélica (UniEVANGÉLICA) pela oportunidade profissional junto à gestão do Curso de Engenharia Mecânica. Sou muito grato ao Prof. Edgar Mamiya pelo apoio e incentivo para iniciar como doutorando no programa de doutorado da Universidade de Brasília. Em particular, meus agradecimentos especiais aos professores Jorge Luiz e José Alexander pela orientação deste projeto de doutorado, a vocês meu respeito, admiração e eterna gratidão.

Assim agradeço por viver e vivenciar diferentes dores e alegrias.

Dedico este trabalho à minha esposa Andréa Lúcio Queiroz e aos meus dois filhos Angel Christopher Lúcio Queiroz e Arthur Emmanuel Lúcio Queiroz, principais motivações pela minha continuidade neste processo.

PUBLICAÇÕES REALIZADAS

- 1) **QUEIROZ, H. S.** et al. A coupled critical plane- \sqrt{area} methodology to estimate fatigue life for an AISI 1045 steel with small artificial defects. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v. 121, n. May, p. 103426, 2022. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2022.103426>

- 2) **QUEIROZ, H. S.**; MAMIYA, E. N. Estimativa de vida à fadiga para o aço AISI 1045 trefilado e normalizado com micro defeito. **Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM. Anais 2018**. Disponível em:
<http://www.sistema.abcm.org.br/articleFiles/download/15602>. Acesso em 20/08/2023.
DOI://10.26678/ABCM.CONEM2018.CON18-1511

- 3) ALVES, J.V.C.G.; ARAÚJO, F.A.V.; HONORATO, G.A.; DIAS, M.J.; RODRIGUES, R.F.N.; **QUEIROZ, H.S.** Termografia para determinação do limite de fadiga em aço de médio carbono. **Revista Processos Químicos**. v.14, n.28. pág. 94-107. Jul/dez de 2020. ISSN-1981-8521. Disponível em:
http://ojs.rpqsenai.org.br/index.php/rpq_n1/article/view/606/522
DOI:<https://doi.org/10.19142/rpq.v14i28.606>.

RESUMO

METODOLOGIA QUE ACOPLA O PARÂMETRO \sqrt{area} COM MODELOS DE PLANO CRÍTICO PARA ESTIMAR VIDA EM FADIGA NA PRESENÇA DE MICRODEFEITOS

Autor: Hélio de Souza Queiroz

Orientador: Jorge Luiz de Almeida Ferreira

Coorientador: José Alexander Araújo

Departamento de Engenharia Mecânica

Brasília, 01/12/2023

Em projetos de estruturas e componentes mecânicos é comum a presença de entalhes, rasgos, furos, cavidades, inclusões e riscos que na presença de carregamentos cíclicos podem influenciar sua resistência e vida a fadiga. Esta tese tem como objetivo propor uma metodologia para estimativa de curvas ‘SN’ para componentes com microdefeito e utilizá-las para calibrar modelos de plano crítico para estimar vida à fadiga multiaxial. A abordagem do trabalho é formulada baseada em uma estratégia de calibração para os modelos de Fatemi-Socie, Smith-Watson-Topper e Susmel e Lazzarin. A metodologia proposta utiliza os critérios de Murakami, uma estratégia de Bandara et al., propriedades estáticas do material e fator de entalhe para computar o efeito do microdefeito. Os resultados obtidos foram comparados e validados com dados experimentais e também corroborados com dados da literatura para diferentes aços e liga de alumínio, mostrando ser uma estratégia promissora. Curvas SN de tração-compressão e torção alternada foram estimadas com variações de amplitude de tensão inferiores a 20%, incluindo diferentes materiais e carregamentos, permitindo utilizar estas curvas para calibrar modelos multiaxiais. Dentre os resultados multiaxiais na presença de microdefeitos destaca-se o modelo de Susmel e Lazzarin (MCWM) que apresentou 92% das estimativas de vida dentro de 2 bandas e de 100% dentro da banda de 3 desvios.

ABSTRACT

A COUPLED CRITICAL PLANE MODELS - \sqrt{area} PARAMETER METHODOLOGY TO ESTIMATE FATIGUE LIFE IN THE PRESENCE OF MICRODEFECTS

Author: Hélio de Souza Queiroz

Advisor: Jorge Luiz de Almeida Ferreira

Co-advisor: José Alexander Araújo

Mechanical Engineering Department

Brasília, December 01/2023.

In the design of structures and mechanical components, the presence of notches, grooves, holes, cavities, inclusions, and scratches is common. Under cyclic loading, these factors can significantly influence both the strength and fatigue life of the components. This thesis proposes a methodology to estimate 'SN' curves for components with microdefects and employs them to calibrate critical plane models for the assessment of multiaxial fatigue life. The approach of this work is formulated based on a calibration strategy for the Fatemi-Socie, Smith-Watson-Topper, and Susmel and Lazzarin models. The proposed methodology incorporates Murakami criteria, a strategy from Bandara et al., static material properties, and a notch factor to quantify the impact of microdefects. The obtained results were compared, validated with experimental data, and corroborated with literature data for various steels and aluminum alloys, demonstrating its promising efficacy. Tensile-compression and alternating torsion 'SN' curves were estimated with stress amplitude variations below 20%, covering diverse materials and loadings. This enables the utilization of these curves to calibrate multiaxial models. Notably, among the multiaxial results in the presence of microdefects, the Susmel and Lazzarin model (MCWM) stands out, with 92% of life estimates falling within 2 bands and 100% within the 3-standard deviation band.

SUMÁRIO

Descrição	Pág.
1. INTRODUÇÃO	18
1.1 Apresentação do problema	18
1.2 Motivação para realização da pesquisa	19
1.3 Objetivos e estratégias	22
1.4 Estrutura do texto	23
2. ESTUDOS DISPONÍVEIS NA LITERATURA PARA ANÁLISE DE FADIGA EM MATERIAIS COM MICRODEFEITO	25
3. METODOLOGIA PROPOSTA PARA ESTIMATIVA DAS CURVAS ‘SN’ PARA COMPONENTES COM MICRODEFEITO ...	31
3.1 Critério para estimativa da vida N_0	34
3.2 Aplicação da vida N_S como 10^3 ciclos e aproximação entre as amplitudes de tensão σ_s e σ'_s	36
3.3 Propriedades Mecânicas utilizadas na metodologia proposta para previsão de vida em materiais microdefeituosos	37
3.4 Fluxograma da metodologia proposta para estimar a curva SN	37
3.5 Validação da metodologia para previsão das curvas de fadiga em componentes microdefeituosos	39
3.5.1 Validação da metodologia proposta utilizando dados da literatura	39
3.5.2 Métodos e estratégia de análise para validação experimental	43
3.5.3 Procedimentos experimentais	48
3.5.4 Apresentação e discussão dos resultados experimentais	54
3.5.5 Validação da metodologia proposta utilizando dados experimentais ...	59
4. ESTRATÉGIA PROPOSTA PARA ESTIMATIVA DE VIDA À FADIGA EM MATERIAIS COM MICRODEFEITOS SOB CONDIÇÕES DE CARREGAMENTO MULTIAXIAL	64
4.1 Modelos de previsão de vida à fadiga	64
4.1.1 Modelo de Fatemi e Socie (FS)	64
4.1.2 Modelo de Smith, Watson e Topper (SWT)	65
4.1.3 Modelo de Susmel e Lazzarin (MCWM)	66
4.2 Implementação do Modelo não local	67
4.3 Experimentos de fadiga multiaxial	68
4.4 Calibração dos modelos multiaxiais	69

4.4.1	Resultados da calibração dos modelos de Fatemi-Socie (FS), Smith-Watson-Topper (SWT) e Susmel e Lazzarin (MCWM)	69
4.5	Validação do método para as condições multiaxiais	73
4.6	Discussões gerais	75
5.	CONCLUSÕES	78
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	80
7.	APÊNDICES (A, B, C, D, E)	81
	REFERÊNCIAS	102

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Propriedades estáticas dos materiais da literatura utilizados para estimativas de curvas SN com espécimes com microdefeitos.	40
Tabela 2 - Propriedades cíclicas dos materiais da literatura utilizados para estimativas de curvas SN ($S_a = AN_f^B$) com espécimes com microdefeitos.	41
Tabela 3 - Relação dos corpos de prova, tipo de ensaio e tipo de defeitos utilizados nos experimentos.	46
Tabela 4 - Propriedades mecânicas monotônicas e dureza experimentais.	49
Tabela 5 - Constantes material de fadiga para curvas experimentais de Wöhler dos espécimes entalhados sob carregamentos de tração-compressão e torção totalmente reversas.	56
Tabela 6 - Valores empíricos e experimentais dos limites de fadiga axial e torcional do material.	58
Tabela 7 - Estimativa das resistências à fadiga em 10^6 e 10^7 Ciclos por Extrapolação.	59
Tabela 8 - Valores estimados para resistência à fadiga de referência (MPa).	59
Tabela 9 - Fator de entalhe à fadiga, k_f	60
Tabela 10 - Fator de entalhe à fadiga em 10^3 ciclos, k'_f	60
Tabela 11 - Precisão na previsão da resistência à fadiga para os espécimes com microdefeitos.	61
Tabela 12 - Ensaio de fadiga para espécimes lisos e microdefeituosos sob carregamento combinado axial-torcional em fase e $\lambda = 1$ ($\tau_a = \sigma_a$) [MPa].	69
Tabela 13 - Valores estimados dos Parâmetros do modelo de Fatemi-Socie.	70
Tabela 14 - Valores estimados dos Parâmetros do modelo de Smith-Watson-Topper.	71
Tabela 15 - Tabela resumo com os valores necessários para estimar os Parâmetros $A_{\rho(\theta,\phi)_{crit}}$ e $b_{\rho(\theta,\phi)_{crit}}$ do Modelo de Susmel e Lazzarin a partir dos dados de fadiga.	72
Tabela A1 - Dados experimentais obtidos na literatura para estimativa de curvas SN de espécimes de aço carbono com microdefeitos (Aço SAE 1045).	81
Tabela A2 - Dados experimentais obtidos na literatura para estimativa de curvas SN de espécimes com microdefeitos (Alumínio 6201-T81).	82
Tabela A3 - Dados experimentais obtidos na literatura para aplicação complementar da metodologia proposta para estimativa de curvas SN de espécimes com microdefeitos (Aço SAE 1020).	83
Tabela A4 - Dados experimentais obtidos na literatura para aplicação complementar da metodologia proposta para estimativa de curvas SN de espécimes com microdefeitos (Alumínio 6201-T81).	84

Tabela A5 - Dados experimentais obtidos na literatura para aplicação complementar da metodologia proposta para estimativa de curvas SN de espécimes com microdefeitos (aço C35).	85
Tabela A6 - Dados experimentais obtidos na literatura para aplicação complementar da metodologia proposta para estimativa de curvas SN de espécimes com microdefeitos (Aço Maraging).	86
Tabela C1 - Resumo das principais dimensões, em valores médios, dos microdefeitos produzidos artificialmente para cada tipo de ensaio.	91

Lista de Figuras

Figura 1 - Ilustração de aplicações onde a presença de microdefeitos podem iniciar trincas e promover falha por fadiga, sendo a) e b) adaptados de (ARAUJO et al., 2019); e c), d) e) adaptados de (SUN et al., 2020) e (TECHNOLOGY; SAUSE; JASIŪNIENĖ, 2022).	20
Figura 2 - Ilustração de microdefeitos superficiais em pista de rolamento, onde Fig. a) apresenta microdefeitos da ordem de 500 μm em rolamento autocompensador de rolo submetido a uma corrente elétrica excessiva e Fig. b) mostra erosão na pista e na esfera de um típico rolamento rígido de esferas (SKF, 2017).	21
Figura 3 - Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) em estudos de fadiga na presença de microdefeitos artificiais cilíndricos simples e duplo (imagens do próprio autor).	21
Figura 4 - Síntese de bibliometria de pesquisa científica (somente artigos de pesquisa e artigos de revisão) disponível na base de dados da <i>ScienceDirect</i> utilizando os operadores booleanos <i>OR</i> , <i>AND</i> , <i>NOT</i> entre as palavras-chave <i>small defect</i> , <i>microdefect</i> , <i>numerical simulation</i> , <i>fatigue</i>	22
Figura 5 - Efeito de entalhe e/ou microdefeitos para vidas curtas e intermediárias	33
Figura 6 - Fluxograma resumindo o procedimento para obtenção dos 2 pontos estratégicos para estimar a curva SN.	38
Figura 7 - Aplicação da metodologia proposta para avaliação do comportamento de dados experimentais obtidos na literatura considerando a relação entre as amplitudes de tensão estimada e aplicada.	42
Figura 8 - Aplicação da metodologia proposta para avaliação do comportamento de dados experimentais obtidos na literatura considerando a relação entre a vida estimada e a vida experimental.	42
Figura 9 - Dimensões da seção útil dos corpos de prova e detalhamento da geometria do microdefeito.	44
Figura 10 - Corpos de prova utilizados nos experimentos.	45
Figura 11 - Ilustração: a) tamanho dos microdefeitos artificiais; b) imagem MEV de microdefeito c) imagem de microscopia confocal a laser de microdefeito; d) máquina de eletroerosão utilizada na fabricação dos microdefeitos e) fotografia de um espécime microdefeituoso.	47
Figura 12 - Curva experimental de ensaio de tração monotônica com e sem extensômetro. Imagem de espécime com fratura tipo taça-cone.	48
Figura 13 - Curva experimental de ensaio de torção monotônica com e sem extensômetro.	49
Figura 14 - Equipamento tipo durômetro utilizado nas medições de dureza: a) Penetrador e suporte de apoio das amostras e b) Durômetro digital Rockwell – Fabricante Mitutoyo.	50
Figura 15 - Recomendação da ASTM para espaçamento mínimo entre indentações em ensaios de dureza Rockwell. Fonte: ASTM E 18-15.	50

Figura 16 - Imagens da microestrutura do aço AISI 1045 trefilado, normalizado e eletropolido a) microscopia MEV e b) microscopia confocal a laser.	52
Figura 17 - (a) Equipamento utilizado para realização dos ensaios de fadiga, (b) e c) corpos de prova fraturados após ensaio.	53
Figura 18 - Comportamento experimental do material liso - aço AISI 1045.	55
Figura 19 - Diagramas de Wöhler para espécimes lisos e microdefeituosos obtidos por (a) tração-compressão totalmente reversa e (b) torção totalmente reversa (QUEIROZ et al., 2022).	57
Figura 20 – Dados experimentais para o aço AISI 1045 ilustrando o efeito da presença dos microdefeitos no fator de entalhe à fadiga variando com a vida (QUEIROZ et al., 2022).	57
Figura 21 - Comportamento dos dados experimentais tração-compressão diante das curvas estimadas por 2 pontos (QUEIROZ et al., 2022).	62
Figura 22 - Comportamento dos dados experimentais de torção alternada diante das curvas estimadas por 2 pontos (QUEIROZ et al., 2022).	63
Figura 23 - Ilustração da base física para o modelo de Fatemi-Socie.	65
Figura 24 - Ilustração da base física para o modelo de Smith-Watson-Topper.	66
Figura 25 - Representação esquemática da calibração da Curva de Wöhler Modificada e aplicação do método não local baseado no critério do plano crítico para previsão de vida de componentes com pequenos defeitos (QUEIROZ et al., 2022).	68
Figura 26 - Comportamento da vida à fadiga multiaxial com relação ao Parâmetro FS. Pontos (cheios) e linhas (pontilhadas) verdes representam valores estimados para vida e pontos (cheios) roxos representam valores para vida à fadiga multiaxial experimental e linhas (cheias) roxas a banda de incerteza $\pm 15\%$	70
Figura 27 - Comportamento da vida à fadiga multiaxial com relação ao Parâmetro SWT. Pontos (cheios) e linhas (pontilhadas) verdes representam valores estimados para vida e pontos (cheios) roxos representam valores para vida à fadiga multiaxial experimental e linhas (cheias) roxas bandas de incerteza de $\pm 15\%$	71
Figura 28 - Comportamento da vida à fadiga multiaxial com relação aos Parâmetros do modelo MCWM. Pontos (cheios) e linhas (pontilhadas) verdes representam valores estimados para vida e pontos (cheios) roxos representam valores para vida à fadiga multiaxial experimental e linhas (cheias) roxas bandas de incerteza $\pm 15\%$	73
Figura 29 - Vidas estimadas versus observadas obtidas por meio dos critérios multiaxiais: a) Smith-Watson-Topper; b) Fatemi-Socie e c) Susmel e Lazzarin calibrados utilizando a estratégia proposta nesta tese.	74
Figuras B1 a B6 - Aplicação da metodologia proposta para estimar uma curva SN para os materiais e carregamentos disponível na literatura (Apêndice B).	87
Figuras D1 a D3 - Ilustrações referente ao processo de eletropolimento aplicado nos corpos de prova (Apêndice D).	92
Figuras E1 a E23 - Imagens das regiões de falha dos corpos de prova com e sem microdefeitos (Apêndice E).	95

Lista de símbolos, siglas e abreviaturas

Símbolo/Abreviatura	Descrição
A	coeficiente de fadiga
A_{FS}, b_{FS}	coeficiente e expoente de fadiga para o modelo de Fatemi-Socie
A_{SWT}, b_{SWT}	coeficiente e expoente de fadiga para o modelo de Smith, Watson e Topper
$A_{\rho(\theta,\phi)_{crit}}, b_{\rho(\theta,\phi)_{crit}}$	coeficiente e expoente de fadiga para o modelo de Susmel e Lazzarin
B, b	expoente de fadiga
$\sqrt{\text{area}}$	parâmetro raiz de área
C_{σ}, C_{τ}	constante da equação de Murakami para caracterizar defeito interno e superficial em estudos de fadiga axial e torcional
C_1, C_2	constantes relacionadas ao tipo de defeito (interno ou superficial)
E, G	módulo de Young e módulo de elasticidade cisalhante
FS	modelo de Fatemi-Socie
fd	Fator dúctil - frágil
Gross área	área total da seção (desconsiderando o defeito)
HCF	alto número de ciclos
HV	dureza Vickers
HRB	dureza Rockwell B
K'_f	fator de entalhe em fadiga em 1000 ciclos
K_f	fator de entalhe em fadiga na condição de vida de referência (N_0)
MWCM	modelo de Susmel-Lazzarin
N_f	número de ciclos para falha
N_s	vida em 10^3 ciclos
N_0	vida de transição entre médio e alto número de ciclos
Net área	área útil da seção (considerando o defeito)
OR, AND, NOT	operadores booleanos
P_{FS}	parâmetro do modelo de Fatemi-Socie
P_{SWT}	Parâmetro do modelo de Smith, Watson e Topper
q'_{1000}	fator de sensibilidade em fadiga para 1000 ciclos
Ra	rugosidade superficial média (μm)

R	razão de tensão
RA	redução de área
S_a	amplitude de Tensão
SN	curva de fadiga de Wölher
SWT	modelo de Smith-Watson-Topper
σ_0, σ'_0	tensão limite de fadiga (ou amplitude de tensão de transição entre médio e alto número de ciclos) para material microdefeituoso e liso
σ_S, σ'_S	tensão limite de fadiga em 10^3 ciclos para material microdefeituoso e liso
τ_S, τ'_S	tensão limite de fadiga torcional em 10^3 ciclos para material microdefeituoso e liso
σ_a, τ_a	amplitude de tensão axial e torcional
σ_{ag}, τ_{ag}	amplitude de tensão normal e cisalhante referente a seção bruta
σ_u, S_u	limite de resistência estática
σ_y, τ_y	tensão limite de escoamento à tração e torção estáticas
σ_{plain}	Amplitude tensão aplicada em espécimes lisos
$\sigma_{microdefect}$	Amplitude tensão aplicada em espécimes microdefeituosos
σ_{mod}	Amplitude de tensão estimada pelo modelo proposto
σ_{exp}	Amplitude de tensão observada experimentalmente
$\sigma_n^{max}, \sigma_{n,max}$	tensão normal máxima
$\sigma_{1,a}$	Amplitude de tensão principal
ω	frequências de carregamento
λ	razão de amplitude de tensão normal e cisalhante referente a seção bruta
κ	parâmetro material aplicado ao modelo de Fatemi-Socie para demonstrar a influência da tensão normal
ν	coeficiente de Poisson
ρ	grau de multiaxialidade para o modelo de Susmel e Lazzarin
$(\theta, \phi)_{crit}$	coordenadas do plano crítico

1. INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação do problema

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 e 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.

A presença de um defeito ou irregularidade em uma peça ou componente mecânico apresenta deformações plásticas acumuladas em seu entorno devido a carregamentos cíclicos que evoluem para bandas persistentes de discordâncias, podendo posteriormente levar a nucleação de trincas curtas, podendo ou não se propagar de acordo com as condições limiares do defeito.

Os processos de fabricação e operação dos componentes mecânicos podem gerar defeitos tipo inclusões, porosidades, cavidades e riscos que em determinadas condições apresentam influência significativa na resistência e vida à fadiga. A influência desses pequenos defeitos constitui problema de grande interesse do segmento científico e industrial, como caracterizado, por exemplo, nos estudos e abordagens disponíveis em (BONNERIC et al., 2021; DARRELL SOCIE & GARY MARQUIS, 1999; DIAS; BEMFICA; CASTRO, 2022; MOREL; MOREL; NADOT, 2009; MU et al., 2014a; MURAKAMI; ELSEVIER, 2002; MURAKAMI; ENDO, 1980; QUEIROZ et al., 2022; SCHÖNBAUER; MAYER, 2019).

Os estudos envolvendo fadiga axial, torcional e multiaxial na presença de defeitos, trincas e entalhes utilizam propriedades e características como: dureza, tensão de escoamento, limite de resistência (BANDARA et al., 2016; MURAKAMI; ELSEVIER, 2002) amplitude de tensão cisalhante, amplitude de tensão normal (DARRELL SOCIE & GARY MARQUIS, 1999), fator de intensidade de tensão, fator de concentração de tensão à fadiga (BILLAUDEAU; NADOT; BEZINE, 2004), tamanho do defeito (CASTRO; MAMIYA; BEMFICA, 2021; DIAS; BEMFICA; CASTRO, 2022; VINCENT et al., 2016) distância crítica da raiz do entalhe (MARTÍNEZ et al., 2019; SUSMEL; TAYLOR, 2006) e gradiente de tensão na vizinhança do defeito (NADOT; BILLAUDEAU, 2006; NASR et al., 2017). Os resultados já produzidos predominam com ênfase em resistência à fadiga, ainda

com oportunidades e lacunas para previsão de vida à fadiga em condições de carregamento multiaxial na presença de pequenos defeitos.

1.2 Motivação para realização da pesquisa

A motivação deste trabalho consiste em estudar a ocorrência de falha por fadiga na presença de microdefeitos. Os diferentes tipos de processos de fabricação, operação e manutenção de máquinas, equipamentos e estruturas podem gerar pequenos defeitos, que submetidos a determinadas condições de carregamento podem potencializar a inicialização e propagação de trincas de fadiga.

Os microdefeitos normalmente com dimensões inferiores a 1000 μm (calculado pelo parâmetro $\sqrt{\text{área}}$ de Murakami), não respondem bem às teorias clássicas para caracterizar entalhes e defeitos de dimensões superiores a este valor, para os quais o fator de intensidade de tensão limite é uma propriedade do material, não sofrendo variação em função das características do defeito. Nesses casos, métodos e técnicas que permitam estimar vida à fadiga na presença desses microdefeitos tornam-se ferramentas de interesse científico e industrial.

Desde o século passado milhares de pesquisas foram realizadas buscando compreender e quantificar o efeito de pequenos defeitos em componentes submetidos a carregamentos de fadiga. Atualmente os processos de fabricação, montagem e manutenção utilizam de técnicas e recursos para monitorar e prever a presença de defeitos internos e externos com objetivo de evitar falhas inesperadas em máquinas, equipamentos e estruturas.

A literatura ainda não apresenta e/ou não identificamos uma metodologia simplificada, de baixo custo e prática que pudesse prever com eficácia a vida à fadiga em condições corriqueiras de projetos de engenharia, sem demandar por equipamentos sofisticados de laboratório e softwares avançados de simulações. Diante deste cenário, nos motivamos a estudar e propor um método simples, mas eficaz, para prever vida à fadiga utilizando propriedades estáticas dos materiais juntamente com modelos empíricos já validados pela comunidade científica.

Na Figura 1 pode-se observar casos onde microdefeitos internos e externos podem influenciar em falhas de fadiga, sendo relevante considerar uma abordagem baseada na tolerância à presença do defeito. Esses exemplos consideram defeitos internos de porosidade

em eixo fundido de gerador termoelétrico fabricado em aço liga DIN 34CrNiMo6 (imagens ‘a’ e ‘b’). Mostra também a presença de bolhas de porosidade externa em material compósito e *pitting* de corrosão em ligas de titânico presente em equipamentos aeroespaciais (imagens ‘c’, ‘d’ e ‘e’), representam esquema de monitoramento de aeronave para detecção de microdefeitos tipo bolhas de porosidade em material compósito tipo polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP) em e) e *pitting* de corrosão de TiN/Ti em d).

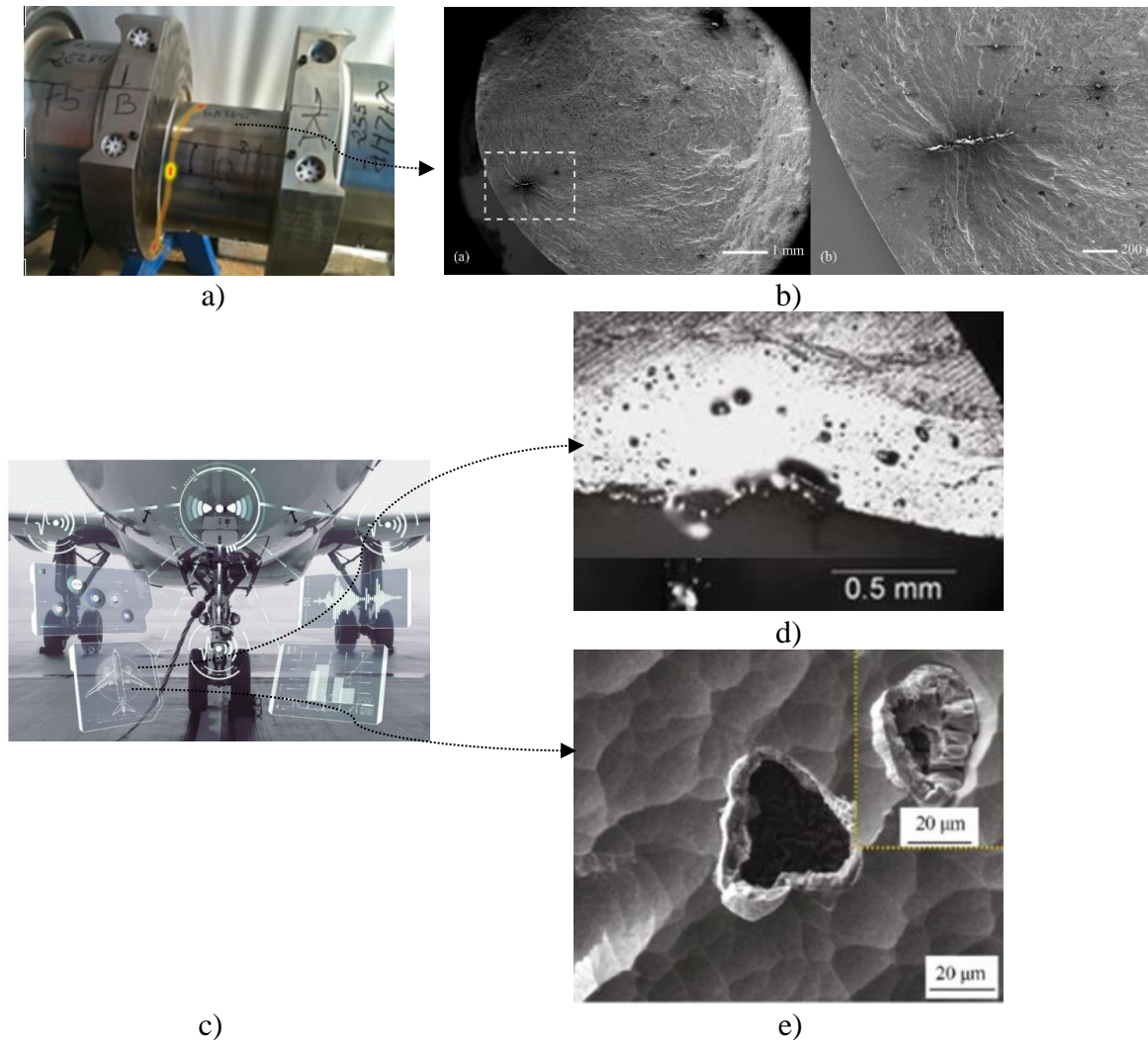


Figura 1 - Ilustração de aplicações onde a presença de microdefeitos podem iniciar trincas e promover falha por fadiga, sendo a) e b) adaptados de (ARAUJO et al., 2019); e c), d) e e) adaptados de (SUN et al., 2020) e (TECHNOLOGY; SAUSE; JASIŪNIENĖ, 2022).

Na Figura 2 observa-se exemplos de microdefeitos gerados artificialmente para realização de estudos de resistência à fadiga em pista de rolamento (SKF, 2017), caracterizando interesse industrial nesta abordagem. Já na Figura 3 ilustramos imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) em estudos de fadiga realizados em espécimes

microdefeituosos de aço AISI 1045 trefilado. Nestas imagens pode-se observar as características de falha deste material para carregamentos multiaxial não-proporcional e torção totalmente reversa.



Figura 2 - Ilustração de microdefeitos superficiais em pista de rolamento, onde a) apresenta microdefeitos da ordem de 500 µm em rolamento autocompensador de rolo submetido a uma corrente elétrica excessiva e b) mostra erosão na pista e na esfera de um típico rolamento rígido de esferas (SKF, 2017).

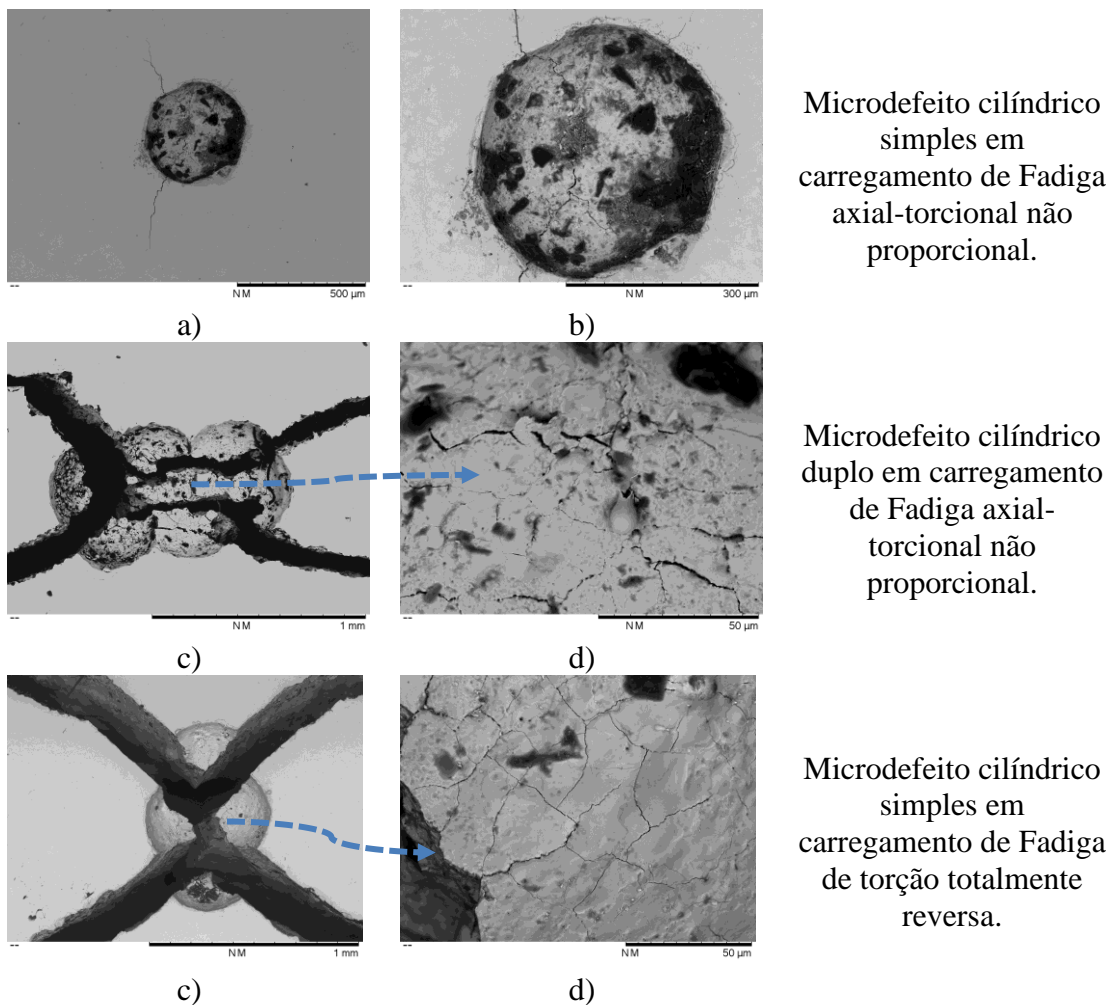


Figura 3 - Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) em estudos de fadiga na presença de microdefeitos artificiais cilíndricos simples e duplo (imagens do próprio autor).

Para exemplificar a importância e interesse da comunidade científica em pesquisas referentes ao tema estudado neste projeto, a Figura 4 apresenta uma síntese simplificada de bibliometria científica disponível na literatura na base de dados da *ScienceDirect*, entre os anos de 1970 a março/2023. Os números apresentados na Figura 4 referem-se somente à publicação de artigos científicos classificados como artigos de revisão e artigos de pesquisa, não considerando aqui as diversas outras formas de publicações científicas disponíveis nesta base. Foram consideradas as seguintes palavras-chave: ("small defect" OR microdefect) AND/NOT ("numerical simulation") AND fatigue. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/>, acessado em 18/03/2023.

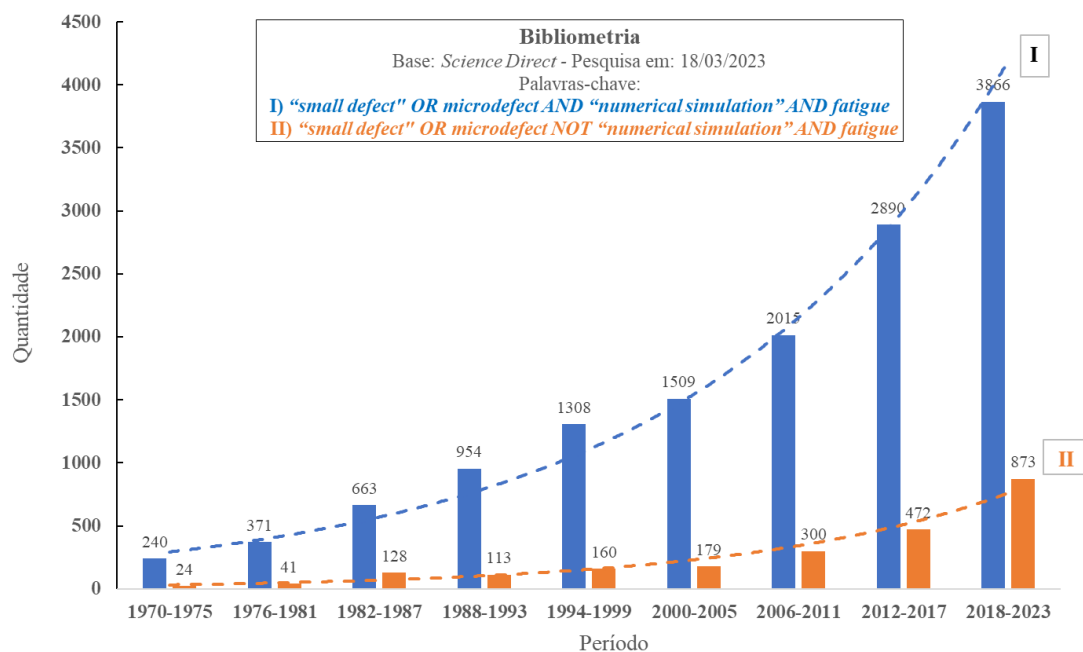


Figura 4 – Síntese de bibliometria de pesquisa científica (somente artigos de pesquisa e artigos de revisão) disponível na base de dados da *ScienceDirect* utilizando os operadores booleanos *OR*, *AND*, *NOT* entre as palavras-chave *small defect*, *microdefect*, *numerical simulation*, *fatigue*.

A motivação principal para esta tese consiste em elaborar, propor e validar uma metodologia simples e eficaz que contribua com estudos e projetos de componentes mecânicos submetidos à carregamentos axiais, torcionais e axial-torcional na presença de pequenos defeitos. Assim, suprimindo uma lacuna ainda existente para prever curvas SN que permitam calibrar modelos multiaxiais para materiais microdefeituosos.

1.3 Objetivos e estratégias

Neste contexto, esta tese tem como **objetivo** principal desenvolver uma metodologia para estimar vida à fadiga para materiais microdefeituosos.

Destacando duas estratégias principais:

- ✓ Propor uma metodologia para estimar curva SN para componentes com microdefeito;
- ✓ Apresentar uma estratégia para estimativa de vida à fadiga em materiais com microdefeitos sob condições de carregamento multiaxial.

E três estratégias secundárias:

- ✓ Validar a metodologia proposta de estimativa da curva SN para materiais microdefeituosos utilizando dados da literatura e experimentais próprios;
- ✓ Caracterizar através de ensaios experimentais curvas de fadiga axial, torcional e axial-torcional proporcional para o aço AISI 1045 trefilado, normalizado e eletropolido, incluindo espécimes lisos e com microdefeitos artificiais superficiais;
- ✓ Validar a metodologia proposta para estimativa de vida à fadiga em material com microdefeito submetido à carregamentos multiaxiais.

1.4 Estrutura do texto

O presente documento apresenta os estudos teóricos e experimentais realizados considerando o aço AISI 1045 trefilado, normalizado e eletropolido, incluindo corpos de prova lisos e com microdefeitos. Para atender os dois objetivos centrais do projeto que se referem, primeiro a proposição e validação de uma metodologia para estimar curvas SN de materiais microdefeituosos e segundo, estabelecer uma estratégia para calibrar modelos multiaxiais utilizando as curvas SN propostas. Para isso, também foram utilizados dados experimentais da literatura referentes a outros materiais, carregamentos e diferentes tipos e tamanhos de defeitos. O texto está organizado da seguinte forma: O capítulo 1 apresenta a introdução incluindo a problemática, a motivação, os objetivos e a estrutura do texto para elaboração e realização do projeto. No capítulo 2 é apresentado uma síntese de revisão da literatura com indicações de análise de fadiga em materiais com microdefeito. No capítulo 3 é apresentada a metodologia para obtenção das curvas aproximadas de fadiga axial e

torcional para estimativa de vida à fadiga em materiais com microdefeitos. Neste capítulo 3 é detalhada a abordagem dada aos dados experimentais da literatura e também aos dados experimentais próprios, incluindo a aplicação e validação da metodologia proposta para previsão de curva de fadiga para componentes microdefeituosos. No capítulo 4 é apresentada a estratégia proposta para estimativa de vida à fadiga em materiais com microdefeitos sob condições de carregamento multiaxial. Neste capítulo 4 são detalhados os três modelos multiaxiais de previsão de vida utilizados neste projeto, mostrando sua implementação, calibração e validação para materiais microdefeituosos. Neste capítulo 4 também são apresentadas as discussões gerais dos resultados obtidos. No capítulo 5 são apresentadas as conclusões da tese e no capítulo 6 são destacadas sugestões para trabalhos futuros visando ampliar as possibilidades de aplicação da metodologia proposta neste projeto. Após o tópico das referências bibliográficas são disponibilizados apêndices com curvas de fadiga individuais estimadas para os dados experimentais da literatura, além de tabelas com informações sobre as medições geométricas dos microdefeitos e imagens ilustrativas de corpos de prova fraturados por fadiga axial, torcional e axial-torcional.

2. ESTUDOS DISPONÍVEIS NA LITERATURA PARA ANÁLISE DE FADIGA EM MATERIAIS COM MICRODEFEITO

A presença de entalhes, rasgos, furos, cavidades, inclusões e riscos são bastante comuns em componentes mecânicos podendo apresentar gradientes de tensão e influenciar significativamente a resistência e a vida em fadiga de peças presentes em projetos de máquinas e estruturas submetidas à carregamentos cíclicos.

A presença desses microdefeitos em componentes de máquinas e equipamentos submetidos a carregamentos cíclicos podem surgir durante os processos de fabricação, montagem ou operação destes componentes, tornando relevante o estudo de sua influência na especificação de sua vida útil (DOWLING, 2013; DUNNE, 2014; YANASE; ENDO, 2014). Os componentes que apresentam estes pequenos defeitos, quando submetidos a carregamentos complexos podem promover a iniciação e propagação prematura de trincas. Dependendo da história de carregamento e das condições limiaries, falhas repentinas podem ocorrer, promovendo perdas econômicas e muitas vezes vidas de seres humanos (DARRELL SOCIE & GARY MARQUIS, 1999).

Em pesquisas que remontam décadas vem sendo realizados estudos utilizando propriedades mecânicas estáticas ou quase estáticas para previsão de resistência à fadiga. Para materiais com defeito destaca-se inicialmente as pesquisas de Murakami e Endo (MURAKAMI; ELSEVIER, 2002; MURAKAMI; ENDO, 1980) que a partir da mecânica da fratura linear elástica associaram o fator de intensidade de tensão, tensão limite de resistência à fadiga e tamanho do defeito (\sqrt{area}) com a propriedade de dureza Vickers (HV) do material.

Desde a década de 70 importantes pesquisas têm sido realizadas considerando o efeito de entalhes e microdefeitos na resistência à fadiga, principalmente estudos com materiais metálicos. Após realização de diversos experimentos de fadiga axial e torcional Murakami e Endo (ENDO; MURAKAMI, 1987; MURAKAMI; ELSEVIER, 2002; MURAKAMI; ENDO, 1983, 1994) quantificaram o impacto do tamanho dos microdefeitos sobre o limite de fadiga uniaxial de aços por meio de um parâmetro geométrico denominado de raiz quadrada de área - \sqrt{area} . Este parâmetro tem sido utilizado em diversos estudos e projeto de componentes contra fadiga, inclusive sob carregamentos multiaxiais (MACHADO et al., 2020; YANASE; ENDO, 2014).

Estudos realizados por Murakami (MURAKAMI, 2012) apresentam fundamentos

para realização de projetos de componentes que contemplam carregamentos de fadiga na presença de pequenos defeitos. Ele considera as propriedades de dureza Vickers, limite de resistência à tração, tamanho de grão e o parâmetro \sqrt{area} , mostrando que defeitos superficiais e internos (porosidade e inclusões) podem influenciar significativamente tanto a resistência quanto à vida à fadiga.

Estudos por Li et al., (LI et al., 2014) realizados com um aço mola SUP7-T450 envolvendo pequenos defeitos superficiais de processo de retificação e microdefeitos internos devido a microestrutura interna não homogênea estimou vida em fadiga de alto ciclo (HCF) e de ultra alto ciclo (VHCF). Esta pesquisa realizou ensaios de fadiga axial e flexão rotativa, apresentando estimativas de vida utilizando modelos linear e não linear para curva S-N adaptando os modelos de Murakami envolvendo mecânica da fratura linear e uma forma diferenciada para estimar o parâmetro raiz de área $\sqrt{area_{sur-d}}$. Os estudos mostraram que do ponto de vista de distribuição do defeito, superfície e interior, as probabilidades de falhas são equivalentes. Se o tamanho do defeito interno for menor ou igual ao tamanho do defeito da superfície, a falha induzida pelo defeito superficial se tornará o modo predominante, mesmo no regime VHCF, principalmente sob flexão rotativa.

Os pesquisadores Mu et al., (MU et al., 2014a) envolvendo um conjunto de microdefeitos superficiais com diferentes tamanhos (200, 400 e 840 μm) e diferentes distâncias entre estes defeitos (200 a 840 μm) realizaram estimativas de vida à fadiga. Foi considerado e adaptado o critério de Crosland, estimando uma tensão equivalente e uma combinação linear com a amplitude do 2º invariante do tensor desviador ($J_{2,a}$) e máxima tensão hidrostática ($J_{1,max}$). O material investigado foi uma liga de alumínio CAST AS7G06-T6 sob carregamentos multiaxiais. Utilizou-se curva de Basquin para modelar as curvas S-N e foi apresentada uma nova definição de tamanho de defeito equivalente para um conjunto de defeitos complexos sob fadiga axial. As estimativas de resistência e vida à fadiga foram inferiores a 15%.

Estudos realizados com a liga de alumínio A356-T6 (NOURIAN-AVVAL; FATEMI, 2021) produzida por fundição de alta pressão (HPDC) utilizaram o parâmetro SWT combinado com técnicas estatísticas para estimar o tamanho máximo da porosidade para prever a iniciação de trincas e a vida em fadiga multiaxial. Da mesma forma, Sanaei e Fatemi (SANAEI; FATEMI, 2021) apresentaram uma estrutura computacional usando a equação de Paris generalizada e a variante Hartman-Schijve da equação NASGRO para

prever a vida à fadiga de corpos de prova de aço inoxidável L-PBF Ti-6Al-4V e 17-4PH. Neste estudo, o método de Murakami foi considerado com técnicas estatísticas para estimar um tamanho de defeito equivalente.

A literatura mostra que existe uma grande diversidade de modelos e critérios para previsão de resistência e vida à fadiga multiaxial, dentre eles destacam-se: critérios de Sines (SINES, 1959), Findley (FINDLEY, 1956), McDiarmid (MCDIARMID, 1991), Dang Van (DANG VAN et al., 1989), Morrow (FELTNER C. AND MORROW J, 1961), Garud (GARUD, 1981), Ellyin (ELLYIN; GOLOS, 1988), Brown and Miller (BROWN, M. W., AND MILLER, 1973), Liu (LIU, 1993), Chu (CHU, 1995), Glinka (GLINKA; WANG; PLUMTREE, 1995), Fatemi and Socie (SOCIE, 1987), Smith, Watson and Topper (SMITH; WATSON; TOPPER, 1970) e Susmel and Lazzarin (LAZZARIN; SUSMEL, 2003; SUSMEL; LAZZARIN, 2002). Considerando análise de fadiga em materiais microdefeituosos, nas mais diversas condições de carregamento, são encontrados na literatura modelos de previsão de resistência que adotam diversos parâmetros, dentre os quais: a dureza e o limite de resistência à tração (ARAUJO et al., 2019; BANDARA et al., 2016; MURAKAMI, 2012; MURAKAMI; ELSEVIER, 2002; SHAMSAEI; MCKELVEY, 2014), a amplitude de tensão ou deformação cisalhante, a amplitude de tensão ou deformação normal (DARRELL SOCIE & GARY MARQUIS, 1999), o fator de intensidade de tensão, o fator de concentração de tensão à fadiga (BILLAUDEAU; NADOT; BEZINE, 2004), o tamanho do defeito (VINCENT et al., 2016), a distância crítica da raiz do entalhe (MARTÍNEZ et al., 2019), (SUSMEL; TAYLOR, 2006) e o gradiente de tensão na vizinhança do defeito (NADOT; BILLAUDEAU, 2006), (NASR et al., 2017).

Ao longo do tempo diversas propostas consideraram a associação de propriedades cíclicas com propriedades estáticas para quantificar fenômenos presentes em componentes sob diferentes histórias de carregamentos. Estudos realizado por Billaudeau e Nadot (BILLAUDEAU; NADOT; BEZINE, 2004) avaliaram a utilização do parâmetro de Murakami \sqrt{area} e do critério de Crossland na previsão da resistência a fadiga de espécimes contendo microdefeitos com geometria esférica e elíptica.

Nesta mesma linha, Nadot e Billaudeau (NADOT; BILLAUDEAU, 2006), quantificaram a influência do defeito no limite de fadiga. Para isso, conduziram simulações elástico-plástico para determinar a distribuição de tensões em torno dos defeitos para diferentes geometrias e diferentes carregamentos. A partir dessa análise mostraram que o gradiente de tensões hidrostáticas é um parâmetro mecânico relevante que controla o limite

de fadiga para o material com defeito. Com base nessa constatação propuseram um critério de fadiga multiaxial para prever a resistência a fadiga em materiais metálicos microdefeituosos em condições multiaxiais. Aqui é importante observar que o modelo de Crossland modificado proposto por Nadot e Billaudeau requer o cômputo de campo de tensão real entorno do concentrador de tensão (microdefeito), incluindo a modelagem do comportamento elastoplástico do material, em contrapartida aos modelos multiaxiais que utilizam tensões nominais e apenas corrigem os limites de fadiga, por exemplo, por meio do parâmetro \sqrt{area} (YANASE, 2013; YANASE; ENDO, 2014).

Estudos realizados por Endo e Ishimoto (ENDO; ISHIMOTO, 2006) analisaram a resistência à fadiga em aços contendo microdefeitos com geometria cilíndrica, na presença de carregamentos multiaxiais em fase e fora de fase. Eles observaram que o modelo $(\sigma_1 + k\sigma_2)_{max} = \sigma_w$ envolvendo as tensões principais σ_1 e σ_2 , o fator de intensidade de tensão, com a presença do parâmetro k , e a tensão limite de fadiga axial σ_w , estimada pelo critério do parâmetro \sqrt{area} de Murakami, apresentou boa concordância entre as previsões e os resultados experimentais obtidos para carregamentos multiaxiais em fase e fora de fase.

Pesquisa realizada por Thieulot-Laure et al. (THIEULOT-LAURE; POMMIER; FRÉCHINET, 2007) combinando o diagrama de Kitagawa-Takahashi's (KITAGAWA H; TAKAHASHI S., 1976) e a mecânica da fratura linear elástica em materiais com defeitos circular e semicircular, aplicando um modelo probabilístico de falha por fadiga, considerou o tamanho, orientação, forma e posição dos defeitos. Eles observaram que para pequenos defeitos a resistência à fadiga multiaxial encontrada aproxima-se da estimativa feita pelo critério de Dang Van e que o modelo proposto se apresenta de forma promissora para aplicações em carregamentos não-proporcionais.

Foram realizados estudos em aço de médio carbono (C35) (GADOUINI; NADOT; REBOURS, 2008) mostrando a influência da tensão média no comportamento à fadiga multiaxial em materiais com defeito esférico de tamanho de 400 μm . Os resultados experimentais foram analisados usando os critérios de Dang Vang, Crossland e modelos de Murakami. Também foram realizadas simulações de elementos finitos, considerando regime elastoplástico, para quantificar a distribuição de tensão em torno do defeito. De maneira geral estes estudos mostraram que a tensão média positiva provocou redução no limite de fadiga para carregamento de tração-compressão e para torção alternada não apresentou influência significativa.

Investigações realizadas por Morel e Nadot (MOREL; MOREL; NADOT, 2009) com materiais contendo microdefeitos esféricos, elípticos, circunferenciais e micro entalhes compararam o efeito do tamanho e do gradiente devido à presença dos defeitos. Consideraram a influência da tensão desviadora e do gradiente de tensão quantificado por elementos finitos e comportamento elastoplástico. Os estudos mostraram que para defeitos com geometria de mesmo tamanho o gradiente de tensão devido a cargas de tração-compressão é alterado em função da variação do tamanho do defeito. O mesmo comportamento não foi observado sob carregamentos de torção alternada, onde a resistência à fadiga foi pouco influenciada pela geometria e tamanho do microdefeito. Os autores mostraram que aplicando um modelo elastoplástico em conjunto a um critério de resistência à fadiga multiaxial, incluindo uma correção no gradiente de tensão em torno do defeito, os resultados experimentais para estes defeitos são previstos com um erro $\pm 10\%$.

Foram realizados estudos com diversos materiais (NASR et al., 2017), incluindo o AISI 1045, para avaliar a resistência e vida à fadiga na presença de diferentes defeitos sob carregamentos multiaxiais. A pesquisa considerou o efeito do gradiente de tensão na região do defeito, sendo este gradiente quantificado por método computacional por elementos finitos. Foram utilizados os modelos de Murakami combinados com diagrama de Kitagawa e o critério de Papadopoulos supondo que a amplitude de tensão cisalhante e a máxima tensão hidrostática governam os parâmetros de vida à fadiga dos materiais. Para o critério adotado, o gradiente da tensão equivalente e o parâmetro σ_{eq} apresentaram uma boa correlação experimental para defeitos de tamanhos variando entre 100 e 1000 μm , refletindo uma influência significativa do defeito na vida à fadiga.

Como pode-se notar por esta síntese de revisão do estado da arte, a estimativa da resistência a fadiga multiaxial de materiais contendo microdefeitos a partir de modelos baseados em tensão e deformação tem sido conduzida a partir de critérios que calculam ou tensões nominais elásticas ou tensões locais a partir de simulações numéricas mais complexas.

Ressalta-se a importante de observar que a grande maioria destes modelos estima apenas o limite de fadiga destes componentes com microdefeitos e não a vida. Mais ainda, os modelos baseados em tensões nominais, mais simples de implementar e com menor custo computacional, em geral, consideram a combinação de tensões principais no tempo. Outro trabalho dos autores (MACHADO et al., 2020), mostrou que estes modelos não apenas possuem um problema conceitual, mas também são de difícil aplicação para carregamentos

não proporcionais, onde a direção das tensões principais varia com o tempo.

A partir desta revisão do estado da arte pode-se notar que o comportamento de fadiga multiaxial de materiais contendo pequenos defeitos tem sido geralmente modelado considerando abordagens que usam:

- (i) tensões normais e de cisalhamento nominais elásticas (e/ou deformações), que podem ser calculadas a partir de fórmulas simples da Mecânica dos Sólidos; ou
- (ii) calcular tensões induzidas por plasticidade local a partir de simulações numéricas complexas, ou
- (iii) conceitos de mecânica da fratura.

Dentro do conjunto de modelos do grupo (i), o parâmetro \sqrt{area} de Murakami é de alguma forma considerado na análise. No entanto, até onde se sabe, os critérios do grupo (i) têm se limitado a estimar o limite de fadiga desses componentes com pequenos defeitos, mas não sua vida útil.

Portanto, neste projeto o desafio principal é propor uma metodologia que acopla modelos de planos críticos com o parâmetro \sqrt{area} para estimar a vida em fadiga no regime de médio e alto número de ciclos, considerando materiais metálicos com pequenos defeitos artificiais. Para tanto, foram propostas adaptações nos critérios multiaxiais de Fatemi-Socie (FS), Smith-Watson-Topper (SWT) e Susmel-Lazzarin (MCWM) para incorporar a presença de pequenos defeitos na estimativa de vida por meio da introdução do parâmetro \sqrt{area} . Para calibrar estes modelos multiaxiais foram utilizadas as curvas SN estimadas propostas nesta tese, sendo estas curvas SN (tração-compressão e torção alternada) parte relevante da contribuição deste trabalho.

3. METODOLOGIA PROPOSTA PARA ESTIMATIVA DAS CURVAS SN PARA COMPONENTES COM MICRODEFEITO

Na avaliação do comportamento a fadiga de materiais com microdefeitos artificiais na região de vidas finitas ($10^3 < N_f < N_0$) (KOHOUT; VECHET, 2001; MUGHRABI, 2006) será assumido que as curvas SN são representadas pela relação exponencial de fadiga (Eq. 1).

$$S_a = AN_f^b \quad (1)$$

onde S_a e N_f são, respectivamente, a amplitude de tensão (normal ou cisalhante) e o número de ciclos para falha, e A e b são parâmetros dependentes das condições de fabricação e operação do componente, sendo obtidos de acordo com a norma (ASTM E739-10, 2015).

A Figura 5 mostra esquematicamente curvas SN para corpos de prova convencionais e entalhados ou microdefeituosos. Note que estas curvas tendem a se afastar na região de alto número de ciclos ($N_f \geq N_S$) e de se aproximar para vidas curtas ($N_S = 10^3$) (BANNANTINE; COMER; HANDROCK, 1990; DOWLING, 2013; LEE et al., 2005; MÖLLER et al., 2017; YU; DUQUESNAY; TOPPER, 1988). A resistência a fadiga dos componentes entalhados σ_0 para a vida N_0 , também pode ser obtida dividindo-se o limite de resistência a fadiga do material sem defeito pelo fator de entalhe em fadiga, K_f . Apesar de K_f ser um parâmetro obtido de forma empírica, para aplicações em engenharia ele pode ser associado ao nível de severidade do entalhe ou microdefeito e a sensibilidade do material à presença desse defeito. Quando precisa-se analisar a o limite de resistência à fadiga do material contendo microdefeitos pode-se usar as Equações 2 e 3 adaptadas dos estudos de Y. Murakami disponíveis em (MURAKAMI; ENDO, 1983; ENDO; MURAKAMI, 1987; DARRELL SOCIE & GARY MARQUIS, 1999), também disponível em seu livro publicado em 2002, capítulo 6, página 106, equação 6.9 (MURAKAMI; ELSEVIER, 2002).

$$\sigma_0 = \frac{C_\sigma(HV+120)}{(\sqrt{area})^{\frac{1}{6}}} \left[\frac{1-R}{2} \right]^{(0,226+HV \times 10^{-4})} \quad (2)$$

$$\tau_0 = \frac{C_\tau(HV+120)}{F\left(\frac{a}{b}\right)(\sqrt{area})^{\frac{1}{6}}} \left[\frac{1-R}{2} \right]^{(0,226+HV \times 10^{-4})} \quad (3)$$

onde σ_0 e τ_0 , representam, respectivamente, a tensão de referência sobre tração-compressão

e torção completamente reversa, C_σ e C_τ são parâmetros relacionados com a localização da inclusão ou defeito (para defeitos ou inclusões superficiais $C_\sigma = 1,43$ e $C_\tau = 0,96$), HV é a dureza *Vickers*, R representa a razão de carregamento e $F(b/a)$ é a razão de aspecto. Para trincas elípticas com semieixo maior igual a " a " e semi-eixo menor igual a " b ", a razão de aspecto é calculada por meio da Equação 4.

$$F(b/a) = 0,0957 + 2,11(b/a) - 2,26(b/a)^2 + 1,09(b/a)^3 - 0,196(b/a)^4 \quad (4)$$

onde b/a varia entre 0,1 e 2,0. Ainda segundo Murakami e Endo, τ_0 pode ser aproximado por $\tau_0 \cong 0,80\sigma_0$, informação disponível em (DARRELL SOCIE & GARY MARQUIS, 1999; MURAKAMI; ELSEVIER, 2002).

Na literatura apresentada pelos autores (NORTON, 2013; NOURIAN-AVVAL; FATEMI, 2020) pode-se observar que materiais com relativo comportamento dúctil/frágil apresentam um significativo deslocamento entre as curvas SN obtidas por ensaios de flexão rotativa e ensaios realizados por tração-compressão. Este deslocamento tende a apresentar valores de resistência de fadiga com diferenças de até 50%. Nossa metodologia propõe utilizar um deslocamento médio de 30% entre as resistências de fadiga obtidas por experimentos de flexão rotativa e tração-compressão, além do típico fator de correção devido ao tipo de carregamento aplicado para quaisquer materiais. Podendo ser aplicado, por exemplo, para materiais como o aço liga 4340, aço carbono 1090, ligas de alumínio fundido, etc. Observa-se que para materiais com comportamento dúctil típico esta diferença reduz significativamente. Para esses materiais propõe-se desconsiderar esta diferença, conforme pode ser observado em estudos com aços de baixo e médio carbono investigados por Murakami (MURAKAMI; ELSEVIER, 2002). Para quantificar esta relação dúctil/frágil (fd) nossa metodologia considera a relação entre a tensão limite de resistência e limite de escoamento estáticos, ($\frac{S_u}{\sigma_y} \leq 1,4$), como critério para aplicar a correção adicional de 30% entre as curvas de fadiga de flexão rotativa e tração-compressão. No fluxograma apresentado no item 3.4 estes ajustes de curvas se encontram quantificados de forma sintetizada.

A Figura 5 esquematiza o comportamento das curvas SN para espécimes lisos (sem defeitos) e entalhados ou microdefeituosos.

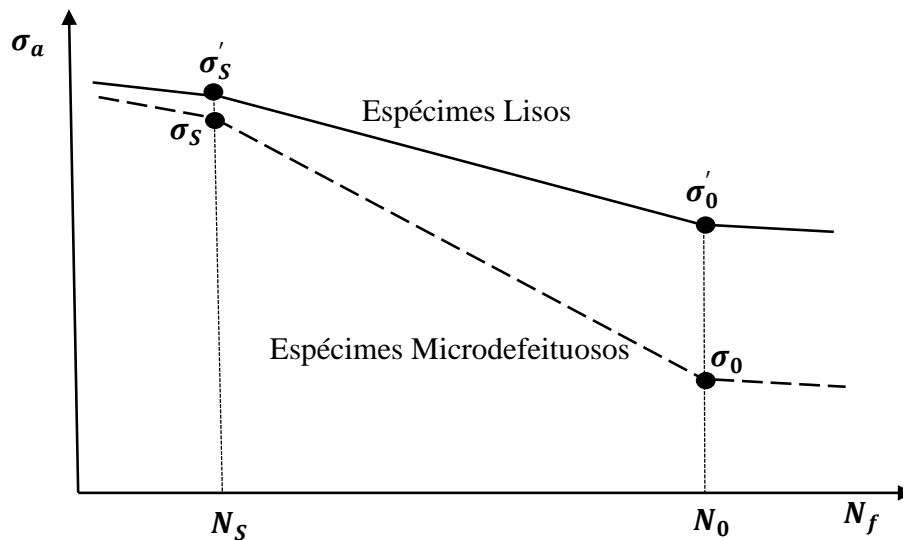


Figura 5 – Efeito de entalhe e/ou microdefeitos para vidas curtas e intermediárias

Embora diferentemente definidos em termos de tamanho e origem, os entalhes e microdefeitos compartilham semelhanças fundamentais em estudos de fadiga. Ambos atuam como locais de concentração de tensão, aumentando as tensões locais em uma estrutura ou componente. Essas áreas de maior tensão são propensas à iniciação de trincas por fadiga. Em termos gerais o entalhe (*notch*) se apresenta como uma descontinuidade geométrica ou uma região de mudança abrupta na forma ou na espessura de um componente ou material. Ele pode ser um risco, uma ranhura, uma reentrância, uma trinca, uma perfuração ou qualquer outra característica que cause uma concentração de tensão local em uma estrutura ou componente (PILKEY; PETERSON, 1997).

Entalhes podem ser caracterizados por sua forma, tamanho, profundidade e localização em relação à geometria circundante. Os fatores de concentração de tensão ajudam a quantificar o aumento local de tensão em torno de um entalhe ou defeito, podendo ser usados em ambas as abordagens para avaliar o impacto local. Tanto entalhes como os microdefeitos desempenham um papel crítico na análise de tensões e na propagação de trincas, especialmente em situações onde a concentração de tensão é um fator importante (WALTER D. PILKEY; DEBORAH F. PILKEY, 2008).

Na literatura são apresentadas diversas abordagens de engenharia (DARRELL SOCIE & GARY MARQUIS, 1999; DOWLING, 2013; JUVINALL, ROBERT C., AND MARSHEK, 2017; MURAKAMI; ELSEVIER, 2002; NORTON, 2013; SUSMEL, 2009) para estimar curvas SN de componentes sem e com entalhes ou microdefeitos na região de vidas curtas e intermediárias. Tipicamente, nessas abordagens assume-se que a curva SN

para espécimes lisos tem dois pontos notáveis: a) o ponto (N_0, σ'_0) que está associado a coordenada que define a fronteira entre a região de vida finita e a região de alto número de ciclos e o ponto (N_5, σ'_5) , que hipoteticamente representa a condição em que a influência da presença de entalhes ou microdefeitos sobre o comportamento a fadiga do material deixa de ser significativo.

Considerando estas referências (DARRELL SOCIE & GARY MARQUIS, 1999; DOWLING, 2013; JUVINALL, ROBERT C., AND MARSHEK, 2017; MURAKAMI; ELSEVIER, 2002; NORTON, 2013; SUSMEL, 2009) verifica-se que é comum assumir que a vida N_5 (Figura 5) seja igual a 10^3 ciclos e N_0 um valor entre 10^6 e 10^8 ciclos.

Na metodologia proposta nesta tese, para definir o valor do número de ciclos N_0 , utilizaremos como referencial uma estratégia proposta por Bandara *et al.* (BANDARA et al., 2015, 2016); que estudou curvas de fadiga empíricas para as regiões denominadas de mega e gigaciclos, também denominado de muito alto número de ciclos ($\geq 10^9$ ciclos). Neste momento, nosso interesse é definir um ponto estratégico para o “joelho” ou mudança de inclinação da curva SN na transição de vida de médio para alto número de ciclos.

3.1 Critério para estimativa da vida N_0

A estratégia proposta por Bandara disponível em (BANDARA et al., 2013, 2015, 2016) estabelece uma relação entre a resistência à fadiga, σ_0 , e a vida, N_f , valor entre as regiões de alto número de ciclos (HCF) e muito alto número de ciclos (VHCF), normalmente maior que 10^6 ciclos. Nesta abordagem proposta por Bandara a Eq. (2) foi modificada alterando a forma de calcular “ C_σ ” por uma função da Eq. (5), conforme estabelecido por Wang *et al.* (WANG et al., 1999).

$$C_\sigma = C_1 + C_2 \text{Log}(N_f) \quad (5)$$

onde as constantes relacionadas ao tipo de defeito, C_1 e C_2 , são respectivamente, 3,09 e 0,12 para inclusões internas e 2,79 e 0,108 para defeitos superficiais. Para evitar limitações e dificuldades relacionadas à identificação destes valores, Bandara *et al.* (BANDARA et al., 2013) propuseram, com base em análise de dados experimentais, estabelecendo valores médios para C_1 e C_2 independentes da localização do defeito (superficiais ou internos), estimados respectivamente em 2,41 e 0,109.

Combinando as Eqs. (2) e (5) e substituindo C_1 e C_2 por 2,41 e 0,109, respectivamente, a relação entre σ_0 e N_f pode ser reescrita como:

$$\sigma_0 = \frac{[2,41+0,109\text{Log}(N_f)](HV+120)}{(\sqrt{area})^{\frac{1}{6}}} \left[\frac{1-R}{2} \right]^\alpha \quad (6)$$

Ao revisar o trabalho de Liu *et al.* (LIU et al., 2009), Bandara et al. (BANDARA et al., 2013) também propuseram uma forma de estimar o limite ou resistência à fadiga de materiais com pequenos defeitos no regime de alto número de ciclos (HCF), ou seja, normalmente com N_f entre 10^6 e 10^{10} ciclos (Eq. (7)).

$$\sigma_0 = \frac{S_u^{\frac{1}{3}}}{1000} (HV + 120) \cdot (155 - 7\text{Log}N_f), \quad (R = -1) \quad (7)$$

Bandara *et al.* assumindo que o limite de fadiga superior aproximado dos aços (sem defeito) no regime de fadiga de alto ciclo pode ser representado em função do limite de resistência estática do material, estabelecido na literatura por $0,5S_u$ (LEE et al., 2005; MURAKAMI, 2012) pode-se substituir σ_0 na Eq. (7) por este valor de $0,5S_u$, considerando carregamento de flexão rotativa. Resolvendo esta equação para N_f resulta na Eq. (8), que estima a vida de transição entre os regimes de médio e alto número de ciclos (HCF).

$$N_{Transição(HCF)} = 10^{\left(\frac{0,155 \cdot (HV+120) \cdot S_u^{\frac{1}{3}} - 0,5 \cdot S_u}{0,007 \cdot (HV+120) \cdot S_u^{\frac{1}{3}}} \right)} \quad (8)$$

Sendo HV em Kgf/mm^2 ; S_u em MPa; $N_{Transição(HCF)}$ em número de ciclos

A metodologia proposta nesta tese propõe usar a Eq. (8) como referencial para estimar o valor de N_0 , caracterizado pelo “joelho” ou mudança de inclinação da curva de fadiga. Esta estimativa depende apenas das propriedades mecânicas estáticas do material, dureza HV , e limite de resistência à tração estática (S_u). Os estudos experimentais deste projeto de tese e a análise de dados experimentais da literatura mostram que o valor estimado por Bandara para $N_{Transição(HCF)}$ definido pela Eq. (8) normalmente se apresenta entre 10^5 e 10^8 ciclos. Este valor estabelecido para o número de ciclos N_0 juntamente com N_S permitem estimar uma razoável curva SN para utilização em projetos e práticas de engenharia.

3.2 Aplicação da vida N_S como 10^3 ciclos e aproximação entre as amplitudes de tensão σ_s e σ'_s

Para a determinação da resistência a fadiga em 10^3 ciclos será considerado o modelo de Heywood (HEYWOOD, 1962) *apud Lee, (2005)*. Segundo esse modelo, a resistência a fadiga, σ_s e τ_s , em 10^3 ciclos considerando o fator de sensibilidade em fadiga, q' , é definida empiricamente por meio das equações 11 e 12.

$$q'_{1000} = \frac{K'_f - 1}{K_f - 1} \quad (9)$$

onde K'_f representa o fator de entalhe em fadiga em 1000 ciclos (N_S), K_f é o fator de entalhe em fadiga na condição de vida de referência (N_0). Este fator de sensibilidade ao entalhe (Notch sensitivity factor) pode ser estimado para a vida de 10^3 ciclos conforme apresentado por Lee YL em (LEE et al., 2005). Uma vez determinado K'_f , a resistência a fadiga em 10^3 será calculada dividindo-se a resistência a fadiga do material nessa vida, σ'_s , por K'_f . Estudando o comportamento de entalhes Heywood (HEYWOOD, 1962) mostrou que o fator de redução a fadiga (*fatigue notch factor*) em 10^3 ciclos, K'_f , nunca se torna exatamente igual a um, mas se aproxima da unidade quanto mais dúctil for a liga. Ainda considerando relações empíricas disponíveis na literatura (LAGODA et al., 2018; LEE et al., 2005; NORTON, 2013), pode-se estimar a resistência a fadiga do material em 10^3 ciclos, σ'_s , como:

$$\sigma'_s = m' S_u \quad (10)$$

onde m' é um parâmetro que considera principalmente o tipo de esforço interno aplicado sobre a seção transversal em que se encontra o entalhe.

Assim, considerando as referências (BANNANTINE; COMER; HANDROCK, 1990; LAGODA et al., 2018; LEE et al., 2005) pode-se estimar as resistências a fadiga para os espécimes com microdefeito em 10^3 ciclos por meio das seguintes relações (Eqs. 11 e 12):

$$\sigma_s = \frac{m' \times S_u}{K'_{f\sigma}} \quad (11)$$

$$\tau_s = \frac{m' \times S_u}{K'_{f\tau}} \quad (12)$$

onde S_u é o limite de resistência a tração, m' , $K'_{f\sigma}$ e $K'_{f\tau}$ são respectivamente, o fator limite

de fadiga à flexão, o fator de entalhe à fadiga em condições de tração-compressão e o fator de entalhe à fadiga em condições de torção reversa em 10^3 ciclos.

3.3 Propriedades Mecânicas utilizadas na metodologia proposta para previsão de vida em materiais microdefeituosos

Para determinação e validação das curvas SN dos materiais a metodologia adotada neste projeto utiliza como informação de entrada as propriedades mecânicas dos materiais: limite de resistência estática e dureza. Posteriormente para aplicação dos modelos multiaxiais para previsão de vida são incorporadas também as propriedades estáticas: módulo de elasticidade longitudinal e transversal, tensão limite de escoamento axial e cisalhante. Também são utilizadas as propriedades cíclicas das curvas SN estimadas, coeficiente e expoente de fadiga.

As amplitudes de tensões nominais consideradas nesta metodologia utilizam os carregamentos externos axiais e torcionais aplicados em uma área útil onde o microdefeito apresenta uma influência inferior a 5% na área total. Foram consideradas as áreas “*Net área*” e “*Gross área*” dos corpos de prova para mensurar seu impacto nos campos de tensão, assim garantindo sua neutralidade no método proposto para estimar vida em fadiga em componentes microdefeituosos. Para os casos onde o microdefeito ultrapassou os 5% de influência sobre a área da seção dos corpos de prova foi considerada a área líquida (“*Net área*”) para calcular a amplitude de tensão aplicada. O fluxograma apresentado na Figura 6 mostra como a curva SN é estabelecida mediante a aplicação da metodologia proposta.

3.4 Fluxograma da metodologia proposta para estimar a curva SN

A Figura 6 mostra um Fluxograma que apresenta uma síntese da metodologia utilizada para estimar a curva SN para espécimes lisos e microdefeituosos. Este fluxograma foi elaborado considerando as Equações 9, 10, 11 e 12, para 10^3 ciclos e as Equações 2, 3, 6, 7 e 8 para “ N_0 ” ciclos, considerada a vida de transição do 1º “joelho” ou mudança de direção da curva SN.

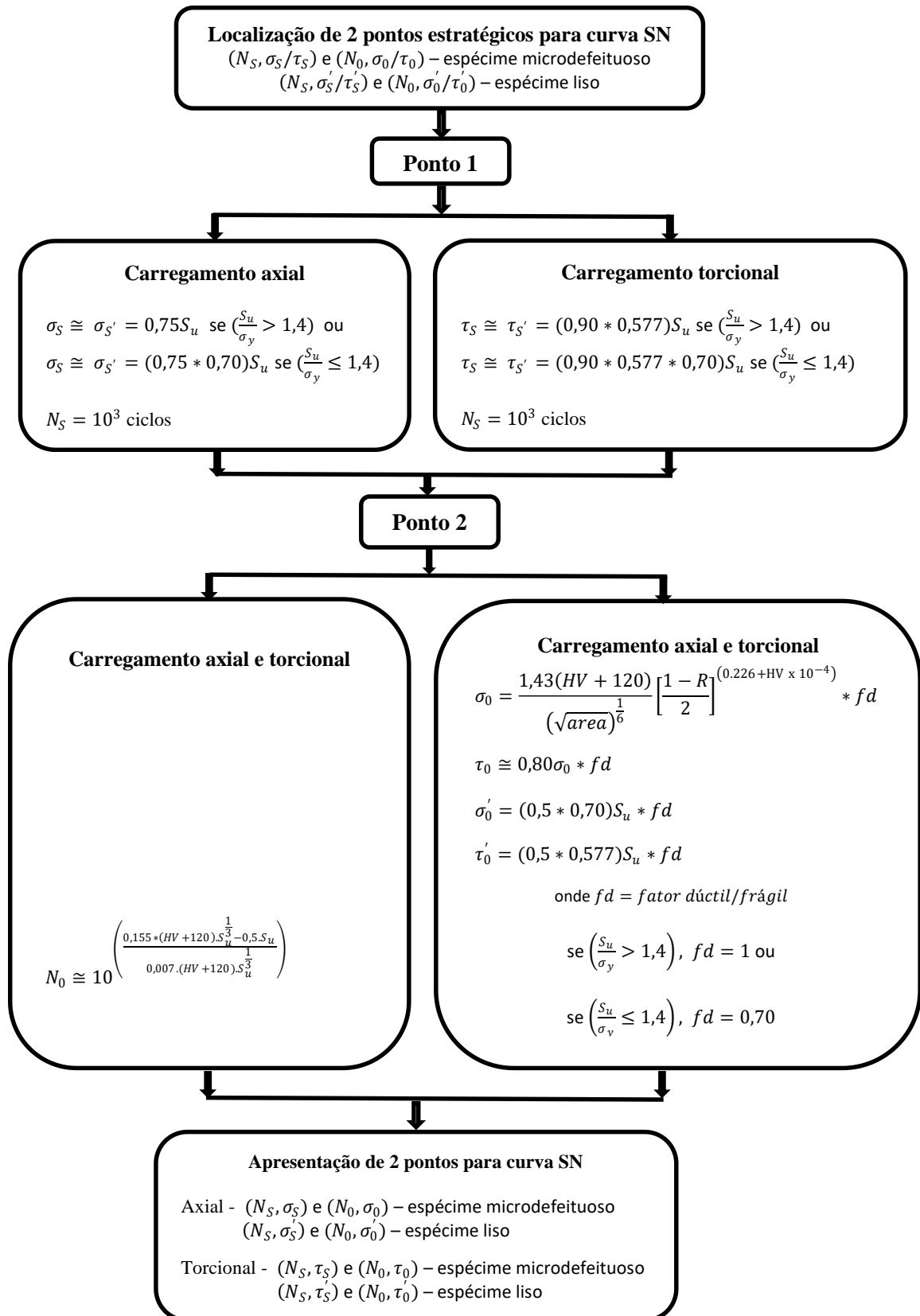


Figura 6 - Fluxograma resumindo o procedimento para obtenção dos 2 pontos estratégicos para estimar a curva SN.

Após obter os pontos (N_S, σ'_S) e (N_0, σ'_0) para materiais sem defeito e (N_S, σ_S) e (N_0, σ_0) para materiais microdefeituosos obtém-se as curvas de fadiga estimadas sob condições de carregamento axial e torcional disponibilizadas para calibrar modelos multiaxiais de interesse.

3.5 Validação da metodologia para previsão das curvas de fadiga em componentes microdefeituosos

3.5.1 Validação da metodologia proposta utilizando dados da literatura

Para ampliação das análises e validação complementar da metodologia proposta neste projeto, utilizamos resultados experimentais disponíveis nas literaturas (ADRIANO et al., 2018; COSTA; CASTRO, 2020; MARTÍNEZ, 2018; MARTÍNEZ et al., 2019; MURAKAMI; ELSEVIER, 2002; NASR et al., 2010; TORRES, 2019). Os principais dados desses estudos da literatura utilizados para análise e validação das curvas SN estimadas por este projeto se encontram sintetizados nas Tabelas A1, A2, A3, A4, A5 e A6 disponíveis no Apêndice A. Estas tabelas mostram o tipo de material, geometria do microdefeito, tamanho do defeito (parâmetro \sqrt{area}), tipo de carregamento e o número de ciclos para falha.

A Tabela A1 do Apêndice A mostra dados de fadiga de um aço de médio carbono (SAE 1045) com defeito cilíndrico de tamanho de 400 μm . Os dados da Tabela A2 se referem a uma liga de alumínio (6201-T81) com defeito de 1665 μm , ambos os estudos abordam fadiga axial em material com defeito de geometria cilíndrica.

A Tabela A3 do Apêndice a apresenta dados da literatura referente a um aço carbono de baixo carbono (SAE 1020). Os autores estudaram defeitos cilíndricos com diferentes dimensões geométricas com mesma raiz de área, incluindo defeitos de 420 e 750 μm em carregamento de tração-compressão alternada.

A Tabela A4 do Apêndice A mostra dados da literatura referente a uma liga de alumínio (6201-T81) utilizada na fabricação de cabos utilizados em redes elétricas. Os autores investigaram o efeito de microdefeitos de 100, 324 e 700 μm com geometria cilíndrica.

Na Tabela A5 do Apêndice A estão disponíveis dados de ensaios experimentais da literatura onde foi investigado efeito de microdefeito de 300 μm com uma geometria esférica em um aço de médio carbono (C35).

Na Tabela A6 do Apêndice A são apresentados dados de fadiga axial de um aço de alta resistência mecânica, aço Maraging, com dois tamanhos de defeitos bastante reduzidos, 59 e 100 μm .

A Tabela 1 apresenta as propriedades mecânicas estáticas dos materiais da literatura utilizados para validação inicial da metodologia proposta para estimar as curvas SN. Nessa tabela é destacado os valores do limite de resistência e dureza dos materiais analisados.

Tabela 1 - Propriedades estáticas dos materiais da literatura utilizados para estimativas de curvas SN com espécimes com microdefeitos.

Fonte	Material	Tensão Limite de Resistência S_u (MPa)	Dureza Vickers HV (Kgf/mm ²)
(COSTA; CASTRO, 2020)	Aço SAE 1045	661	199
(ADRIANO et al., 2018)	Alumínio 6201-T81	311	98
(TORRES N.G; MAMIYA, 2019)	Aço carbono SAE 1020	415	124
(MARTÍNEZ et al., 2019)	Alumínio 6201-T81	312	98
(NASR et al., 2010)	Aço C35	580	214
(MURAKAMI; ELSEVIER, 2002)	Aço Maraging (M400 Liga)	2800	740

A Tabela 2 mostra os valores estabelecidos para as propriedades mecânicas cíclicas das curvas SN dos materiais da literatura considerados pela metodologia deste projeto. Esses dados são referentes a 5 diferentes tipos de materiais investigados pelos 6 estudos considerados para validação inicial da metodologia proposta. Essa Tabela destaca o tipo de material, o tamanho do defeito, coeficiente e expoente de fadiga, tipo de carregamento e a razão de tensão ($R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$).

As Figuras 7 e 8 sintetizam a relação entre as Amplitudes de Tensão Estimada e Tensão Aplicada e a relação Vida Estimada vs. Vida Experimental de acordo com a metodologia desta tese. Nos gráficos destas figuras pode-se observar as características e abrangência dos desvios entre os dados estimados pela nossa metodologia e aqueles obtidos por estudos experimentais divulgados pela literatura científica. Esses dados da literatura contemplam diferentes materiais presentes em seis estudos envolvendo fadiga na presença de microdefeitos superficiais.

Tabela 2 - Propriedades cíclicas dos materiais da literatura utilizados para estimativas de curvas SN ($S_a = AN_f^B$) com espécimes com microdefeitos.

Fonte	Material	Parâmetro \sqrt{area} (μm)	A Coeficiente de Fadiga	B Expoente de Fadiga	Tipo de Carregamento	Razão de Tensão (R)	
(COSTA; CASTRO, 2020)	Aço SAE 1045	400	2240	-0,2183	Axial	-1	
			2945	-0,2579	Axial	0,1	
			1268	-0,1892	Torcional	-1	
			1399	-0,2034	Torcional	-0,5	
(ADRIANO et al., 2018)	Alumínio 6201-T81	1665	447	-0,1195	Axial	-1	
(TORRES N.G; MAMIYA, 2019)	Aço SAE 1020	420-i	795	-0,1357	Axial	-1	
			420-ii	795	-0,1357	Axial	-1
			420-iii	795	-0,1357	Axial	-1
			750	880	-0,1504	Axial	-1
(MARTÍNEZ et al., 2019)	Alumínio 6201-T81	100	233	-0,0513	Axial	-1	
			324	-0,0722	Axial	-1	
			700	-0,0865	Axial	-1	
(NASR et al., 2010)	Aço C35	300	794	-0,0872	Axial	-1	
			497	-0,0725	Torcional	-1	
(MURAKAMI; ELSEVIER, 2002)	Aço Maraging M400	100	9212	-0,2140	Axial	-1	
			59	7220	-0,1788	Axial	-2,1
			100	8111	-0,1956	Axial	-1,9

Nas Figuras 7 e 8 também pode se observar que foram considerados 111 ensaios experimentais disponibilizados pela literatura científica, 5 tipos diferentes de materiais, incluindo ligas de aço e ligas de alumínio. Os estudos analisados contemplam carregamentos de tração-compressão e torção alternada, sendo que em alguns deles há presença de tensão média. Para os casos onde o tamanho do defeito teve um impacto maior que 5%, foi calculada a área líquida (*Net área*), subtraindo da área total da seção a área do segmento circular que contém o defeito (visto que todos os corpos de prova estudos são cilíndricos).

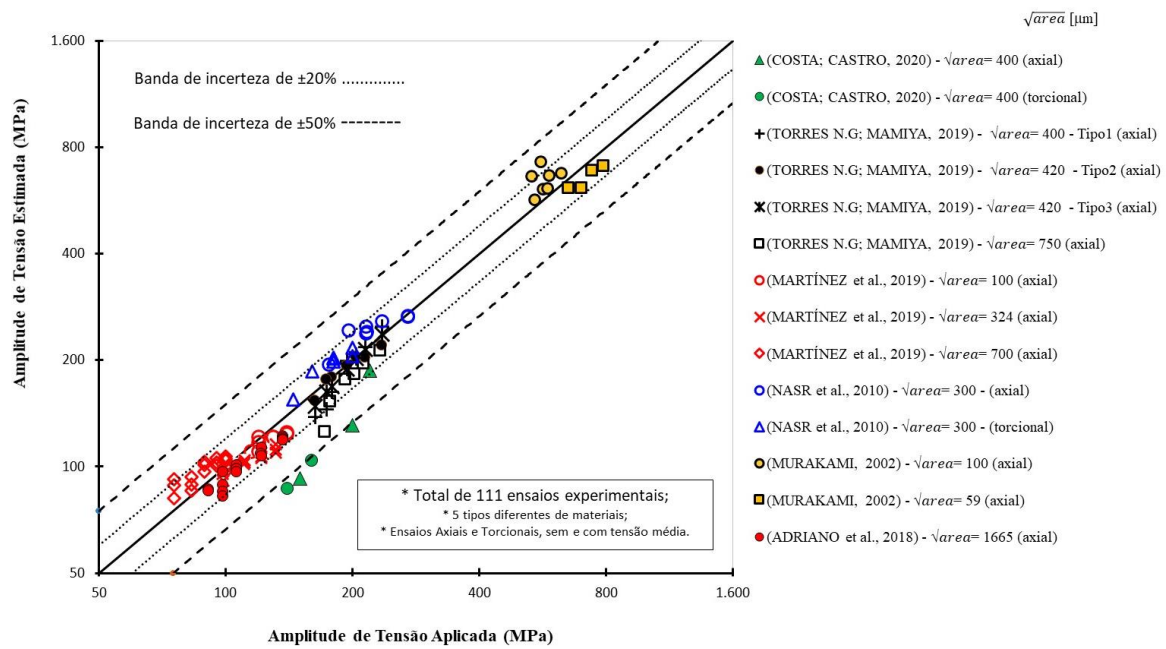


Figura 7 - Aplicação da metodologia proposta para avaliação do comportamento de dados experimentais obtidos na literatura considerando a relação entre as amplitudes de tensão estimada e aplicada.

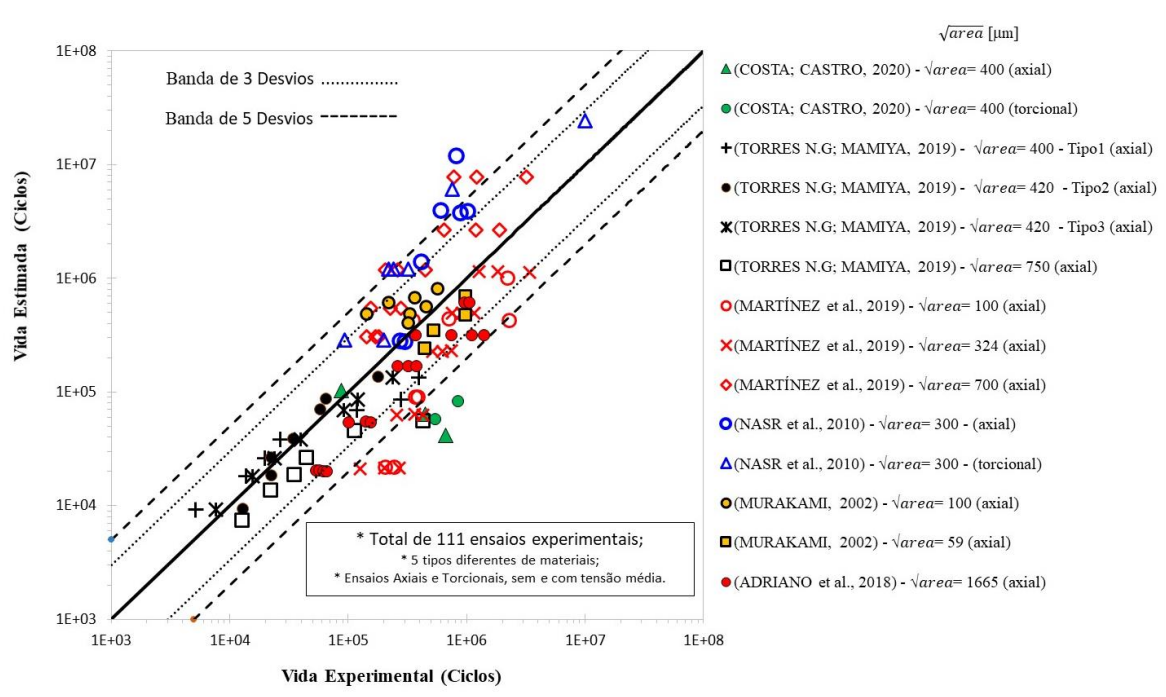


Figura 8 - Aplicação da metodologia proposta para avaliação do comportamento de dados experimentais obtidos na literatura considerando a relação entre a vida estimada e a vida experimental.

Na Figura 7 pode-se observar que para 94,6% dos dados, referentes a diferentes tipos de materiais e carregamentos, a amplitude de tensão estimada (para mesma vida obtida

experimentalmente) é prevista dentro de uma banda de 20% de desvio. Estes resultados mostram o potencial da metodologia proposta neste trabalho.

Na Figura 8 são apresentados dados de vida estimada vs. vida experimental, observa-se que 74% dos dados estão dentro de uma banda de 3 desvios, 90% dentro de 5 desvios e 88,3% estão dentro de 3 desvios e/ou são resultados conservativos. Nesta análise também pode-se perceber a capacidade da nossa metodologia em prever vidas à fadiga na presença de microdefeitos. Ainda nesta Figura 8 observa-se alguns dados fora dos limites de 5 desvios, para esses casos é necessário avaliar o comportamento entre as variáveis estáticas de dureza e limite de resistência do material e também a disponibilidade de dados de repetição dos ensaios de fadiga para uma mesma faixa de amplitude de tensão. Esses casos demandam uma investigação mais detalhada, incluindo um número maior de resultados experimentais.

3.5.2 Métodos e estratégia de análise para validação experimental

O programa experimental (próprio autor) utilizou corpos de prova confeccionados em aço AISI 1045. Três tipos de corpos de prova foram usinados: liso maciço (cilíndrico sem defeito) (Figura 10(a)), liso (tubular sem defeito) (Figura 10(b)) e cilíndrico maciço com pequenos defeitos (Figura 10). Para promover uma homogeneização da microestrutura do material adquirido no mercado, em todos os casos, os corpos de prova foram normalizados (aquecimento em temperatura com rampa de 4 horas até uma isoterma de 850°C por 20 minutos e resfriamento ao ar) e posteriormente usinados/polidos para remoção da camada oxidada. As dimensões dos corpos de prova lisos foram baseadas na norma ASTM E466 (ASTM E466-15, 2015).

O aço AISI 1045 possui boa usinabilidade, boa resistência mecânica, média soldabilidade e alta forjabilidade. Esse material normalmente possui a presença dos elementos químicos C, Fe, Mn, P e S. Ele é utilizado na fabricação de eixos, engrenagens, pinos, cilindros, parafusos, grampos, braçadeiras, pinças, colunas, entre outros, com significativa aplicação em vários setores industriais, destacando máquinas e equipamentos da indústria automobilística e agrícola.

Nesse estudo, foram avaliados o comportamento a fadiga de microdefeitos cuja raiz de área (\sqrt{area}) era 300, 500 e 700 μm . Tais microdefeitos foram produzidos artificialmente utilizando o processo de eletroerosão, ilustração na Figura 11. Ainda considerando a norma ASTM E466, após a fabricação, todos os corpos de prova foram

lixados, usando lixamento incremental, e eletropolidos (baseado na norma ASTM B 912 (ASTM B 912–00, 2000) até alcançarem uma rugosidade superficial entre 0,08 e 0,20 Ra. No Apêndice D é abordado com mais detalhes as características técnicas e parâmetros utilizados para realização do processo de eletropolimento. Posteriormente, a geometria (diâmetro e profundidade) dos pequenos defeitos foi verificada por meio de um Microscópio Olympus LEXT – OLS 4100 *Confocal Laser Microscope* (Figura 11). Para obter as medidas dimensionais dos corpos de prova (rugosidade superficial, diâmetro útil, diâmetro da garra e geometria do defeito) também foram utilizados os instrumentos: rugosímetro, micrômetros, relógio comparador milesimal e microscopia óptica. No Apêndice C encontra-se disponível na Tabela C1 um resumo das principais dimensões, em valores médios, dos microdefeitos produzidos artificialmente para cada tipo de ensaio e as rugosidades superficiais (Ra).

Foram produzidos 109 corpos de prova, para a condução de experimentos de caracterização do material sob carregamento monotônico e à fadiga sob carregamentos axiais, torcionais, combinados (axiais-torcionais) proporcionais, com e sem a presença de defeitos. A Tabela 3 lista a quantidade destes corpos de prova empregada em cada um dos programas de ensaio realizados. A Figura 9 mostra as características da localização e tamanho dos microdefeitos investigados nos ensaios experimentais próprios.

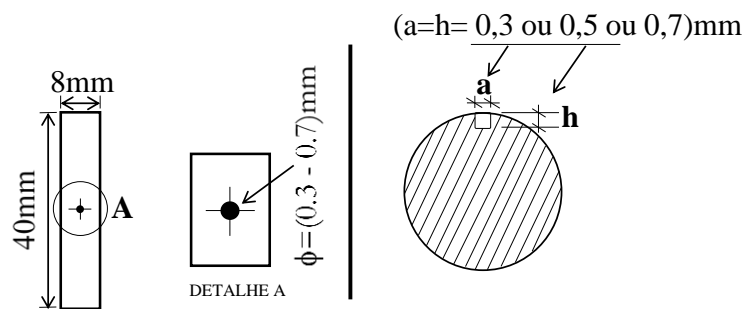


Figura 9 - Dimensões da seção útil dos corpos de prova e detalhamento da geometria do microdefeito.

A Figura 10 mostra as dimensões dos corpos de prova cilíndricos (maciço e vazado) utilizados nos experimentos, onde observa-se em a) Corpo de prova “maciço” (usado nos ensaios monotônicos de tração e de fadiga axial, torcional e axial-torcional) e b) Corpo de prova “vazado” para ensaios monotônicos de torção e c) imagem fotográfica de um corpo de prova real.

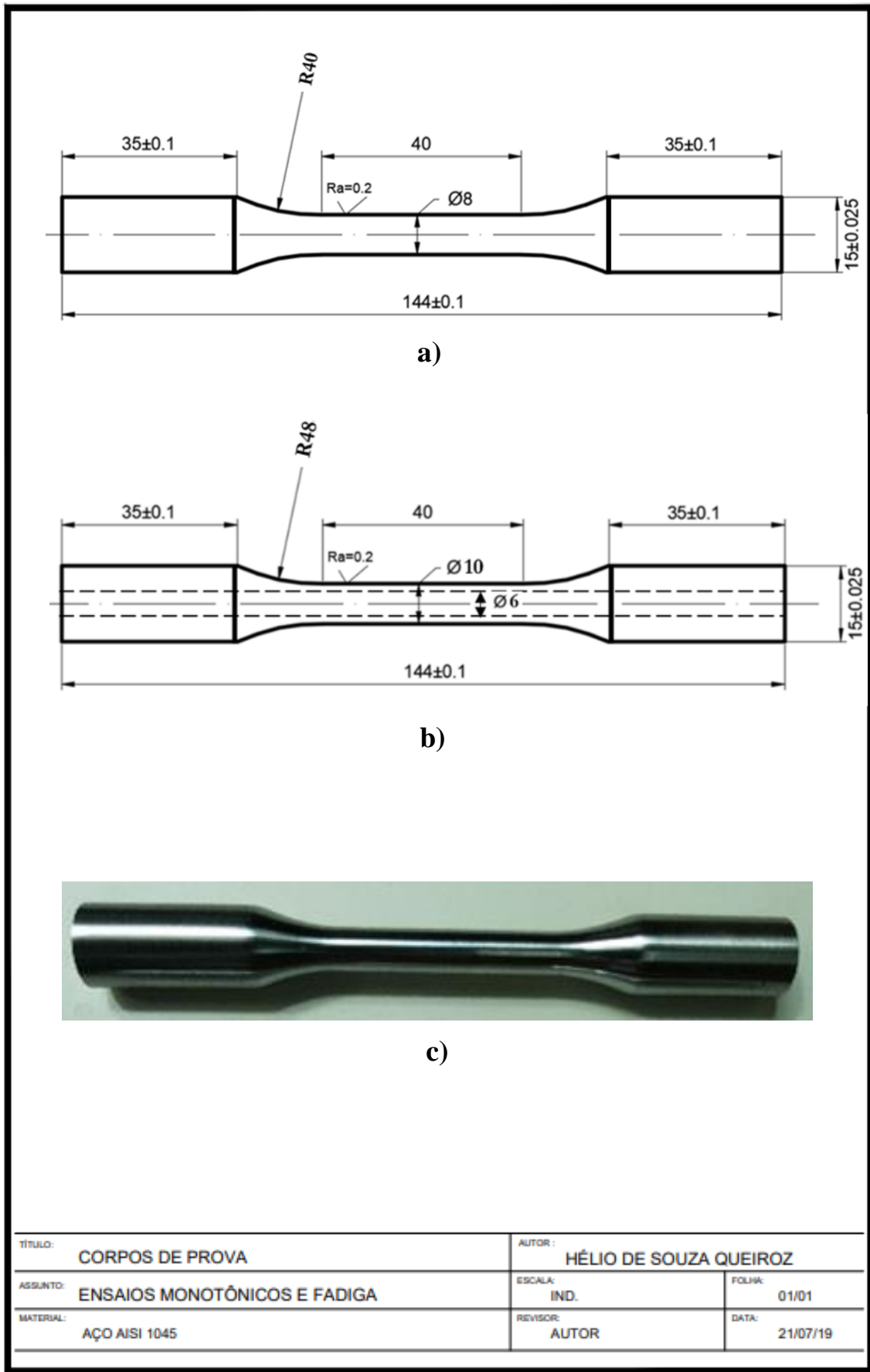


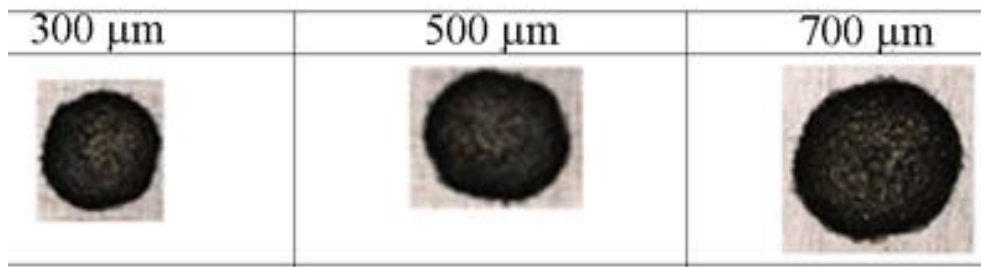
Figura 10 - Corpos de prova utilizados nos experimentos

As quantidades de corpos de prova utilizados e os tipos de ensaios realizados nos estudos experimentais estão sintetizados na Tabela 3.

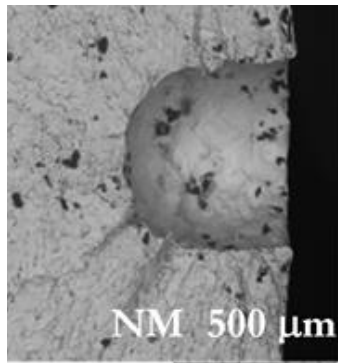
Tabela 3 - Relação dos corpos de prova, tipo de ensaio e tipo de defeitos utilizados nos experimentos.

Nº de corpos de prova	Tipo de ensaio realizado	Tipo de defeito
3	Tração monotônica	Sem defeito
3	Torção monotônica	Sem defeito
13	Fadiga axial	Sem defeito
8	Fadiga axial	Defeito I
10	Fadiga axial	Defeito II
5	Fadiga axial	Defeito III
11	Fadiga torcional	Sem defeito
6	Fadiga torcional	Defeito I
10	Fadiga torcional	Defeito II
7	Fadiga torcional	Defeito III
9	Fadiga multiaxial (axial-torcional) Proporcional	Sem defeito
8	Fadiga multiaxial (axial-torcional) Proporcional	Defeito I
8	Fadiga multiaxial (axial-torcional) Proporcional	Defeito II
8	Fadiga multiaxial (axial-torcional) Proporcional	Defeito III
Total de 109 corpos de prova, sendo: Defeito I (300 µm); Defeito II (500 µm) e Defeito III (700 µm)		

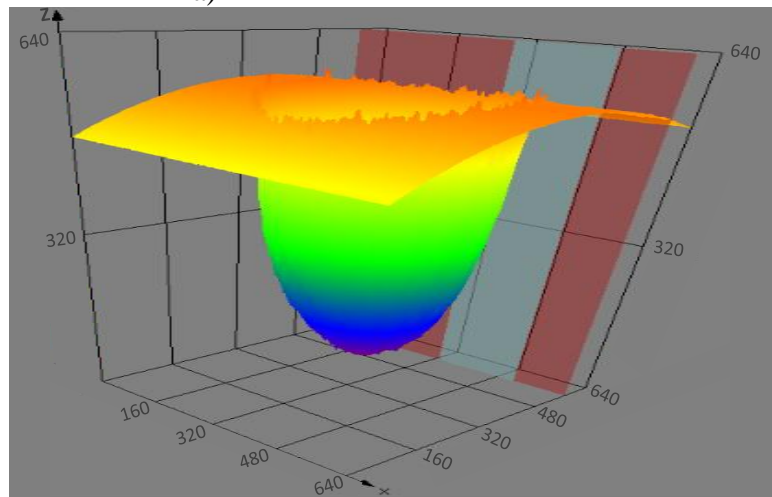
A Figura 11 ilustra as características geométricas e equipamento de processo de eletroerosão a ponto utilizado para gerar os três tipos de microdefeitos investigados no projeto.



a)



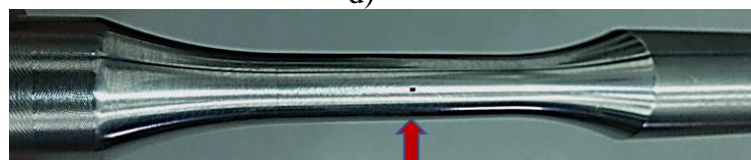
b)



c)



d)



e)

Figura 11 - Ilustração: a) tamanho dos microdefeitos artificiais; b) imagem MEV de microdefeito c) imagem de microscopia confocal a laser de microdefeito; d) máquina de eletroerosão utilizada na fabricação dos microdefeitos e) fotografia de um espécime microdefeituoso.

3.5.3 Procedimentos experimentais

3.5.3.1 Ensaio Estáticos

Ensaio para obtenção das propriedades mecânicas estáticas do material foram realizados sob controle de deslocamento (linear ou angular) em uma máquina MTS 810 com capacidade de carga de 100 kN e um sistema multiaxial MTS 809 com 100 kN e 1100 N.m (Figura 17). Nos ensaios axiais foi utilizado um extensômetro com comprimento padrão de 25,00 mm e faixa de deslocamento de +5,00/-2,50 mm. Nos testes de torção simples foi necessário um extensômetro biaxial com comprimento de referência de 25,00 mm, uma faixa de deslocamento axial de 1,20/-0,50 mm e uma faixa de deslocamento de torção de $\pm 5^\circ$.

Os resultados das propriedades mecânicas monotônicas do material investigado (aço AISI 1045) de tração e torção podem ser observados nas Figuras 12 e 13 e seus valores estão resumidos na Tabela 4. Na Figura 12 também pode-se observar o tipo característico de fratura presente em ensaios de tração monotônica de aços de médio carbono.

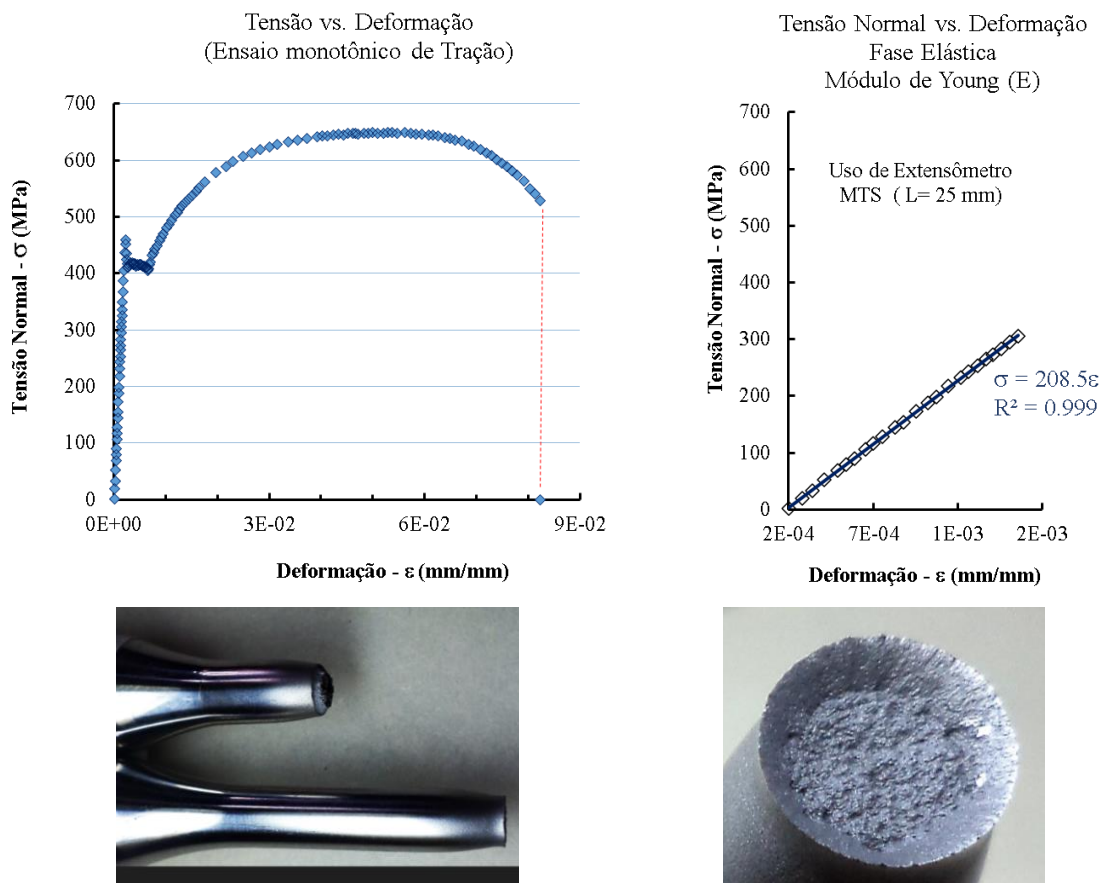


Figura 12 - Curva experimental de ensaio de tração monotônica com e sem extensômetro. Imagem de espécime com fratura tipo taça-cone.

Devido às características de ductilidade do material (aço AISI 1045 normalizado), não foi possível levar os ensaios monotônicos de torção até à fratura dos corpos de prova tubulares. Isto se deu em função da limitação de deslocamento angular da máquina utilizada para realizar os ensaios (-45 a + 45°). A Tabela 4 mostra uma síntese das propriedades mecânicas estáticas obtidas experimentalmente.

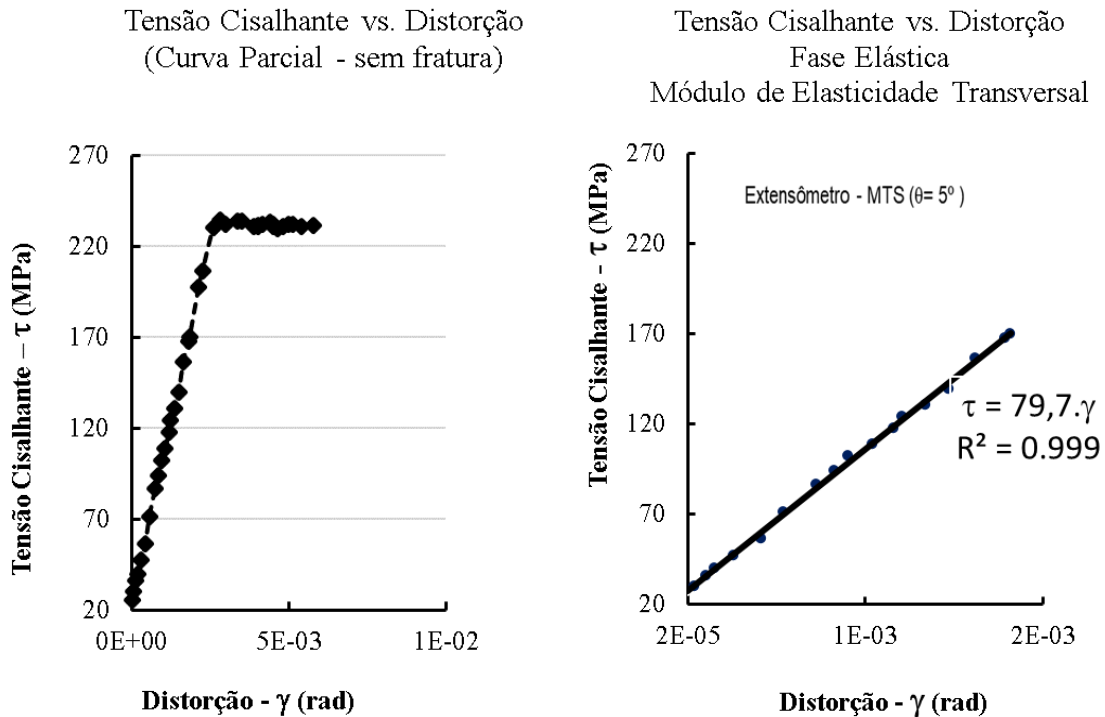


Figura 13 - Curva experimental de ensaio de torção monotônica com e sem extensômetro.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas monotônicas e dureza experimentais

S_u (MPa)	σ_y (MPa)	τ_y (MPa)	E (GPa)	G (GPa)	ν^* *($\nu = (E / 2G) - 1$)	RA (%)	Dureza (HRB/HV)
647	405	230	208,5	79,7	0,31	49	95/210

Para avaliar o limite de resistência a fadiga por meio das equações de Murakami (Eqs. 2 e 3), também foram realizados ensaios de dureza (Quadro 1). Para isto, utilizou-se uma máquina *Rockwell Hardness Testing* modelo HR-300 digital, da Mitutoyo, disponível na Faculdade de Tecnologia SENAI Roberto Mange, Anápolis-GO. Estes ensaios de dureza HRB foram realizados com penetrador de esfera e carga de 100 Kgf, ilustração (Figura 14).

O resultado de dureza obtido na escala HRB foi aproximado para escala Vickers (HV) de acordo com a norma ASTM E140-02 (ASTM, 2002).



a)



b)

Figura 14 - Equipamento tipo durômetro utilizado nas medições de dureza: a) Penetrador e suporte de apoio das amostras e b) Durômetro digital Rockwell – Fabricante Mitutoyo.

As medições de dureza foram realizadas conforme orientação da norma ASTM E18-15, respeitando a distância mínima entre endentações, Figura 15 (ASTM, 2015).

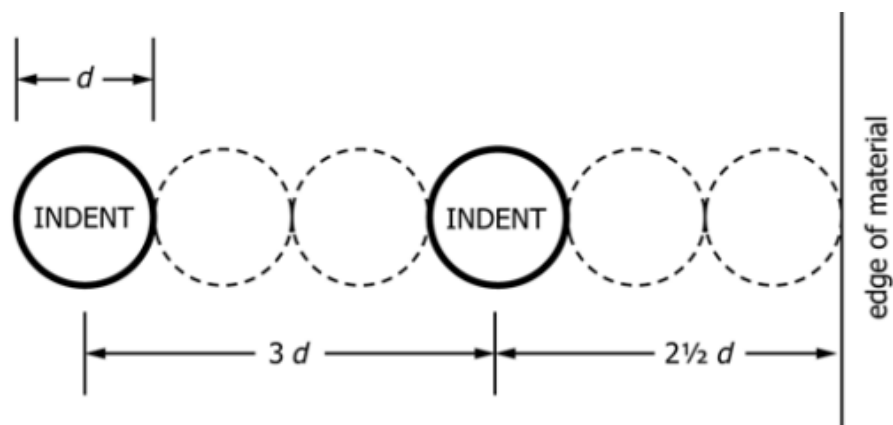




Figura 15 - Recomendação da ASTM para espaçamento mínimo entre indentações em ensaios de dureza Rockwell. Fonte: ASTM E 18-15.

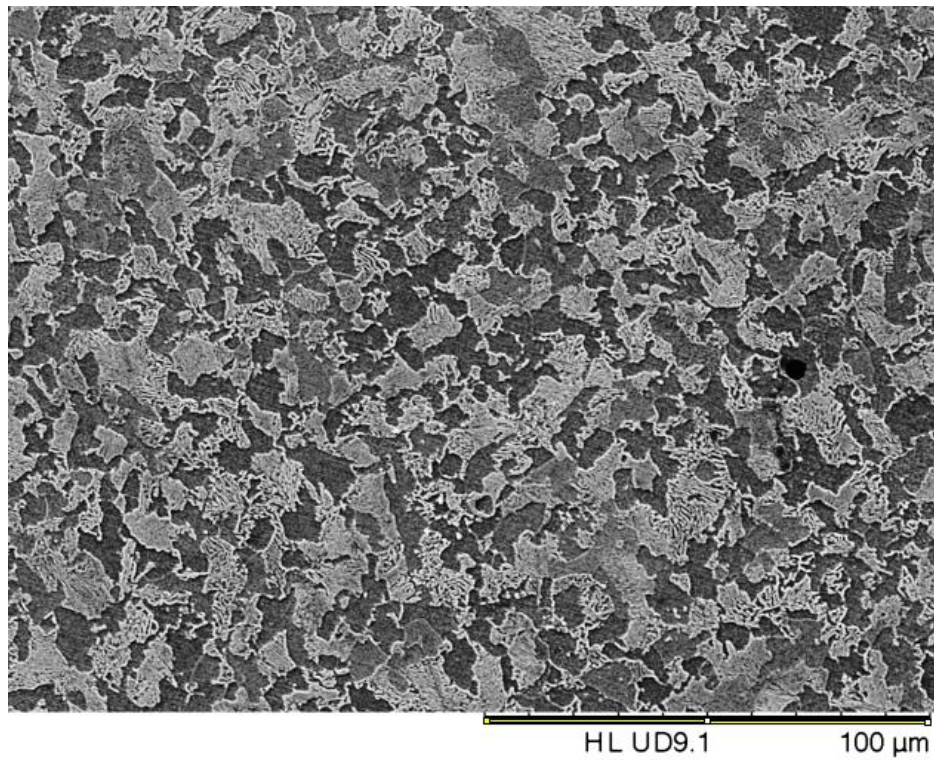
O material investigado apresentou resultados médios de dureza idênticos para as

seções longitudinais e transversais dos corpos de prova (Quadro 1). Os ensaios de dureza Rockwell (HRB) realizados nas superfícies cilíndricas do material foram corrigidos de acordo com a norma ASTM E18-15, realizando todas as medições de forma concêntrica entre o eixo do penetrador e o centro da amostra cilíndrica, onde o fator de correção é diretamente proporcional ao diâmetro da amostra. Para estimar as curvas SN foi utilizado um valor de dureza 210 *HV* (Quadro 1).

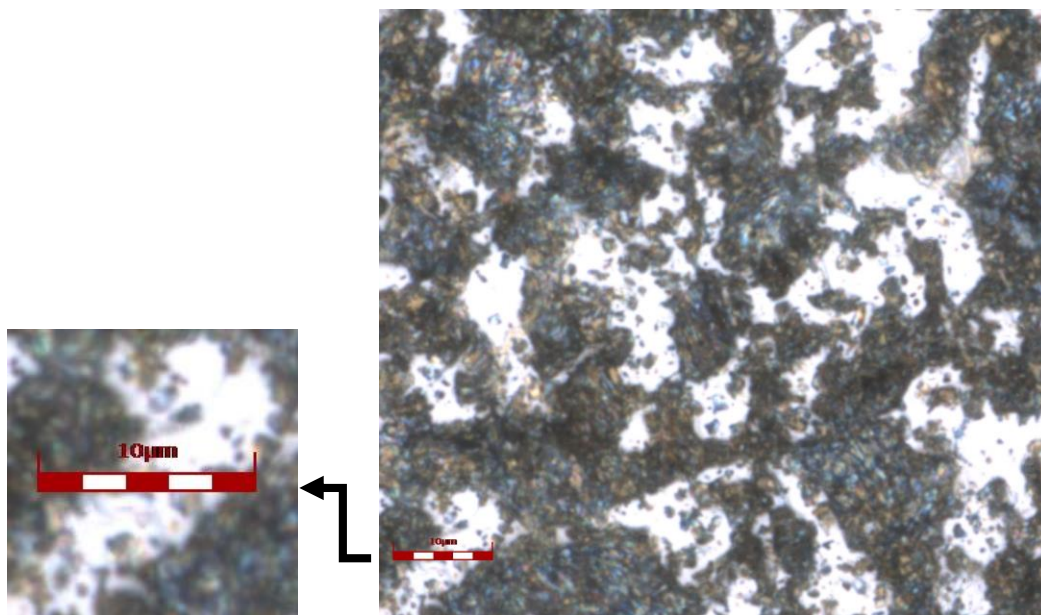
Quadro 1 - Resultados de Dureza para amostra sem e com tratamento térmico.

Dureza Rockwell (HRB)	Direção de medição no Corpo cilíndrico de 8 mm	Esquema de medição
94 ± 1,5	Transversal	
95 ± 1,0	Longitudinal	
Dureza Média considerada: 95 HRB (210 HV)		

Conforme descrito no item 3.5.2 os espécimes ensaiados foram normalizados para homogeneizar a microestrutura do material, reduzindo as possíveis diferenças de dureza entre as seções longitudinais e transversais. A Figura 16 mostra imagens de micrografia eletrônica de varredura (MEV) e microscopia confocal a laser ilustrando o comportamento perlítico/ferrítico do aço AISI 1045 após processo de térmico de normalização.



a)



b)

Figura 16 - Imagens da microestrutura do aço AISI 1045 trefilado, normalizado e eletropolido a) microscopia MEV e b) microscopia confocal a laser.

3.5.3.2 Ensaios de fadiga

Os ensaios de fadiga foram realizados sob controle de força e/ou torque (em ar ambiente) e o critério de falha adotado para a interrupção dos ensaios foi a fratura total do

corpo de prova. Uma onda de tensão senoidal totalmente reversa foi usada em tração e torção. Esses sinais podem ser descritos como:

$$\sigma(t) = \sigma_{a_g} \text{Sin}(\omega t) \quad (13)$$

$$\tau(t) = \tau_{a_g} \text{Sin}(\omega t) \quad (14)$$

onde σ_{a_g} , τ_{a_g} são, respectivamente, a amplitude de tensão normal e cisalhante referente a seção bruta e ω é a frequências de carregamento. Três razões entre a amplitude de tensão cisalhante e normal ($\lambda = \tau_{a_g}/\sigma_{a_g}$) foram consideradas: (a) tração-compressão totalmente reverso ($\lambda = 0$), (b) tração-torção em fase ($\lambda = 1$) e (c) torção totalmente reversa ($\lambda = \infty$).

A Figura 17 ilustra um dos equipamentos do Laboratório da UnB utilizados nos ensaios de fadiga axial, torcional e axial-torcional.

Para caracterizar o comportamento à fadiga do material e o efeito da presença do microdefeito na resistência à fadiga sob condições de carregamento axial e torcional, testes com $\lambda = 0$ e $\lambda = \infty$ (ASTM E739-10, 2015) foram realizados em espécimes lisos e com microdefeitos. As Figuras 21 e 22 mostram os diagramas de Wöhler para os resultados destes ensaios.

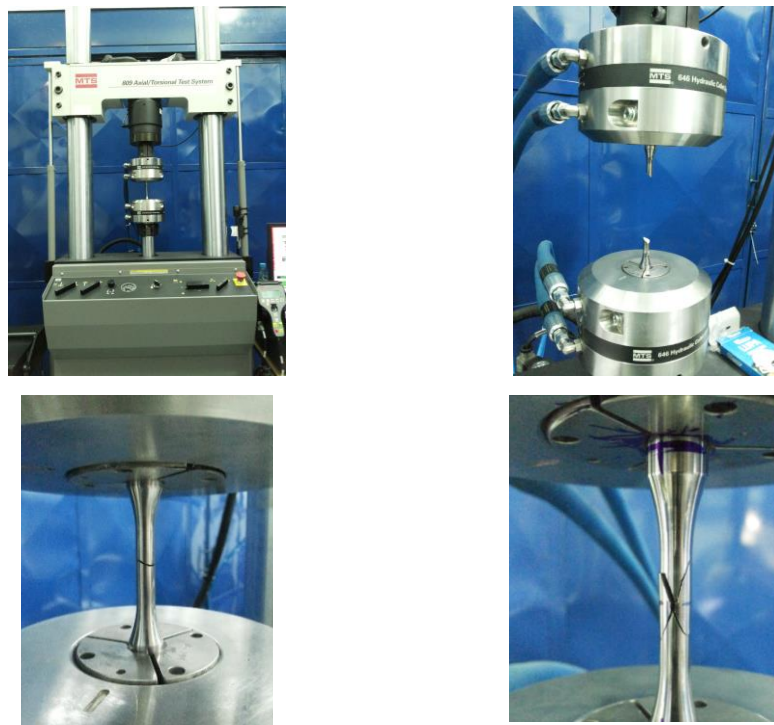


Figura 17 - Equipamento utilizado para realização dos ensaios de fadiga, destacando corpos de prova fraturados após ensaio.

3.5.4 Apresentação e discussão dos resultados experimentais

Na Figura 18 é apresentado o comportamento experimental do material investigado, aço AISI 1045, trefilado, normalizado e eletropolido, submetido aos carregamentos axial, torcional e axial-torcional proporcional. A curva de fadiga multiaxial está apresentada com referência à tensão equivalente de Von Mises, somente com a finalidade de representar de forma comparativa os resultados encontrados para o material sem defeito.

Para caracterizar o material sem defeito foram utilizados 13 corpos de prova para realizar os ensaios de fadiga axial ($R = -1$) utilizando 6 faixas de amplitude de tensão, variando entre 203 e 283 MPa. Sendo 203 MPa considerado *runout* em 2.000.000 de ciclos. Foram utilizados 11 corpos de prova nos ensaios de torção alternada, na faixa de 143 a 197 MPa, sendo 143 a amplitude de tensão de *runout* também em 2.000.000 de ciclos. Para o caso multiaxial foram utilizados 9 corpos de prova para os ensaios axial-torcional na faixa de 109,5 a 149,5 MPa para $\sigma_a = \tau_a$, com uma tensão equivalente variando entre 219 e 299 MPa, onde 219 MPa se refere a tensão de *runout* em 2.000.000 de ciclos.

Os parâmetros das curvas de fadiga (Figura 18) obtidos para este material (AISI 1045) corroboram com dados da literatura (AVILÉS et al., 2011; KIMAKH et al., 2018; MOČKO, 2014; SIMONEAU; NG; ELBESTAWI, 2007; SZALA; LIGAJ, 2016). Ressaltando que o material foi tratado termicamente para homogeneização de sua microestrutura, conforme descrito anteriormente.

No Apêndice E, nas Figuras E1 a E12, pode-se observar o comportamento de propagação das fraturas em espécimes ensaiados com carregamentos de fadiga axial, torcional e axial-torcional para esse aço AISI 1045.

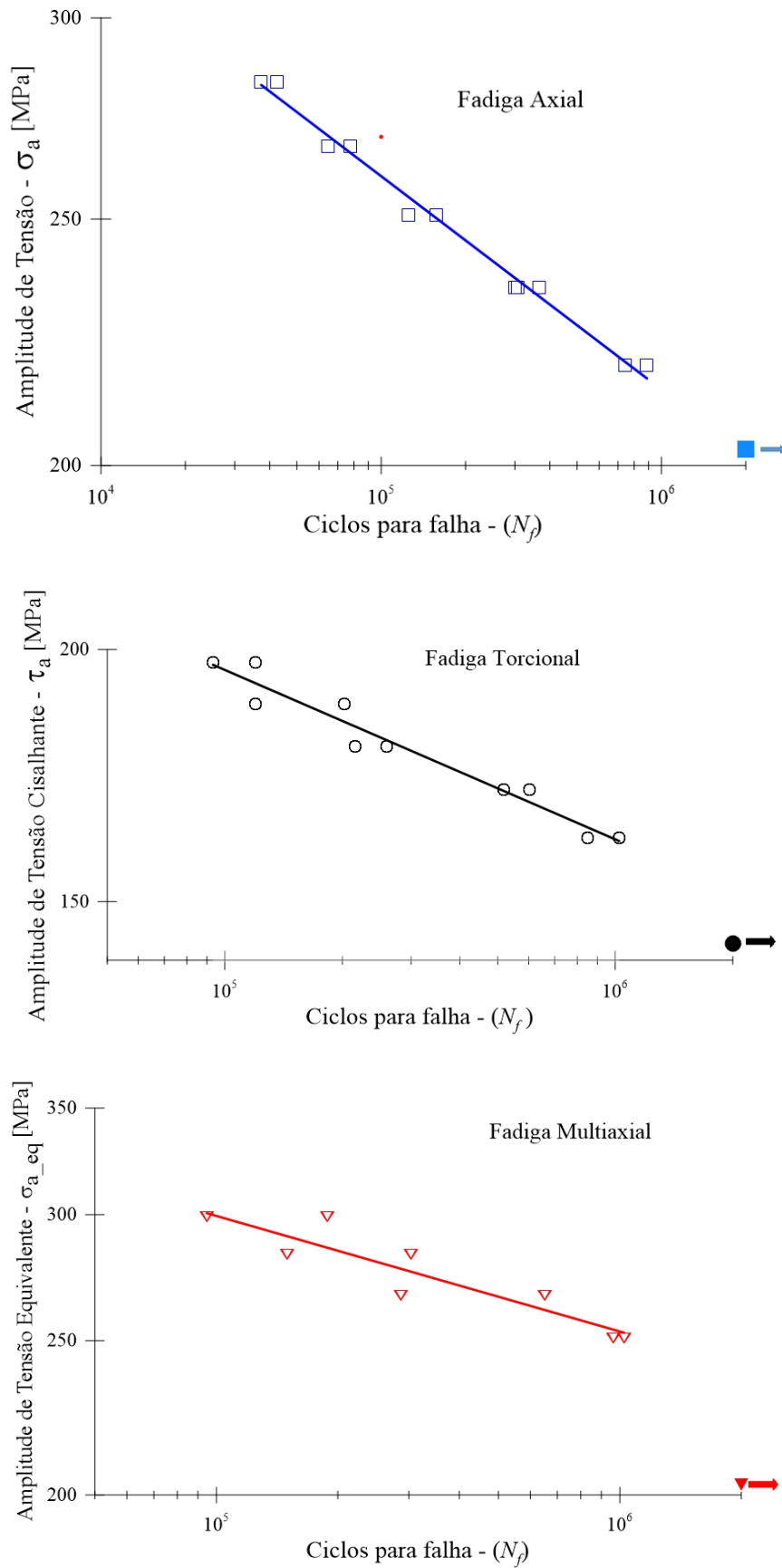


Figura 18 - Comportamento experimental do material liso - aço AISI 1045.

Nos gráficos apresentados na Figura 19, as amplitudes de tensão foram calculadas em termos da área bruta da seção de teste. A variável dependente, vida de fadiga (N_f), é representada na abcissa em escala logarítmica e a variável independente, amplitude de tensão normal (σ_{ag}), ou cisalhamento (τ_{ag}) é representada na ordenada e em escala linear. Os parâmetros experimentais das curvas de Wöhler (linhas sólidas) foram obtidos usando os procedimentos descritos na norma ASTM E739 (ASTM E739-10, 2015) e estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Constantes material de fadiga para curvas experimentais de Wöhler dos espécimes entalhados sob carregamentos de tração-compressão e torção totalmente reversas.

Espécimes		Tração-Compressão	Torcional
Lisos	<i>A</i>	682,6	513,5
	<i>b</i>	-0,0839	-0,0838
$\sqrt{area} = 300 \mu m$	<i>A</i>	866,9	555,3
	<i>b</i>	-0,1128	-0,0925
$\sqrt{area} = 500 \mu m$	<i>A</i>	960,6	633,6
	<i>b</i>	-0,1235	-0,1071
$\sqrt{area} = 700 \mu m$	<i>A</i>	1037,3	664,9
	<i>b</i>	-0,1345	-0,1135

A análise qualitativa dos gráficos apresentados na Figura 19 mostra a clara tendência das curvas de fadiga a se aproximarem à medida que a vida diminui. De forma quantitativa é possível estimar essa convergência entre as curvas por meio do fator de entalhe em fadiga em função da vida, $K_f'(N_f)$, (Equação 15). Os dados que ilustram o comportamento do fator de entalhe em fadiga em função da vida são mostrados na Figura 20. Considerando esse gráfico pode-se observar claramente que K_f' diminui com relação a K_f em vidas longas ($\cong 10^6$) e para vidas curtas ($\cong 10^3$) se aproxima de 1.

$$K_f'(N_f) = \frac{\sigma_{plain}(N_f)}{\sigma_{microdefect}(N_f)} \quad (15)$$

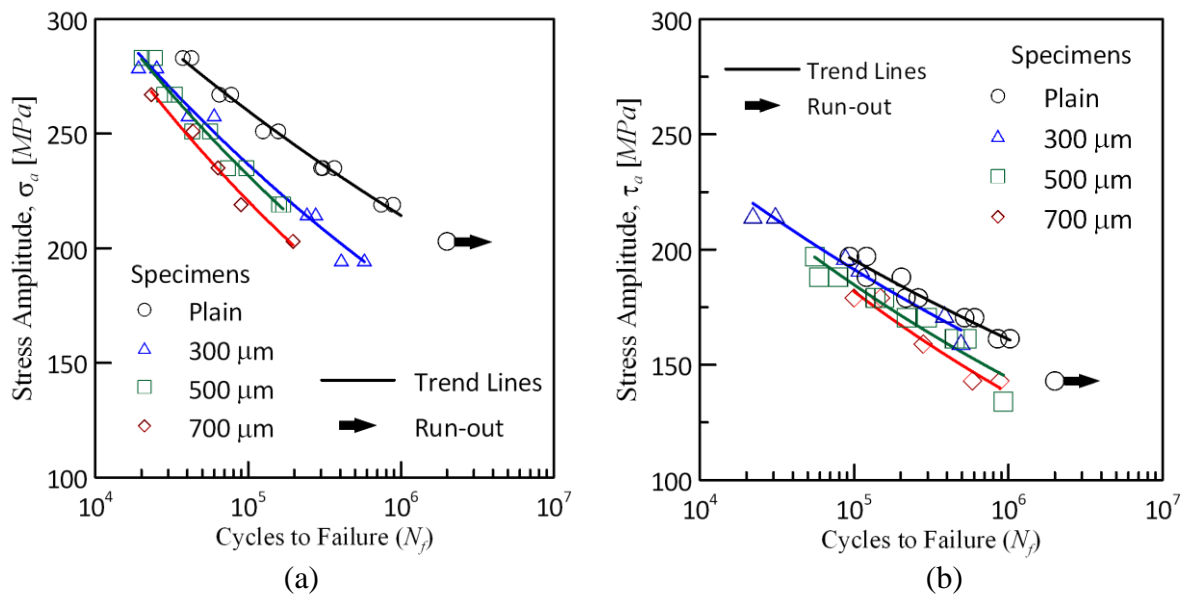


Figura 19 - Diagramas de Wöhler para espécimes lisos e microdefeituosos obtidos por (a) tração-compressão totalmente reversa e (b) torção totalmente reversa (QUEIROZ et al., 2022).

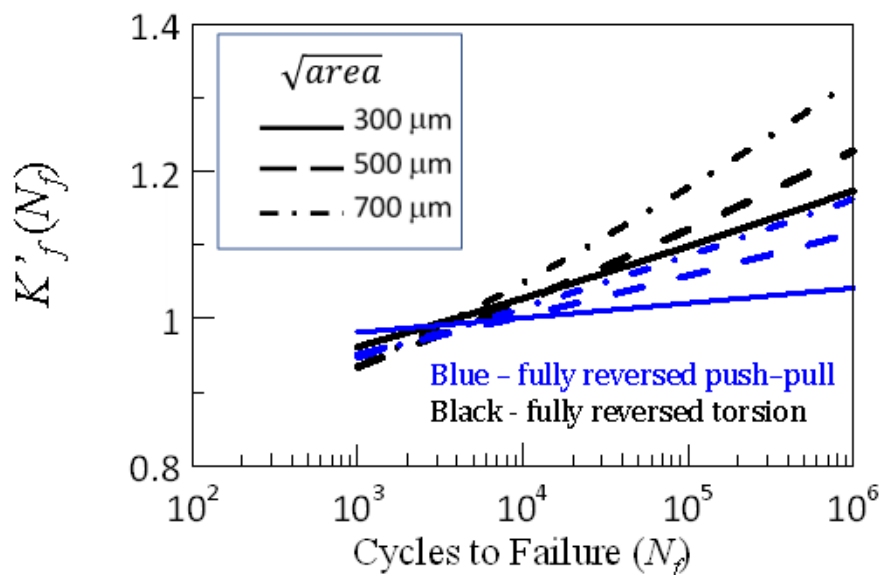


Figura 20 - Dados experimentais para o aço AISI 1045 ilustrando o efeito da presença dos microdefeitos no fator de entalhe à fadiga variando com a vida (QUEIROZ et al., 2022).

(CRUPI et al., 2015)

Além da caracterização das curvas de Wöhler, também foi aplicado a técnica de análise termográfica, cuja metodologia científica utilizada se encontra nas fontes, (ROSA; RISITANO, 2000; STARKE; WU, 2018; CRUPI et al., 2015) para a determinação experimental do limite de resistência a fadiga do material sob condições de fadiga em tração-compressão e torção completamente reversos. Estes dados de limite de fadiga obtidos por termografia são apresentados aqui como complementação e validação inicial das estimativas

realizadas pelas aproximações consideradas neste projeto. Ressalta-se que a metodologia proposta não depende destes ensaios termográficos. Tais resultados são apresentados na Tabela 6. Nessa tabela também são apresentadas as previsões dos limites de resistência a fadiga utilizando relações empíricas (LEE et al., 2005).

Tomando como referência inicial as estimativas realizadas para os limites de fadiga do material liso (sem defeito) utilizando análise termográfica, observa-se que para o material em estudo (aço AISI 1045), nas condições estabelecidas, a aproximação do limite de resistência a fadiga usando as relações empíricas disponíveis na literatura é bastante razoável podendo ser consideradas válidas.

Tabela 6 - Valores empíricos e experimentais dos limites de fadiga axial e torcional do material.

Componentes de tensão (Especímes lisos)	Metodologia		
	Método Empírico (LEE et al., 2005)	Método Experimental Termografia	Extrapolação da Curva SN Experimental (10 ⁶ ciclos)
σ'_0 (MPa)	227	222	214
τ'_0 (MPa)	186	187	161

Aplicando técnicas estatísticas aos dados experimentais, também foram calculadas as médias, $\hat{\sigma}$ (ou $\hat{\tau}$), e os desvios-padrão, $s(*)$, para a resistência a fadiga do material e dos espécimes entalhados nas vidas de 10⁶ e 10⁷ ciclos. Comparando as estimativas da resistência a fadiga em 10⁶ e 10⁷ ciclos (Tabela 7) com os limites de resistência a fadiga obtidos por meio de análise termográfica, verifica-se uma boa correlação para 10⁶ ciclos. Neste caso, observa-se, que os limites de resistência a fadiga para tração-compressão foram: $\sigma'_0 = 222 MPa$ e $\sigma(10^6) = 214 MPa$ (diferença de 3,7%). Para a condição de torção completamente alternada, estes valores respectivos foram: $\tau'_0 = 187 MPa$ e $\tau(10^6) = 161 MPa$ (diferença de 16%).

Tabela 7 - Estimativa das resistências à fadiga (MPa) em 10^6 e 10^7 Ciclos por Extrapolação.

Espécimes	$\sigma(N_f)$				$\tau(N_f)$			
	10^6		10^7		10^6		10^7	
	$\hat{\sigma}$	$s(\sigma)$	$\hat{\sigma}$	$s(\sigma)$	$\hat{\tau}$	$s(\tau)$	$\hat{\tau}$	$s(\tau)$
lisos	214	4	177	7	161	5	133	10
$\sqrt{area} = 300 \mu m$	182	9	141	12	155	8	125	12
$\sqrt{area} = 500 \mu m$	174	12	131	16	144	12	113	21
$\sqrt{area} = 700 \mu m$	162	10	119	14	139	7	107	11

3.5.5 Validação da metodologia proposta utilizando dados experimentais

3.5.5.1 Estimativa da vida (N_0) e resistência (σ_0) de referência para espécimes lisos e microdefeituosos

Considerando a Eq.8 a vida de referência (N_0) para o aço AISI 1045 foi de 8,93E+05 ciclos. Por uma questão de simplicidade, adotou-se $N_0 = 10^6$ ciclos. Conforme descrito anteriormente, a ordenada (σ_0) do ponto associado à vida de referência (N_0) na curva empírica é obtida por meio das Eqs. 2 e 3 propostas por Murakami. A Tabela 8 apresenta os valores estimados dos limites de fadiga para os espécimes com diferentes tamanhos de microdefeitos.

Tabela 8 - Valores estimados para resistência à fadiga de referência (MPa).

\sqrt{area}	Axial (σ_0)	Torcional (τ_0)
300 μm	182	146
500 μm	168	134
700 μm	158	127

3.5.5.2 Estimativa da resistência à fadiga para 10^3 ciclos

Para estimar a resistência a fadiga em 10^3 ciclos é necessário estimar o fator de entalhe em fadiga, k_f , e o fator de sensibilidade ao entalhe em 10^3 , q'_{1000} . Considerando as estimativas do limite de resistência a fadiga do material utilizando fatores modificadores (ver Equações 10, 11 e 12) e o limite de resistência à tração, pode-se calcular o fator de entalhe

em fadiga simplesmente dividindo σ'_S por σ_S (na condição de tração-compressão) ou τ'_S por τ_S (na condição de torção reversa). Tais resultados são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Fator de entalhe à fadiga, k_f .

\sqrt{area}	$k_{f\sigma}$	$k_{f\tau}$
300 μm	1,24	1,28
500 μm	1,35	1,39
700 μm	1,43	1,47

Considerando a relação empírica apresentada por Lee YL (LEE et al., 2005) é possível avaliar que o fator q'_{1000} é da ordem de 0.18. Assim, substituindo os valores de k_f e de q'_{1000} na Equação 9 são encontrados para o fator de entalhe em 10^3 os valores apresentados na Tabela 10. Nota-se que os valores obtidos são próximos da unidade, e estão de acordo com os resultados apresentados na Figura 20 que mostra que em 10^3 ciclos o valor do fator de entalhe de fadiga com a vida, $k'_f(N_f)$, é muito próximo a unidade. Na verdade, se considerarmos a dispersão dos resultados experimentais, seria aceitável admitir que no caso em estudo o valor de K'_f seja estatisticamente igual a unidade em 10^3 ciclos. Dessa forma, considerando tais resultados, será assumido que a resistência a fadiga dos espécimes com microdefeito em 10^3 ciclos será igual a resistência a fadiga do material liso nessa mesma vida, ou seja: $\sigma_s = 0,75 \times 647 = 485,3 \text{ MPa}$ (BANNANTINE; COMER; HANDROCK, 1990; LEE et al., 2005) e $\tau_s = 0,90 \times 0,577 \times 647 = 336,0 \text{ MPa}$ (LAGODA et al., 2018; LEE et al., 2005).

Tabela 10 - Fator de entalhe à fadiga em 10^3 ciclos, k'_f .

\sqrt{area} (μm)	$k'_{f\sigma}$	$k'_{f\tau}$
300	1,04	1,05
500	1,06	1,07
700	1,08	1,08

3.5.5.3 Representação das curvas empíricas de fadiga

Nesta representação destaca-se o comportamento axial e torcional de espécimes lisos e com microdefeitos. Nas Figuras 21 e 22 são apresentados os gráficos que mostram os diagramas de dispersão dos dados obtidos experimentalmente e as respectivas curvas de fadiga obtidas com base nas estimativas empíricas para as resistências a fadiga em 10^3 e 10^6 ciclos, obtidos anteriormente. É interessante apontar que as previsões realizadas considerando o modelo empírico proposto apresenta resultados relativamente precisos independentemente da dimensão do microdefeito e do tipo de esforço aplicado. A Tabela 11 resume os erros máximos cometidos pelo uso do método proposto, onde o erro foi calculado como:

$$Error(\%) = 100 \times \max \left| \left(\frac{\sigma_{mod} - \sigma_{exp}}{\sigma_{mod}} \right) \right| \quad (16)$$

onde σ_{mod} e σ_{exp} representam a amplitude de tensão estimada pelo modelo e a amplitude de tensão observada experimentalmente, onde diferenças positivas e negativas são consideradas na estimativa.

A Tabela 11 mostra que, quando usado para prever os resultados gerados, a precisão obtida pelo método é adequada para aplicações de engenharia (erro máximo da ordem de 16%).

Tabela 11 - Precisão na previsão da resistência à fadiga para os espécimes com microdefeitos.

Espécimes	Erro Maximo (%)	
	Tração-Compressão	Torção
Lisos	13,0	16,0
300 μm	12,6	7,0
500 μm	8,0	11,0
700 μm	8,4	11,0

A análise destas estimativas apresentadas na Tabela 11 podem ser ampliadas observando o comportamento dos dados experimentais de tração-compressão e torção alternada diante das curvas estimadas por 2 pontos (Figuras 21 e 22).

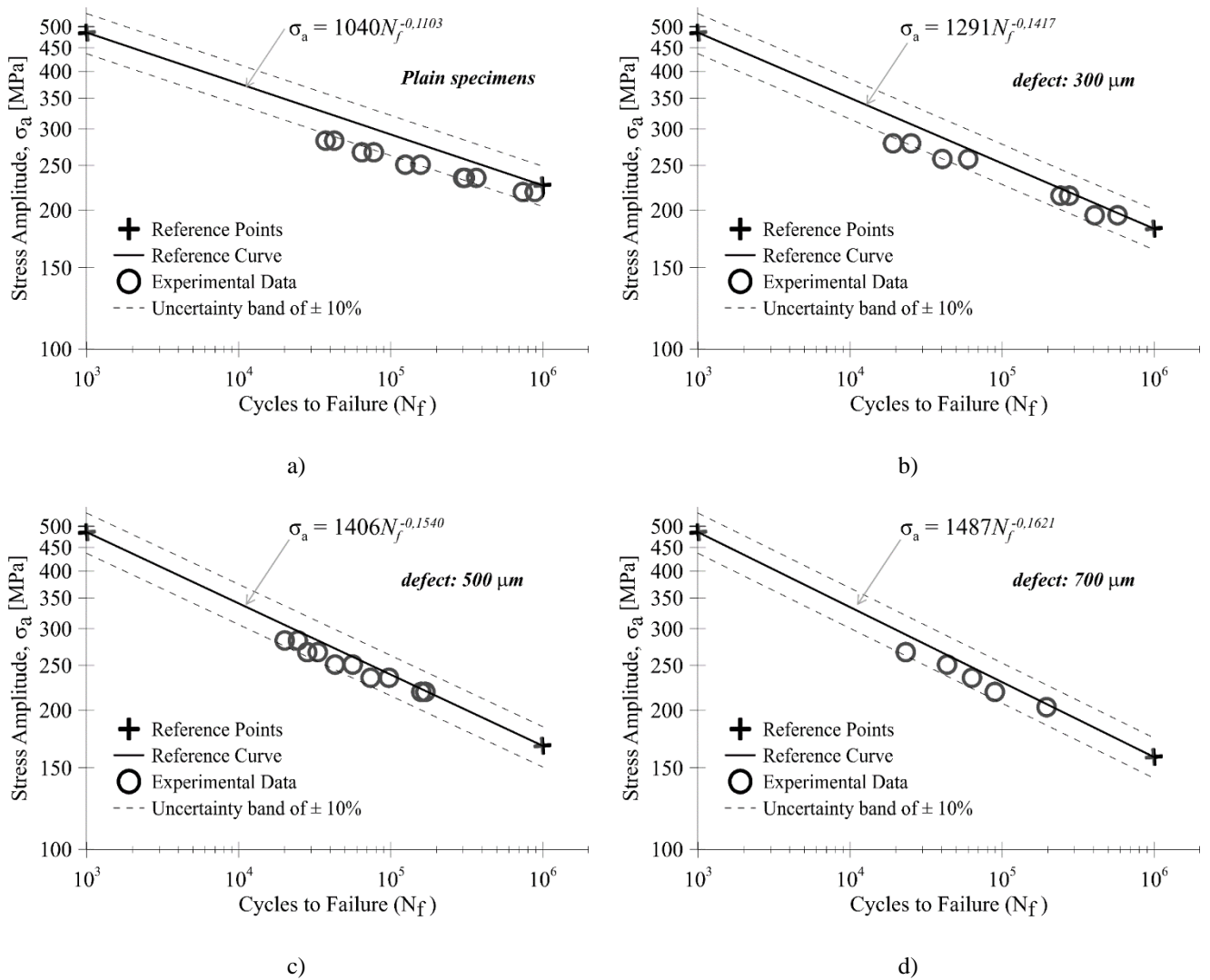


Figura 21 - Comportamento dos dados experimentais tração-compressão diante das curvas estimadas por 2 pontos (QUEIROZ et al., 2022).

As Figuras 21 e 22 apresentam o comportamento das curvas SN estimadas pela metodologia desta tese utilizando os dados experimentais de espécimes do material AISI 1045. Os resultados estimados para fadiga axial se comportam relativamente bem em uma banda de incerteza com variação de $\pm 10\%$. Enquanto os dados estimados para fadiga torcional se comporta melhor em uma banda de $\pm 15\%$.

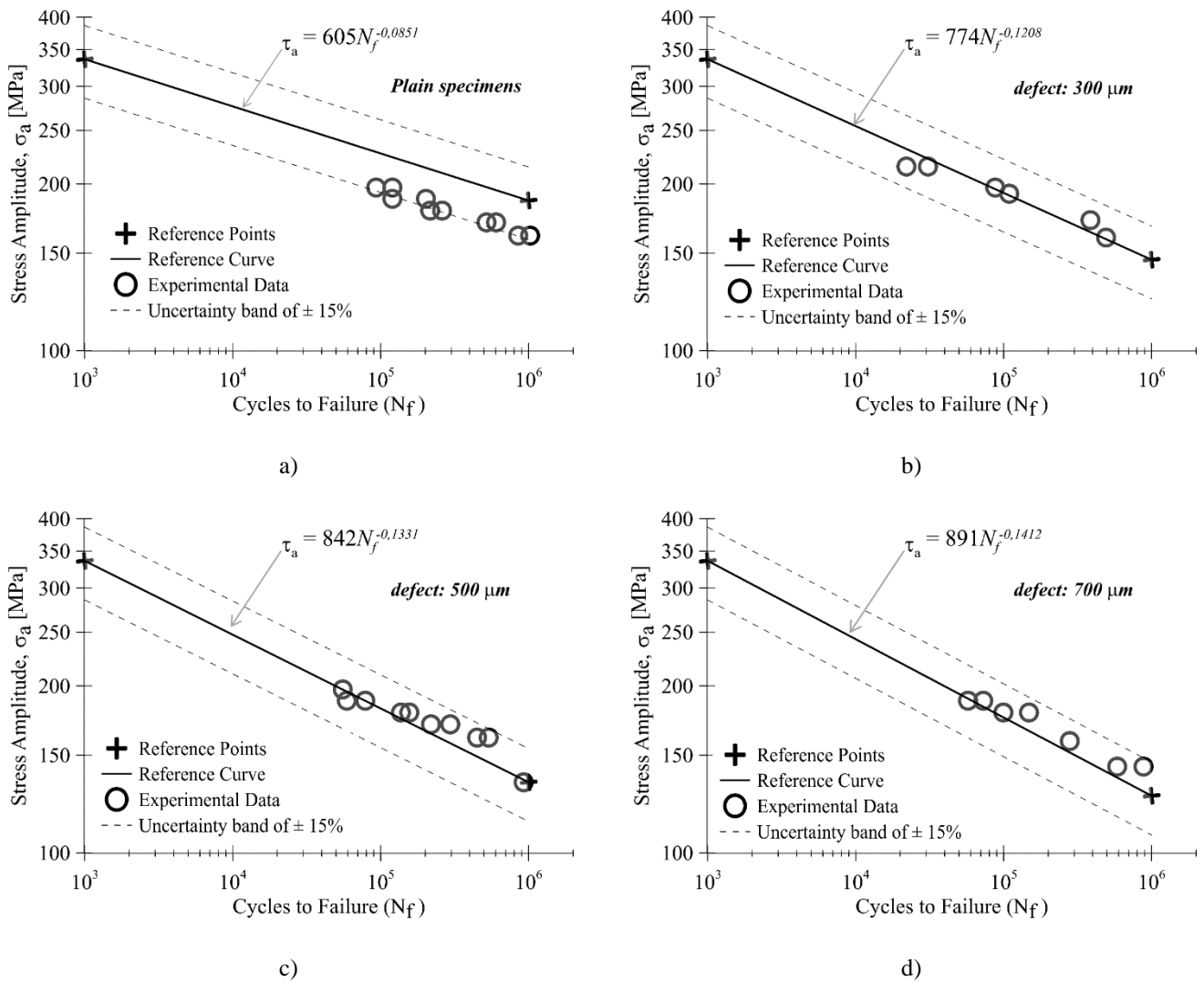


Figura 22 - Comportamento dos dados experimentais de torção alternada diante das curvas estimadas por 2 pontos (QUEIROZ et al., 2022).

Estas curvas SN estimadas pela metodologia proposta neste projeto (Figuras 21 e 22) são as principais referências utilizadas para calibração dos três modelos multiaxiais (FS, SWT, MCWM) podendo inclusive ser testadas para calibrar outros modelos não abordados nesta tese.

4. ESTRATÉGIA PROPOSTA PARA ESTIMATIVA DE VIDA À FADIGA EM MATERIAIS COM MICRODEFEITOS SOB CONDIÇÕES DE CARREGAMENTO MULTIAXIAL

Existem vários critérios publicados na literatura capazes de estimar a vida em fadiga de componentes submetidos a estados multiaxiais de tensão uniformemente distribuídos (CARPINTERI et al., 2008, 2013; DARRELL SOCIE & GARY MARQUIS, 1999; FATEMI, A; SOCIE, 1988; LAZZARIN, P.; SUSMEL, 2003; MAMIYA; CASTRO; ARAÚJO, 2014; (SMITH; TOPPER; WATSON, 1970); SOCIE, 1987; SUSMEL, L; LAZZARIN, 2002). Entretanto, quando aplicados em situações em que se observa a presença de gradientes de tensão tais, como as provocadas pela presença de concentradores de tensão ou em análise de fadiga sob condições de *fretting*, a utilização de tais modelos ainda é uma questão aberta e carente de estudos. A análise de componentes entalhados em regime de fadiga de vidas intermediária e longa, pode ser conduzida usando a Teoria de Distâncias Críticas (TCD) associada a um modelo de fadiga multiaxial (ARAÚJO et al., 2007; SÁ et al., 2018; SUSMEL, 2008; SUSMEL; TAYLOR, 2003, 2007; TAYLOR; BOLOGNA; BEL KNANI, 2000). Do ponto de vista mecânico, deve-se notar que, o TCD envolve um tratamento rigoroso para incluir o efeito da distribuição de tensões elásticas em torno de entalhes/defeitos no comportamento à fadiga, enquanto algumas outras abordagens, como o fator de entalhe de fadiga, são de natureza empírica. Apesar da teoria TCD ser uma estratégia de sucesso na previsão da vida de fadiga de componentes entalhados, a aplicação de tal metodologia é demasiadamente custosa sob o ponto de vista numérico (por exigir a descrição do campo de tensões próximo ao concentrador de tensões e pela aplicação de técnicas de identificação de planos críticos) e experimental (por exigir a calibração dos modelos de plano crítico e da curva que relaciona a distância crítica a vida).

A abordagem proposta nesse estudo também utiliza critérios de plano crítico, mas considera as tensões nominais atuantes no ponto em que se encontra o microdefeito, o que minimiza de forma significativa o custo computacional e experimental. Reforçamos aqui que a área líquida (*Net área*) da seção foi considerada quando seu impacto foi superior à 5%. Os critérios de fadiga multiaxial usados no presente trabalho são brevemente descritos a seguir.

4.1 Modelos de previsão de vida à fadiga

4.1.1 Modelo de Fatemi e Socie

O modelo de Fatemi e Socie (FS) (FATEMI; KURATH, 1988; FATEMI; SOCIE, 1988) é uma modificação do modelo de Brown & Miller e utiliza a amplitude de deformação cisalhante equivalente, P_{FS} , este parâmetro considera que as condições de nucleação e crescimento de pequenas fissuras dependem da amplitude máxima de deformação de cisalhamento, $\frac{\Delta\gamma_{max}}{2}$, e da tensão normal máxima σ_n^{max} no plano de atuação da amplitude da máxima deformação cisalhante. Neste projeto o modelo de Fatemi-Socie foi estruturado utilizando uma rotina computacional que maximiza o parâmetro P_{FS} . Essa rotina em MatLab mostrou que o parâmetro " κ ", que é variável com a vida, tendeu para o valor unitário ($k \cong 1$) para o material investigado (aço AISI 1045), com uma diferença inferior à 3% entre o valor maximizado e 1. Considerando uma análise linear elástica, o parâmetro de Fatemi-Socie é escrito como (Eq. 17) e seu princípio físico é ilustrado na Figura 23.

$$P_{FS} = \frac{\tau_a}{G} \left(1 + \kappa \frac{\sigma_n^{max}}{\sigma_y} \right) \quad (17)$$

onde κ é um parâmetro material aplicado para demonstrar a influência da tensão normal no dano gerado pelo processo de fadiga e σ_y é a tensão de escoamento do material.

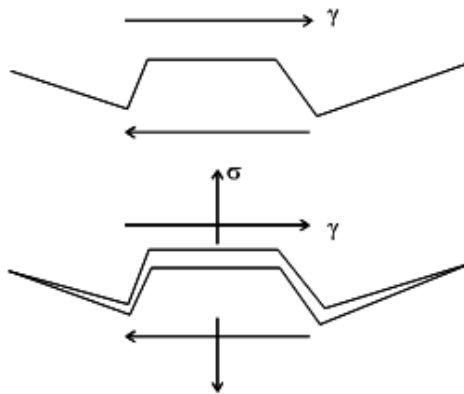


Figura 23 - Ilustração da base física para o modelo de Fatemi-Socie.

Para o cálculo da vida à fadiga usando modelos baseados em tensão, a relação entre o parâmetro de FS, P_{FS} , e o número de ciclos para falha, N_f , é representado por meio da Eq. 18.

$$P_{FS} = A_{FS} N_f^{b_{FS}} \quad (18)$$

onde A_{FS} e b_{FS} são parâmetros obtidos a partir da calibração do modelo utilizando-se dados de fadiga obtidos, por exemplo, a partir de ensaios de torção completamente reversa.

4.1.2 Modelo de Smith, Watson e Topper

O modelo proposto por Smith et al. (SMITH; WATSON; TOPPER, 1970) é aplicado predominantemente em situações onde a nucleação de pequenas fissuras ocorre nos planos onde a deformação ou tensão de tração é máxima sob determinadas histórias de carregamento. O modelo é recomendado por exemplo para ferro fundido e aços inoxidáveis. Este modelo, comumente referido como parâmetro SWT, P_{SWT} , sendo baseado na gama de deformação principal, $\Delta\epsilon_1$ e na máxima tensão normal no plano da gama de deformação principal, σ_n^{max} . Uma versão baseada em tensão do parâmetro SWT pode ser escrita como (Eq. 19) e seu princípio físico é ilustrado na Figura 24.

$$P_{SWT} = \frac{\sigma_{1,a} \sigma_n^{max}}{E} \quad (19)$$

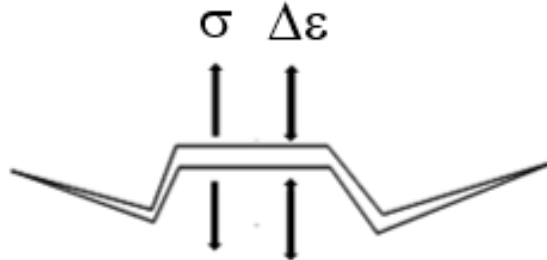


Figura 24 - Ilustração da base física para o modelo de Smith-Watson-Topper.

O cálculo da vida à fadiga utilizando o parâmetro P_{SWT} é obtido por meio de:

$$P_{SWT} = A_{SWT} N_f^{b_{SWT}} \quad (20)$$

onde A_{SWT} e b_{SWT} são parâmetros obtidos a partir da calibração do modelo utilizando-se dados de fadiga obtidos, por exemplo, a partir de ensaios sob tração-compressão (*push-pull conditions*).

4.1.3 Modelo de Susmel e Lazzarin

O modelo de Susmel e Lazzarin, (SUSMEL, L; LAZZARIN, 2002), (LAZZARIN, P.; SUSMEL, 2003) também conhecido como método da curva de Wöhler modificada (MCWM), define como plano crítico o plano em que a amplitude da tensão cisalhante, τ_a , é máxima. Ainda segundo esse modelo, a tensão normal máxima, σ_n^{max} , neste plano crítico contribui para a formação de fissuras (SUSMEL, 2009), (GADOUINI; NADOT; REBOURS, 2008), (BERETTA; FOLETTI; VALIULLIN, 2011). A previsão da vida de fadiga para um estado de tensão multiaxial pode ser realizada usando a Eq. (21).

$$N_f = \left(\frac{\tau_a(\theta, \phi)_{crit}}{A_{\rho(\theta, \phi)_{crit}}} \right)^{1/b_{\rho(\theta, \phi)_{crit}}} \quad (21)$$

A Eq. 22 representa uma curva de Wöhler parametrizada em termos do parâmetro ρ , definido pela Eq. 20 que quantifica o grau de multiaxialidade existente no plano crítico.

$$\rho(\theta, \phi)_{crit} = \frac{\sigma_{n,max}(\theta, \phi)_{crit}}{\tau_a(\theta, \phi)_{crit}} \quad (22)$$

A partir da definição do grau de multiaxialidade no plano crítico (ρ), os parâmetros que caracterizam a curva $\tau_a(\theta, \phi)_{crit}$ versus N_f , respectivamente, $A_{\rho(\theta, \phi)_{crit}}$ (coeficiente da curva) e $b_{\rho(\theta, \phi)_{crit}}$ (expoente da curva), podem ser estimados por meio das Eqs. 23 e 24.

$$A_{\rho(\theta, \phi)_{crit}} = [A_1 - A_0] \rho(\theta, \phi)_{crit} + A_0 = m_a \rho(\theta, \phi)_{crit} + A_0 \quad (23)$$

$$b_{\rho(\theta, \phi)_{crit}} = [b_1 - b_0] \rho(\theta, \phi)_{crit} + b_0 = m_b \rho(\theta, \phi)_{crit} + b_0 \quad (24)$$

onde A_1 e b_1 , são estimados a partir dos parâmetros das curvas de fadiga estimadas sob condições de tração-compressão (*push-pull conditions*, $\rho = 1$) e A_0 e b_0 são estimados a partir dos parâmetros das curvas de fadiga estimadas sob condições de torção totalmente reversa ($\rho = 0$), conforme ilustrado na Figura 25 do tópico 4.2.

4.2 Implementação do Modelo não local

Se as curvas SN estimadas pelos pontos (N_0, σ_0) e (N_S, σ_S) representarem de forma adequada os comportamentos a fadiga do material com microdefeito em condições de carregamento tração-compressão (*push-pull conditions*) e torção completamente reversa,

então um procedimento não local baseado em critérios de plano crítico poderá ser utilizado na previsão da vida de fadiga em condições multiaxiais de carregamento.

Na figura 25 apresenta-se uma representação esquemática da aplicação do método não local utilizando a curva de Wöhler modificada, obtidas a partir dos pontos (N_0, σ_0) e (N_S, σ_S) e da máxima amplitude da tensão cisalhante, τ_a , e do grau de multiaxialidade, o parâmetro, ρ , estimados a partir do tensor das tensões nominais atuantes no ponto material, O, que representa a posição do defeito.

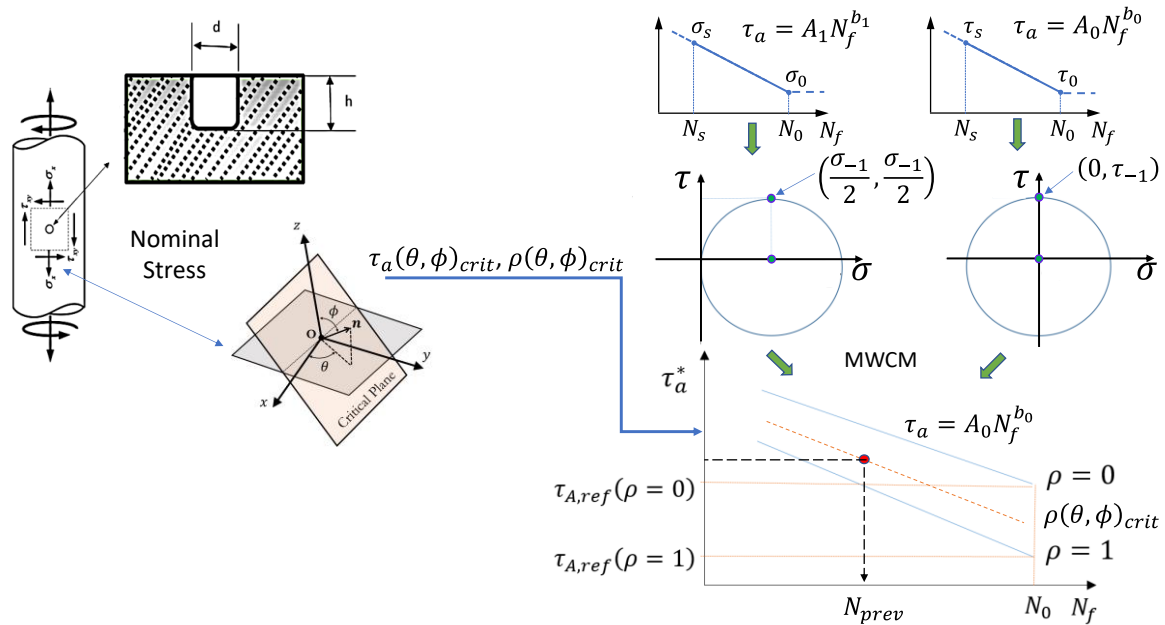


Figura 25 - Representação esquemática da calibração da Curva de Wöhler Modificada e aplicação do método não local baseado no critério do plano crítico para previsão de vida de componentes com pequenos defeitos (QUEIROZ et al., 2022).

4.3 Experimentos de fadiga multiaxial

Os ensaios sob condições de carregamento axial-torcionais (apresentados na Tabela 12) foram realizados com espécimes lisos e microdefeituosos. Um total de 32 corpos de prova (8 lisos e 24 com microdefeitos que geraram \sqrt{area} de 300, 500 e 700 μm) foram testados com $\lambda = 1$ ($\tau_a = \sigma_a$). Para as 4 curvas de fadiga multiaxial foram utilizados 4 níveis de amplitude de tensão com 2 repetições.

Os resultados dos testes dos espécimes lisos foram usados principalmente para avaliar se os modelos multiaxiais (MCWM, FS, SWT) podem estimar consistentemente a vida útil para este material. Os 24 ensaios realizados com corpos de prova microdefeituosos foram utilizados para investigar a influência da presença desses microdefeitos no comportamento

à fadiga na região de Wöhler e validar a metodologia proposta para estimativa de vida em fadiga multiaxial.

Tabela 12 - Ensaios de fadiga para espécimes lisos e microdefeituosos sob carregamento combinado axial-torcional em fase e $\lambda = 1$ ($\tau_a = \sigma_a$) [MPa].

Espécimes lisos		Espécimes microdefeituosos - \sqrt{area} (μm)					
		300		500		700	
σ_a	N_f	σ_a	N_f	σ_a	N_f	σ_a	N_f
125,5	9,63E+05	115,0	6,43E+05	113,0	5,51E+05	100,0	6,38E+05
125,5	1,03E+06	115,0	8,15E+05	118,0	4,96E+05	100,0	4,46E+05
133,5	6,51E+05	125,0	3,05E+05	125,5	2,62E+05	109,5	2,74E+05
133,5	2,86E+05	125,0	4,19E+05	125,5	1,77E+05	109,5	2,00E+05
141,5	3,04E+05	135,0	2,26E+05	133,5	1,26E+05	125,5	1,05E+05
141,5	1,49E+05	135,0	1,96E+05	135,0	1,31E+05	125,5	6,51E+04
149,5	9,46E+04	140,0	1,19E+05	141,5	8,19E+04	135,0	6,89E+04
149,5	1,88E+05	140,0	9,79E+04	141,5	1,60E+05	135,0	4,44E+04

4.4 Calibração dos modelos multiaxiais

A calibração dos modelos de fadiga multiaxiais foi realizada considerando as curvas de fadiga empíricas estimadas para os espécimes com microdefeitos (ver Figuras 21 e 22). Assim, para cada \sqrt{area} processou-se a estimativa dos parâmetros que caracterizam os modelos de fadiga multiaxial.

4.4.1 Resultados da calibração dos modelos de Fatemi-Socie (FS), Smith-Watson-Topper (SWT) e Susmel e Lazzarin (MCWM)

4.4.1.1 Calibração dos modelos de FS e SWT

Para a calibração dos modelos de Fatemi-Socie (FS) e de Smith-Watson-Topper (SWT) foram utilizadas, respectivamente, as estimativas dos limites de fadiga em torção e em tração-compressão em 10^6 ciclos (apresentados na Tabela 6) e as estimativas dos limites de fadiga em torção e em tração-compressão em 10^3 ($\tau_s = 336 MPa$ e $\sigma_s = 485 MPa$). A partir desses dados, os parâmetros de FS, P_{FS} , e de SWT, P_{SWT} , foram estimados utilizando técnica de pesquisa dos planos críticos definidos para cada um dos modelos (FATEMI; KURATH, 1988; FATEMI; SOCIE, 1988); (SMITH; WATSON; TOPPER, 1970). Nas Tabelas 13 e 14 são apresentadas, para cada microdefeito, os coeficientes e os expoentes das

curvas $P_{FS} - N_f$ e $P_{SWT} - N_f$, bem como os dados usados nas suas estimativas.

Tabela 13 - Valores estimados dos Parâmetros do modelo de Fatemi-Socie.

Espécimes	10 ³ Ciclos		10 ⁶ Ciclos			Parâmetro FS	
	$\tau_s [MPa]$	P_{FS_s}	$\tau_0 [MPa]$	P_{FS_0}	Plano Crítico	A_{FS}	b_{FS}
Lisos	336,0	5,218E-3	187,7	2,57E-3	10,20°	1,06E-2	-0,1025
300 μm			146,0	1,95E-3	8,59°	1,40E-2	-0,1425
500 μm			134,0	1,78E-3	8,06°	1,56E-2	-0,1582
700 μm			127,0	1,69E-3	7,74°	1,61E-2	-0,1632

Na Figura 26 é apresentado o comportamento dos resultados experimentais de fadiga multiaxial mediante o Parâmetro do modelo de FS utilizando a metodologia proposta.

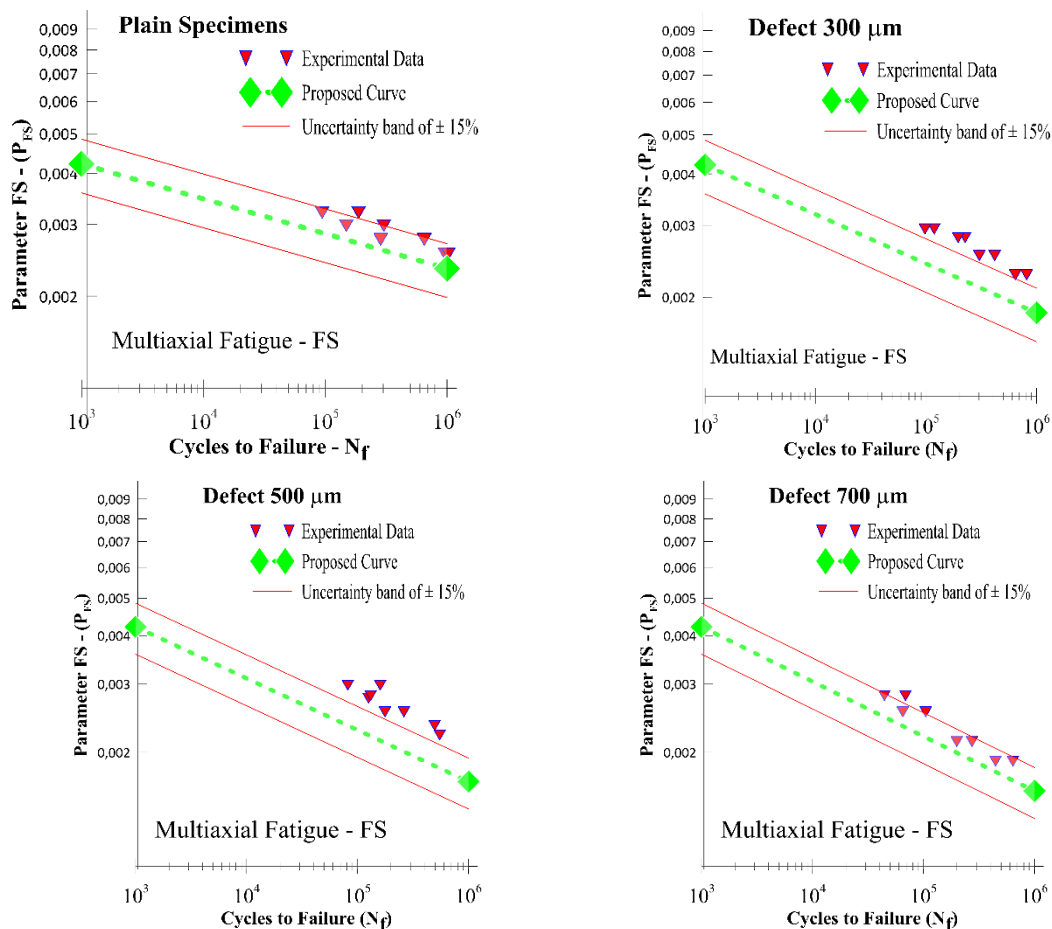


Figura 26 - Comportamento da vida à fadiga multiaxial com relação ao Parâmetro FS. Pontos (cheios) e linhas (pontilhadas) verdes representam valores estimados para vida e pontos (cheios) roxos representam valores para vida à fadiga multiaxial experimental e linhas (cheias) roxas a banda de incerteza $\pm 15\%$.

Tabela 14 - Valores estimados dos Parâmetros do modelo de Smith-Watson-Topper.

Espécimes	10 ³ Ciclos		10 ⁶ Ciclos		Parâmetro SWT	
	σ_s [MPa]	P_{SWT_s} [MPa]	σ_0 [MPa]	P_{SWT_0} [MPa]	A_{SWT}	b_{SWT}
Lisos			226,5	0,246	5,18	0,2206
300 μm	485,3	1,129	182,4	0,160	7,98	-0,2829
500 μm			167,5	0,135	9,44	-0,3075
700 μm			158,4	0,120	10,60	-0,3245

Na Figura 27 é apresentado o comportamento dos resultados experimentais de fadiga multiaxial mediante o Parâmetro do modelo de SWT utilizando a metodologia proposta.

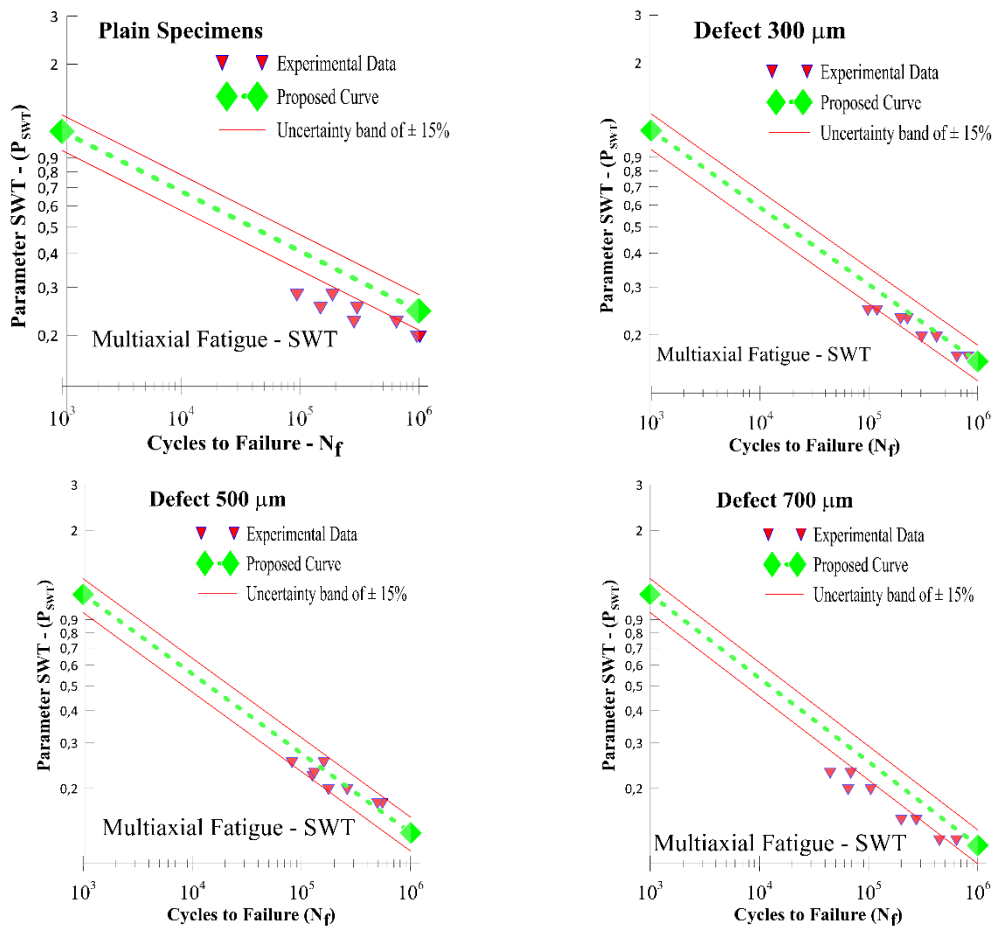


Figura 27 - Comportamento da vida à fadiga multiaxial com relação ao Parâmetro SWT. Pontos (cheios) e linhas (pontilhadas) verdes representam valores estimados para vida e pontos (cheios) roxos representam valores para vida à fadiga multiaxial experimental e linhas (cheias) roxas bandas de incerteza de $\pm 15\%$.

4.4.1.2 Calibração do modelo MCWM

A calibração dos parâmetros que descrevem a curva de Wöhler modificada foi realizada considerando os procedimentos descritos no item 4.1.3 desse texto. Na Tabela 15 são apresentados os principais dados e parâmetros utilizados para a calibração da curva de Wöhler modificada para cada tipo de defeito estudado nesse projeto.

Tabela 15 - Tabela resumo com os valores necessários para estimar os Parâmetros $A_{\rho(\theta,\phi)_{crit}}$ e $b_{\rho(\theta,\phi)_{crit}}$ do Modelo de Susmel e Lazzarin a partir dos dados de fadiga.

\sqrt{area} (μm)	Dados de Fadiga			Parâmetros das Curvas $\sigma - N$ e $\tau - N$				Parâmetros das Curvas $\tau_{a_{\rho=0}} - N$ e $\tau_{a_{\rho=1}} - N$				Inclinação das Eqs.(23) e (24)	
	N ciclos	σ_a MPa	τ_a MPa	A_σ	b_σ	A_τ	b_τ	A_1	b_1	A_0	b_0	m_A	m_b
300	10^3	485	336	1291	-0,14	773	-0,12	645	-0,14	773	-0,12	-127,6	-0,021
	10^6	182	146										
500	10^3	485	336	1406	-0,15	842	-0,13	703	-0,15	842	-0,13	-139,5	-0,021
	10^6	168	134										
700	10^3	485	336	1486	-0,16	889	-0,14	743	-0,16	889	-0,14	-145,5	-0,021
	10^6	158	127										

Na Figura 28 é apresentado o comportamento dos resultados experimentais de fadiga multiaxial mediante os parâmetros do modelo de MCWM utilizando a metodologia proposta neste projeto. É importante observar nesta Figura 28 que 100% dos dados experimentais se encontram dentro da banda de desvio de $\pm 15\%$. As curvas estimadas pelos 2 pontos estabelecidos pela metodologia proposta se ajustam de forma bastante relevante diante dos dados analisados, isso considerando tanto os espécimes lisos quanto os microdefeituosos.

Dentro da metodologia proposta, vale ressaltar uma característica de destaque para o modelo MCWM que contempla em sua calibração dados das curvas SN de tração-compressão e torção alternada, enquanto o modelo de FS contempla diretamente dados da curva torção alternada e o modelo SWT contempla dados da curva SN de tração-compressão. Isto se dá em função das propriedades mecânicas estáticas e cíclicas utilizadas na calibração de cada um dos modelos.

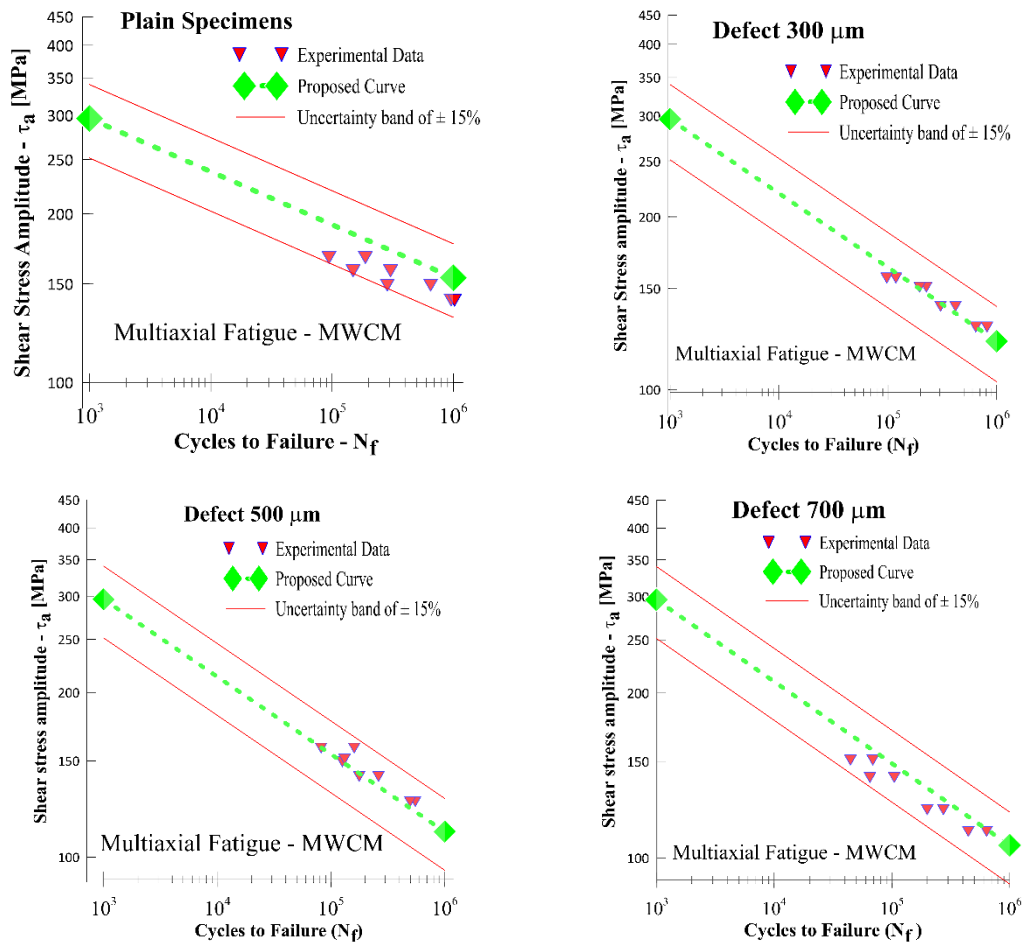


Figura 28 - Comportamento da vida à fadiga multiaxial com relação aos Parâmetros do modelo MCWM. Pontos (cheios) e linhas (pontilhadas) verdes representam valores estimados para vida e pontos (cheios) roxos representam valores para vida à fadiga multiaxial experimental e linhas (cheias) rochas bandas de incerteza $\pm 15\%$.

4.5 Validação do método para as condições multiaxiais

A avaliação da estratégia proposta para a previsão de vida de componentes microdefeituosos é realizada através da produção de estimativas de vida dos ensaios de fadiga apresentados na Tabela 5. Os gráficos mostrados na Figura 29 comparam as vidas observadas experimentalmente com as estimadas considerando, respectivamente, os modelos de Fatemi-Socie (Figura 29.a), Smith-Watson-Topper (Figura 29.b) e Susmel-Lazzarin (Figura 29.c). Nesses gráficos, a linha diagonal sólida corresponde a uma combinação perfeita entre as vidas estimadas e observadas. Já as duas linhas tracejadas definem o fator de 2 e as duas linhas traço-ponto o fator de 3 larguras de banda.

Considerando as previsões de vida dos espécimes microdefeituosos realizadas com base nos modelos SWT e MCWM, verifica-se que a maioria dos resultados caíram dentro

de um fator de duas larguras de banda (92% para MCWM e 79% para o SWT), enquanto 100% (MCWM) e 92% (SWT) caíram dentro da banda de 3 e 100% (SWT) dentro da banda de quatro. Para ambos os modelos as previsões ficaram do lado não conservador (63% para MCWM e 88% para SWT).

Já as previsões realizadas com base no modelo de FS verificou-se que 13% caíram dentro de um fator de duas larguras de banda, 29% dentro da banda de 3 e apenas 42% dentro da banda de quatro. Para esse modelo específico, as previsões foram majoritariamente conservadoras (100% das estimativas).

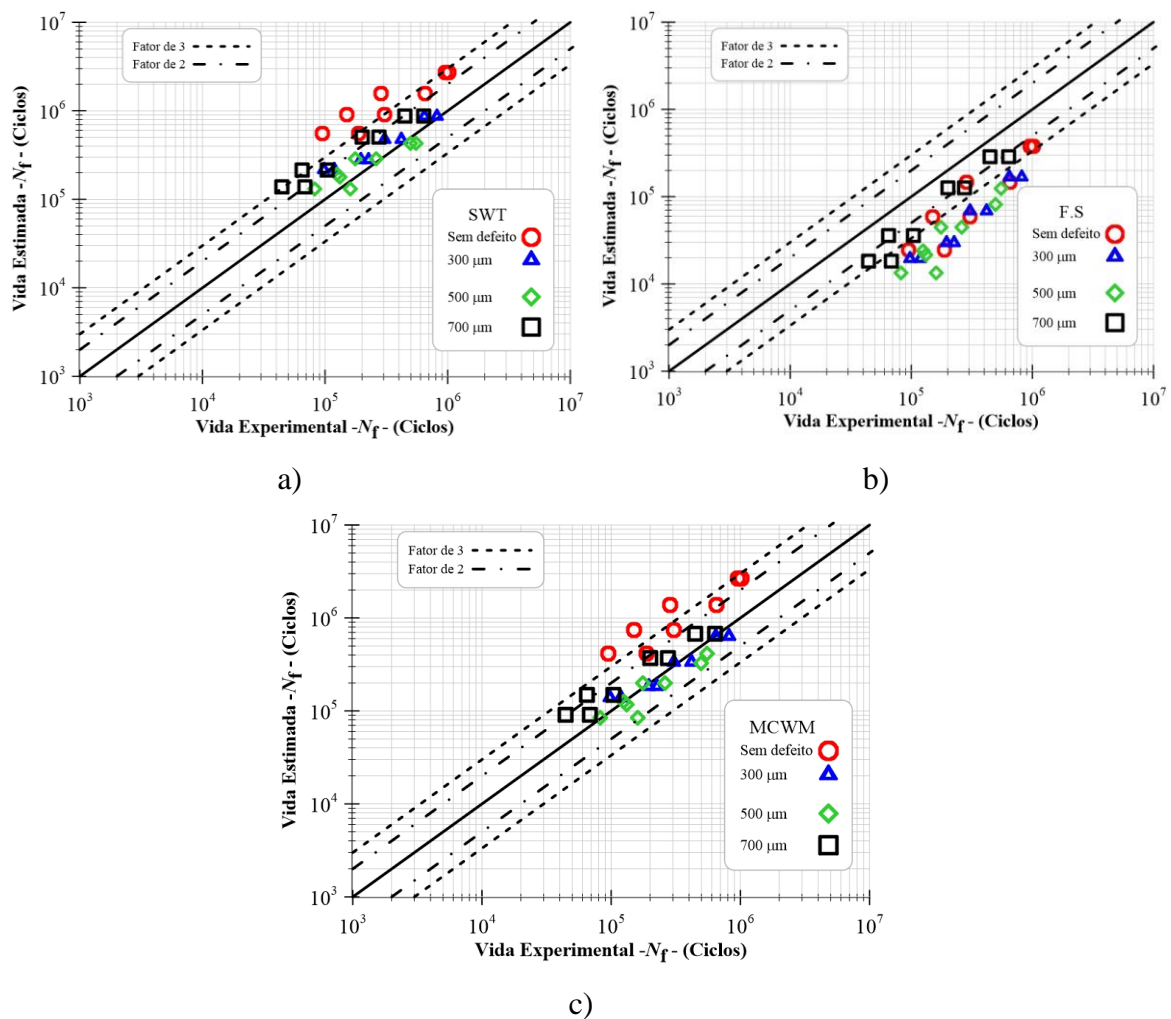


Figura 29 - Vidas estimadas versus observadas obtidas por meio dos critérios multiaxiais: a) Smith-Watson-Topper; b) Fatemi-Socie e c) Susmel e Lazzarin calibrados utilizando a estratégia proposta nesta tese.

4.6 Discussões Gerais

Neste projeto foi apresentado uma metodologia para estimar curvas SN de tração-compressão e torção alternada para materiais lisos e microdefeituosos, mostrando-se bastante promissora diante de dados experimentais da literatura (Figuras 7 e 8) e ensaios próprios (Figuras 21 e 22). Estas curvas SN estimadas por este método podem ser usadas para calibrar outros modelos multiaxiais não abordados nesta tese, além de permitir estimar vida à fadiga axial e torcional com custo relativamente baixo, quanto ao tempo computacional e operação de máquinas de ensaios, demandando apenas por dados de propriedades estáticas do material considerado.

Outro desafio também definido neste trabalho foi elaborar e validar uma estratégia para a previsão de vida à fadiga de componentes microdefeituosos sob condições de carregamento multiaxial, nos regimes de vidas médias e intermediárias. O cerne dessa estratégia consiste em assumir que os modelos multiaxiais podem ser calibrados a partir de curvas de fadiga em condições de tração-compressão e torção completamente reversas. Estas curvas são estimadas por meio de adaptações de relações empíricas disponíveis na literatura que consideram o efeito da presença de microdefeitos em duas vidas de referência (tipicamente, 10^3 e N_0 , vida que representa a fronteira entre a região de vidas intermediárias e a região de vidas longas).

Para isso nós consideramos que em 10^3 ciclos a resistência a fadiga é uma função do limite de resistência a tração do material e na vida N_0 a resistência a fadiga é função do parâmetro \sqrt{area} proposto por Murakami. Para validar o uso dessa abordagem, um conjunto de dados experimentais de fadiga foi produzido para corpos de prova planos e microdefeituosos sob condições de carregamento tração-compressão e torcional completamente reverso. A partir desses resultados, para o material AISI 1045, foi possível demonstrar que a vida N_0 é da ordem de 10^6 ciclos e que existe uma forte aderência entre as curvas de fadiga construídas com base na metodologia proposta neste trabalho e os resultados experimentais obtidos (ver Figuras 21 e 22).

Uma das características que amplifica as possibilidades de uso desta metodologia é sua capacidade de previsão da vida N_0 (joelho ou mudança de inclinação da curva de fadiga entre médio e alto número de ciclos) como um valor variável, dependendo das propriedades estáticas, tensão limite de resistência à tração, dureza e comportamento dúctil-frágil do material.

Relembramos outro desafio ainda de maior relevância, que foi estabelecer uma estratégia para acoplar modelos multiaxiais (plano crítico) com o parâmetro \sqrt{area} para estimar vida à fadiga na presença de carregamentos combinados. Para isso, um outro conjunto de dados experimentais de fadiga foi produzido utilizando corpos de prova lisos e microdefeituosos sob condições de carregamento axial-torcional, síncrono, em fase (ver Tabela 12). Tais resultados foram utilizados para avaliar as previsões de vida estimadas utilizando a estratégia proposta de calibrar os modelos multiaxiais considerando as curvas empíricas.

Os dados de fadiga multiaxial para os espécimes lisos (sem defeito), foram usados para avaliar o comportamento e precisão dos métodos FS, SWT e MCWM na estimativa da vida no regime de fadiga de ciclo médio-alto para o aço 1045, trefilado, normalizado e eletropolido. O modelo que gerou as melhores estimativas de vida foi o MCWM, onde se verificou que 62,5% das previsões caíram dentro da faixa de três larguras de banda e 100% dentro da faixa de cinco. O modelo SWT também estimou 62,5% dentro da faixa de três larguras de banda, mas foi necessário impor uma largura de banda igual a sete para englobar 100% das estimativas. Já o modelo FS foi o que gerou as piores estimativas de vida, onde se verificou que apenas 50% das previsões caíram dentro da faixa de três larguras de banda, sendo necessário impor uma largura de banda igual a 8 para englobar 100% das estimativas.

Entretanto, destaca-se que quando as previsões de vida dos espécimes microdefeituosos sob carregamentos multiaxiais são realizadas usando a metodologia proposta nesse trabalho, os resultados são animadores quando são utilizados os modelos MCWM e SWT, onde se verificou que a maioria dos resultados caíram dentro de um fator de três larguras de banda (100% para MCWM e 92% para o SWT). De forma similar ao observado na análise dos espécimes lisos, o desempenho do modelo FS não se mostrou satisfatório na análise dos espécimes microdefeituosos, onde se constatou que menos da metade dos casos estudados caíram dentro da faixa de quatro larguras de banda. Mas vale ressaltar que 100% das previsões de vida feitas pelo modelo de FS se encontram dentro de uma faixa conservadora de resultados a favor da segurança.

Reiteramos que o foco principal desta tese foi trabalhar com materiais microdefeituosos, porém para os espécimes lisos (material sem defeito) pôde-se observar que para alguns casos a amplitude de tensão e vida estimadas ficaram em um patamar não conservativo. Para esses espécimes lisos isso poderia ser minimizado alterando a forma de estabelecimento da curva SN, onde o ponto 1 usado para estimar σ'_c em 10^3 ciclos poderia

ser estimado usando a relação $(0,9 \times 0,70 S_{ut})$ ao invés de $0,75 S_{ut}$ como apresentado no fluxograma da Figura 6. Essa possível modificação também possui respaldo técnico na literatura apresentada, envolvendo o fator de correção entre carregamentos de flexão rotativa e tração-compressão.

Uma inferência pode ser feita para microdefeitos internos (abaixo da superfície), mesmo não tendo analisado dados de fadiga para tais condições, como as equações de Murakami contemplam este tipo de variável (defeito superficial e defeito interno), provavelmente nossa metodologia também irá prever vidas à fadiga para essas condições.

Também pode-se inferir que nossa metodologia poderia prever vida à fadiga para carregamentos combinados não-proporcionais, uma vez que os modelos multiaxiais adotados contemplem este tipo de variável. Essa inferência se baseia no fato de que nossa metodologia utiliza curvas de base de tração-compressão e torção alternada para calibrar tais modelos.

Assim, pode-se considerar que para a previsão de fadiga em materiais microdefeituosos a utilização de modelos de planos de críticos para estimar vida à fadiga multiaxial por meio de uma metodologia simplificada, que usa apenas 2 pontos estratégicos para definir as curvas de fadiga axial e torcional, mostrou-se uma estratégia promissora diante dos resultados observados.

5. CONCLUSÕES

Mediante os objetivos, estratégias e metodologia desenvolvidos neste projeto, reitero aqui os dois principais 1) estimar curvas SN axial e torcional para materiais microdefeituosos de maneira simplificada com possibilidade de aplicação em projetos de engenharia e 2) estabelecer uma metodologia que utiliza estas curvas estimadas para calibrar modelos de fadiga multiaxial para previsão de vida, dentro desse contexto pode-se extrair deste trabalho as seguintes conclusões:

i) Utilizar o conceito de fator de entalhe conjuntamente com as propriedades de dureza, limite de resistência à tração e o parâmetro \sqrt{area} para estimar as curvas SN de materiais microdefeituosos mostrou-se coerente para os materiais da literatura investigados e também para o aço AISI 1045 trefilado, normalizado e eletropolido;

ii) O modelo proposto aplicado para fadiga de carregamento tipo tração-compressão alternada apresentou um desvio máximo de 13% entre as amplitudes de tensão estimadas e as aplicadas nos experimentos. Para fadiga torcional alternada este resultado foi de 16%.

iii) Considerando dados experimentais da literatura científica, a aplicação da metodologia proposta neste projeto para obtenção das curvas SN (tração-compressão e torção alternada) mostrou-se eficaz quando aplicada a outros materiais, inclusive na presença de tensão média. Do total de 111 experimentos considerados, 94,6% dos dados se encontram na faixa de variação de 20% entre as amplitudes de tensões aplicadas e estimadas e 88,3% estão dentro da banda de 3 desvios e/ou são resultados conservadores na comparação entre “Vida Estimada” e “Vida Experimental”;

iv) Dos três modelos de fadiga multiaxial analisados, dois deles (SWT e MCWM) apresentaram bons resultados para previsão de vida em espécimes microdefeituosos. Destacando-se que o modelo MCWM apresentou 91,7% das estimativas dentro de 2 bandas e de 100% dentro da banda de 3 desvios;

v) Considerando os três modelos de plano críticos investigados, a estratégia proposta para previsão de vida à fadiga multiaxial se mostrou com melhor distribuição de dados entre conservativos e não conservativos aplicando o modelo MCWM.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- 1) Ampliar os estudos desta metodologia para previsão de fadiga multiaxial em diferentes tipos de carregamentos (não proporcional, amplitude variável, complexos, etc.);
- 2) Aplicar a metodologia proposta para avaliação de diferentes materiais com diferentes tipos de defeitos;
- 3) Aplicar e calibrar outros modelos multiaxiais utilizando as curvas de fadiga axial e torcional estimadas por esta metodologia;
- 4) Adaptar e aplicar a metodologia proposta para estimar vida à fadiga em materiais poliméricos e cerâmicos.

7. APÊNDICES

Apêndice A – Tabelas com dados experimentais disponíveis na literatura

Tabela A1 - Dados experimentais obtidos na literatura para estimativa de curvas SN de espécimes de aço carbono com microdefeitos (Aço SAE 1045).

Fonte	Material Investigado	Tipo de defeito	\sqrt{area} [μm]	Carregamento Axial (R= -1) MPa	Nº Ciclos Falha
(COSTA; CASTRO, 2020)	Aço SAE 1045	Cilíndrico	400	220	8,70+E04
				200	4,50+E05
				Carregamento Axial (R= 0,1) MPa	
				150	6,70E+05
				Carregamento Torcional (R= -1) MPa	
				160	5,50E+05
				Carregamento Torcional (R= -0,5) MPa	
				140	8,50E+05

Tabela A2 - Dados experimentais obtidos na literatura para estimativa de curvas SN de espécimes com microdefeitos (Alumínio 6201-T81).

Fonte	Material Investigado	Tipo de defeito	\sqrt{area} [μm]	Carregamento Axial (R= -1) MPa	Nº Ciclos Falha
(ADRIANO et al., 2018)	Alumínio 6201-T81	Cilíndrico	1665	90	5,41E+04
				90	5,84E+04
				90	6,30E+04
				90	6,67E+04
				80	1,02E+05
				80	1,43E+05
				80	1,58E+05
				70	2,66E+05
				70	3,26E+05
				70	3,84E+05
				65	3,78E+05
				65	7,56E+05
				65	1,12E+06
				65	1,42E+06
				60	9,77E+05
60	1,06E+06				

Tabela A3 - Dados experimentais obtidos na literatura para aplicação complementar da metodologia proposta para estimativa de curvas SN de espécimes com microdefeitos (Aço SAE 1020).

Fonte	Material Investigado	Tipo de defeito	\sqrt{area} [μm]	Carregamento Axial (R= -1) MPa	Nº Ciclos Falha
(TORRES N.G; MAMIYA, 2019)	Aço SAE 1020	Cilíndrico	420	230	5,10+E03
				210	1,36 +E04
				200	1,99+E04
				190	2,66+E04
				175	1,19+E05
				170	2,79+E05
				160	3,96+E05
				230	1,31+E04
		Raso	420	210	2,27+E04
				200	2,26+E04
				190	3,50+E04
				175	5,86+E04
				170	6,58+E04
				160	1,82+E05
				230	7,60+E03
				Oblongo	420
		200	2,39+E04		
		190	3,98+E04		
		175	9,23+E04		
		170	1,20+E05		
		160	2,38+E05		
		230	1,27+E04		
		Cilíndrico	750		
				200	3,48+E04
190	4,40+E04				
175	1,13+E05				
170	4,29+E05				

Tabela A4 - Dados experimentais obtidos na literatura para aplicação complementar da metodologia proposta para estimativa de curvas SN de espécimes com microdefeitos (Alumínio 6201-T81).

Fonte	Material Investigado	Tipo de defeito	\sqrt{area} [μm]	Carregamento Axial (R= -1) MPa	Nº Ciclos Falha
MARTÍNEZ et al., 2019	Alumínio 6201-T81	Cilíndrico	100	140	2,07E+05
				140	2,45E+05
				130	3,72E+05
				130	3,86E+05
				120	3,55E+05
				120	7,03E+05
				120	2,29E+06
				115	2,23E+06
				124	1,25E+05
				123	2,04E+05
			123	2,70E+05	
			114	2,56E+05	
			114	3,67E+05	
			114	4,24E+05	
			104	5,13E+05	
			324	104	6,26E+05
			104	7,43E+05	
			98	7,57E+05	
			98	9,15E+05	
			98	1,15E+06	
			93	1,27E+06	
			93	1,83E+06	
			93	3,42E+06	
			82	1,41E+05	
			82	1,68E+05	
			82	1,80E+05	
			78	1,53E+05	
			78	2,25E+05	
			78	2,74E+05	
			700	73	2,05E+05
			73	2,60E+05	
			73	4,44E+05	
68	6,42E+05				
68	1,18E+06				
68	1,86E+06				
62	7,72E+05				
62	1,21E+06				
62	3,19E+06				

Tabela A5 - Dados experimentais obtidos na literatura para aplicação complementar da metodologia proposta para estimativa de curvas SN de espécimes com microdefeitos (aço C35).

Fonte	Material Investigado	Tipo de defeito	\sqrt{area} [μm]	Carregamento Axial (R= -1) MPa	Nº Ciclos Falha		
(NASR et al., 2010)	aço C35	Esférico	300	266	2,71E+05		
				266	2,97E+05		
				231	4,10E+05		
				211	6,01E+05		
				212	8,76E+05		
				211	1,00E+06		
				192	8,15E+05		
				172	1,00E+07		
				Carregamento Torcional (R= -1)		MPa	
				200	9,25E+04		
				200	1,99E+05		
				180	2,21E+05		
				180	2,40E+05		
				180	3,19E+05		
				160	7,52E+05		
145	9,94E+06						

Tabela A6 - Dados experimentais obtidos na literatura para aplicação complementar da metodologia proposta para estimativa de curvas SN de espécimes com microdefeitos (Aço Maraging).

Fonte	Material Investigado	Tipo de defeito	\sqrt{area} [μm]	Carregamento				
				Axial (R= -1) MPa	Nº Ciclos Falha			
(MURAKAMI; ELSEVIER, 2002)	Aço Maraging	Cilíndrico	100	534	2,23E+05			
				543	4,60E+05			
				561	1,44E+05			
				582	3,27E+05			
			59	Carregamento				
				Axial (R= -2,1)				
				MPa				
				740	5,30E+05			
							699	9,86E+05
							653	1,01E+07
							789	4,45E+05
			100	Carregamento				
Axial (R= -1,9)								
MPa								
				629	3,35E+05			
				588	3,68E+05			
				569	5,73E+05			

Apêndice B – Curvas SN axiais e torcionais: Dados experimentais disponíveis na literatura

As curvas SN estimadas pela nossa metodologia, para os espécimes com microdefeitos disponíveis na literatura, estão apresentadas nas Figuras B1, B2, B3, B4, B5 e B6.

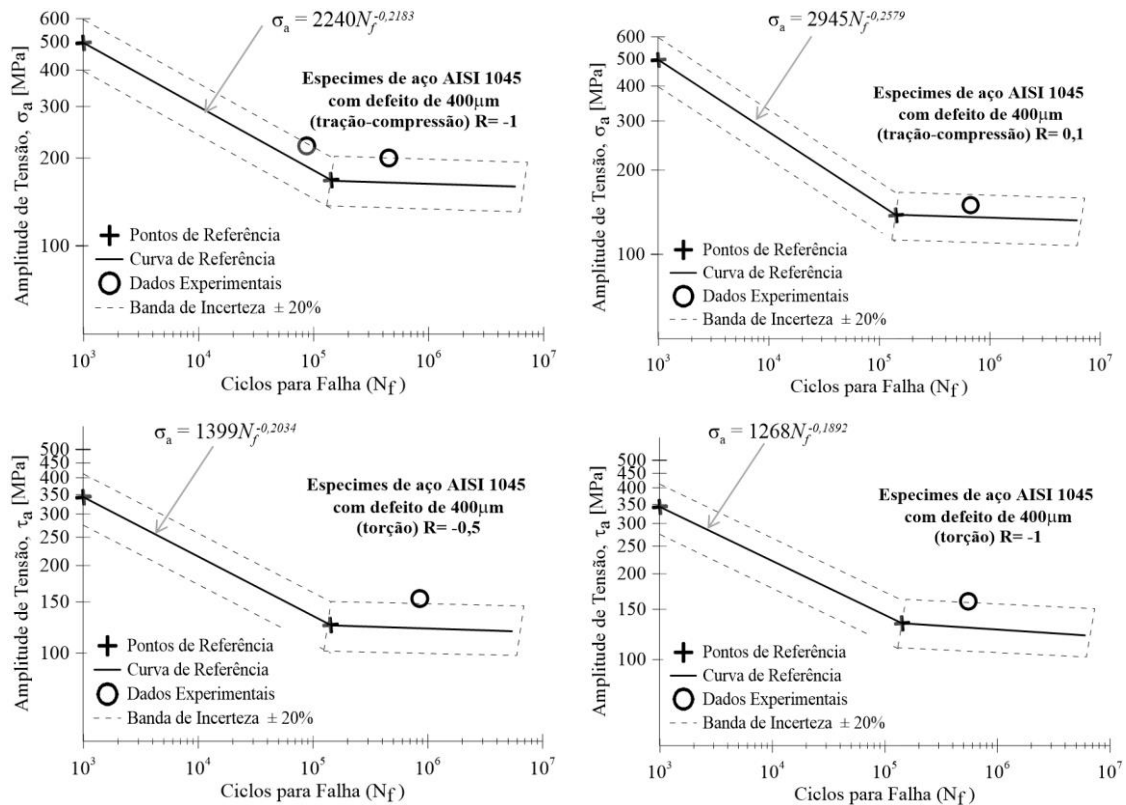


Figura B1 – Aplicação da metodologia proposta para estimar uma curva SN para um aço AISI 1045 com espécimes com defeito de 400 µm. Dados axiais e torcionais disponível na literatura (COSTA; CASTRO, 2020).

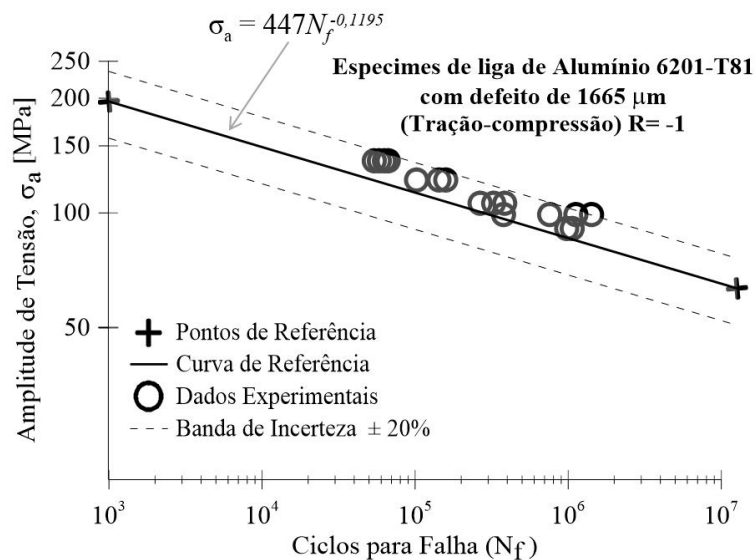


Figura B2 – Aplicação da metodologia proposta para estimar uma curva SN para uma liga de alumínio 6201-T81 com espécimes com defeito de 1665 μm . Dados disponível na literatura (ADRIANO et al., 2018).

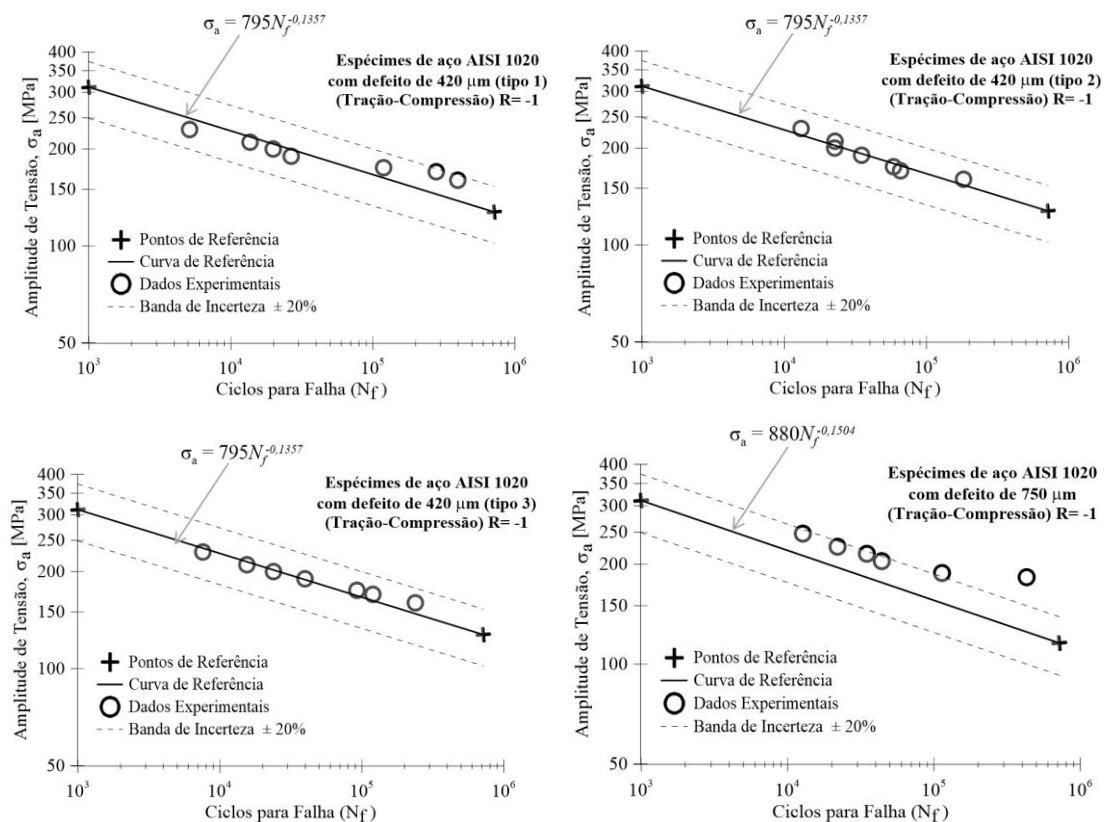


Figura B3 – Aplicação da metodologia proposta para estimar uma curva SN para um aço carbono SAE 1020 com espécimes com defeitos de três tipos diferentes de geometria com mesmo tamanho de 420 μm e uma geometria de 750 μm . Dados disponível na literatura (TORRES N.G; MAMIYA, 2019).

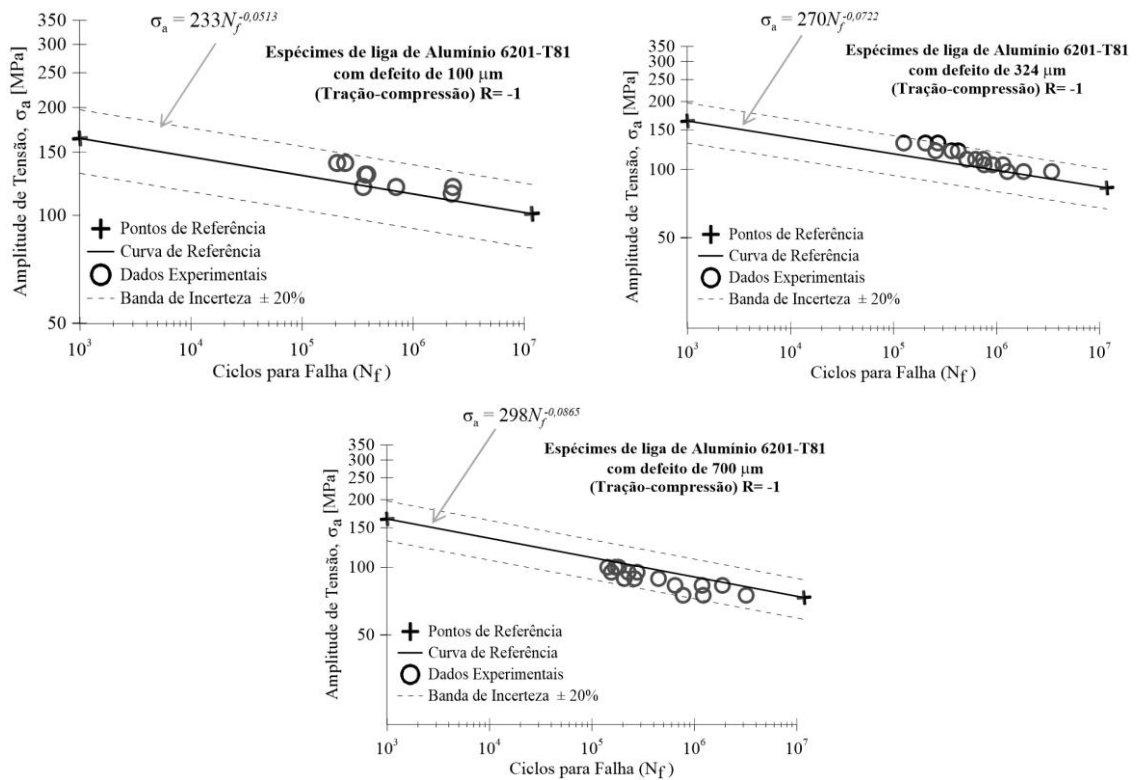


Figura B4 – Aplicação da metodologia proposta para estimar uma curva SN para uma liga de alumínio 6201-T81 com espécimes com defeito de 100, 324 e 700 μm . Dados disponível na literatura (MARTÍNEZ et al., 2019).

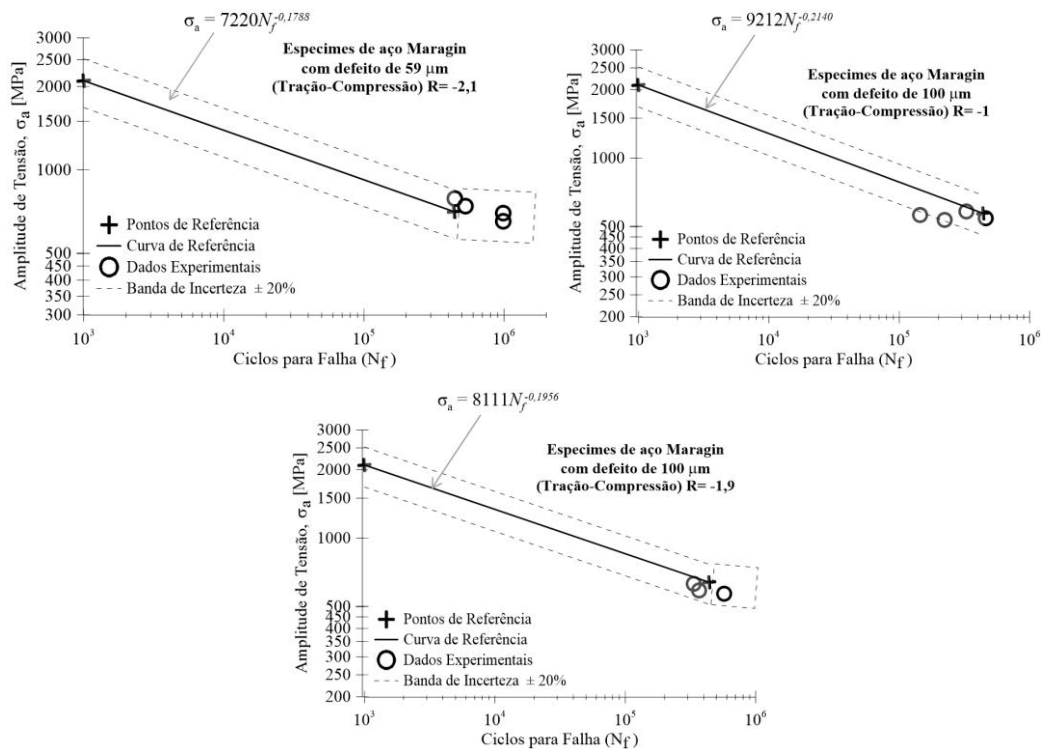


Figura B5 – Aplicação da metodologia proposta para estimar uma curva SN para um aço Maraging de alta dureza com espécimes com defeito de 59 e 100 μm . Dados disponível na literatura (MURAKAMI; ELSEVIER, 2002).

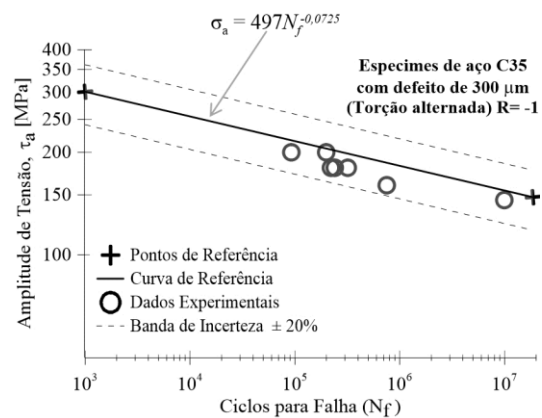
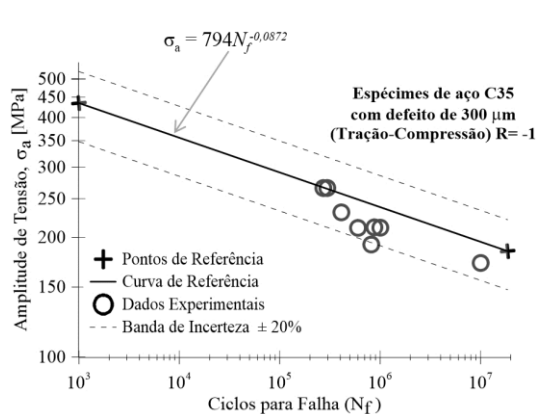


Figura B6 – Aplicação da metodologia proposta para estimar uma curva SN para um aço de médio carbono C35 com espécimes com defeito esférico de 300 μm aplicando cargas axiais e torcionais individualmente. Dados disponível na literatura (NASR et al., 2010).

Apêndice C – Resumo das principais dimensões, em valores médios, dos microdefeitos produzidos artificialmente para cada tipo de ensaio.

Tabela C1 - Resumo das principais dimensões, em valores médios, dos microdefeitos produzidos artificialmente para cada tipo de ensaio.

Tipo de defeito	Diâmetro (D) [μm]	Profundidade (h) [μm]	$\sqrt{\text{area}}$ [μm]	Rugosidade superficial - Ra [μm]
Corpos de prova para ensaio de Fadiga Axial				
300 μm	307 (± 11)	304 (± 3)	305 (± 7)	0,15 ($\pm 0,03$)
500 μm	518 (± 15)	505 (± 6)	511 (± 5)	0,11 ($\pm 0,03$)
700 μm	717 (± 8)	709 (± 2)	713 (± 5)	0,12 ($\pm 0,01$)
Corpos de prova para ensaio de Fadiga Torcional				
I	307 (± 8)	311 (± 3)	309 (± 4)	0,11 ($\pm 0,02$)
II	506 (± 18)	517 (± 5)	511 (± 9)	0,13 ($\pm 0,03$)
III	698 (± 31)	718 (± 10)	708 (± 15)	0,14 ($\pm 0,03$)
Corpos de prova para ensaio de Fadiga Multiaxial				
I	281 (± 38)	306 (± 7)	292 (± 18)	0,11 ($\pm 0,04$)
II	498 (± 31)	515 (± 8)	506 (± 12)	0,12 ($\pm 0,02$)
III	704 (± 17)	720 (± 6)	712 (± 8)	0,09 ($\pm 0,00$)

Apêndice D – Características técnicas do processo de eletropolimento utilizado para promover alívio de tensão na superfície dos corpos de prova

O eletropolimento é um processo eletroquímico de corrosão, utilizado em peças e componentes de diversos segmentos industriais, destacando o setor farmacêutico, de alimentos, de processos químicos e de desenvolvimento de tecnologia nuclear. Este processo permite melhorar a aparência das peças e também as propriedades mecânicas do material. O princípio básico do eletropolimento pode ser observado na Figura D1. Onde utiliza-se uma solução eletrolítica, fornecimento de corrente contínua, um cátodo (peça a ser polida) e um ânodo (SWAIN, 2010)

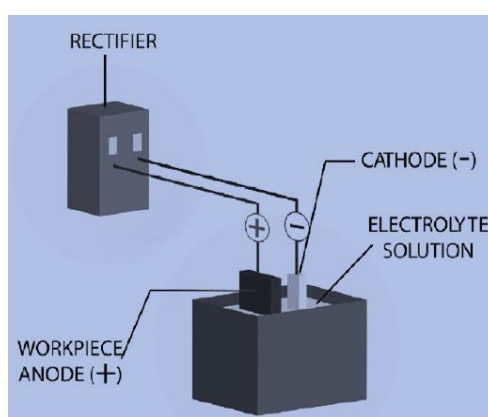


Figura D1 – Princípio básico de funcionamento do eletropolimento. Fonte: SWAIN, (2010).

A norma (ASTM B 912–00, 2000) e estudos realizados por (HRYNIEWICZ; ROKOSZ, 2010; HRYNIEWICZ; ROKOSZ; ROKICKI, 2008) discutem o processo de eletropolimento, principalmente em aços inoxidáveis, mostrando seus efeitos benéficos nas propriedades mecânicas. Estes estudos mostram a corrente elétrica (corrente contínua- cc) como parâmetro de destaque para o processo, recomenda uma faixa de 50 a 100 mA/dm² de área a ser eletropolida. Outros parâmetros merecem destaque: diferença de potencial (ddp) – Volts; tempo de contato; temperatura da solução e volume da solução.

O eletropolimento aplicado em componentes mecânicos pode resultar em: i) uma superfície de menor rugosidade ou mais nivelada; ii) maior resistência à corrosão devido à formação de uma fina película protetora, também chamada de camada passivada e iii) alívio de tensões na superfície do material (DELSTAR METAL FINISHING, 2003)

Os processos de fabricação de peças e componentes mecânicos provocam presença de concentração de tensão trativa ou compressiva, que pode ter um efeito benéfico ou

maléfico nas propriedades mecânicas do material. A Figura D2 ilustra o efeito da operação de usinagem ou remoção mecânica e as operações posteriores de lixamento, retificação ou eletropolimento na estrutura cristalina do material.

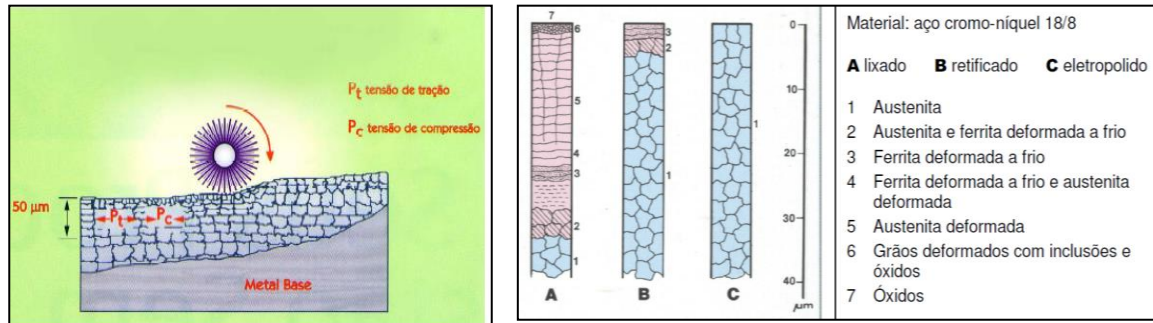


Figura D2 - Efeitos de uma operação de remoção mecânica na camada superficial de um metal e posterior lixamento, retificação ou eletropolimento. Fonte: (HUMMA, 2015).

Com o objetivo de promover alívio de tensão e melhorar a qualidade de acabamento superficial dos corpos de prova do material estudado (AISI 1045 trefilado e normalizado) foi feito o eletropolimento utilizando uma solução eletrolítica composta por ácido sulfúrico ($H_2SO_4 - 85\%$) e ácido fosfórico ($H_3PO_4 - 90\%$) nas proporções de 70/30% respectivamente, sem diluição com água (ABBOTT et al., 2006).

Durante a realização dos ensaios de eletropolimento, destaca-se a importância de utilização de capela exaustora e equipamentos de proteção individual (EPIs) devido aos gases tóxicos gerados neste processo de eletrólise, com risco de intoxicação, queimaduras e explosão. Todos os testes e ensaios foram realizados no laboratório de química da Universidade Evangélica-UniEVANGÉLICA e nos laboratórios da FATEC SENAI ROBERTO MANGE ambas em Anápolis-GO.

O quadro D1 mostra os parâmetros adotados para a realização dos ensaios de eletropolimento.

Quadro D1 - Parâmetros utilizados para realização de eletropolimento em corpos de prova do material AISI 1045.

Corrente elétrica	ddp	Tempo de contato	Temperatura	Volume da Solução
4,5 A – cc	5 Volts	10 minutos	70°C	1000 ml

A Figura D3 ilustra um dos processos de eletropolimento realizados no laboratório de desenvolvimento da FATEC Senai Roberto Mange.

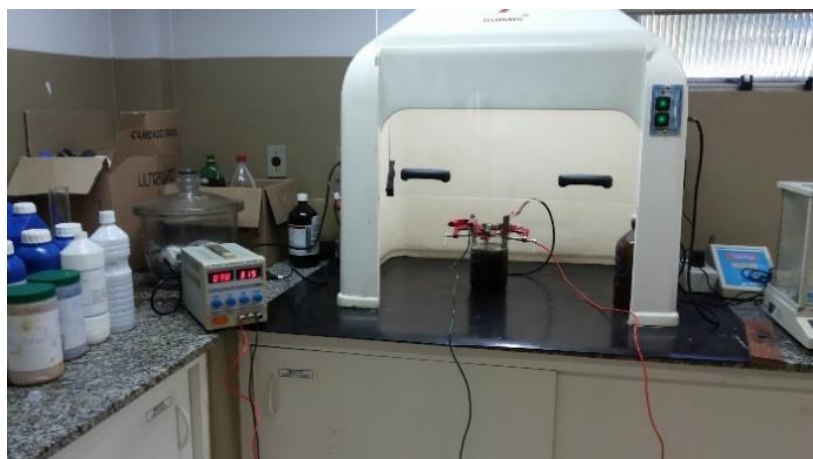
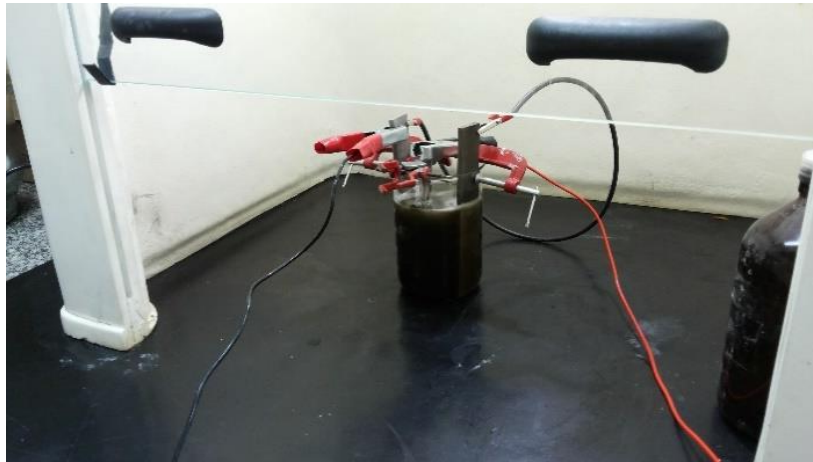


Figura D3 - Ilustração de experimentos com eletropolimento utilizando ácido sulfúrico (85%) e ácido fosfórico (90%), sem diluição com água.

APÊNDICE E – características das falhas/fraturas ocorridas em ensaios experimentais

Foram realizadas análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) utilizando um equipamento de fabricação HITACHI, modelo TM3030Plus *Tapletop Microscope* (Equipamento disponível na Universidade Estadual de Goiás - UEG, Programa de Pós-graduação em Ciências Moleculares).

As Figuras de E1 a E12 mostram as características das falhas na região dos microdefeitos para os casos de carregamento de fadiga axial, torcional e multiaxial proporcional.

A Figura E1 apresenta imagens da superfície fraturada de um corpo de prova sem defeito submetido a carregamento de fadiga axial.

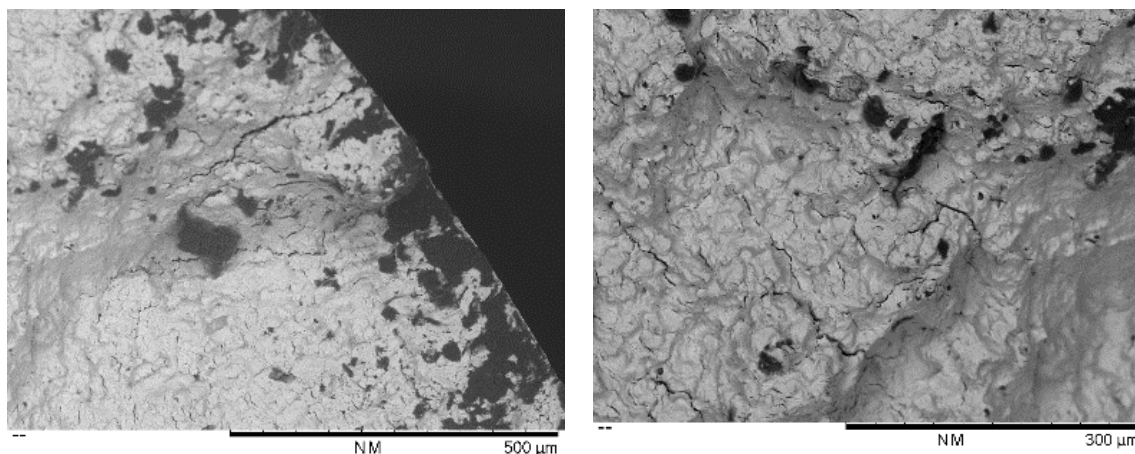


Figura E1 - Imagens da seção fraturada de corpo de prova sem defeito submetido a fadiga axial. Ilustrações obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

A Figura E2 apresenta imagem da superfície fraturada de corpo de prova com microdefeito cilíndrico tipo II (500 μm) submetido a carregamento de fadiga axial.

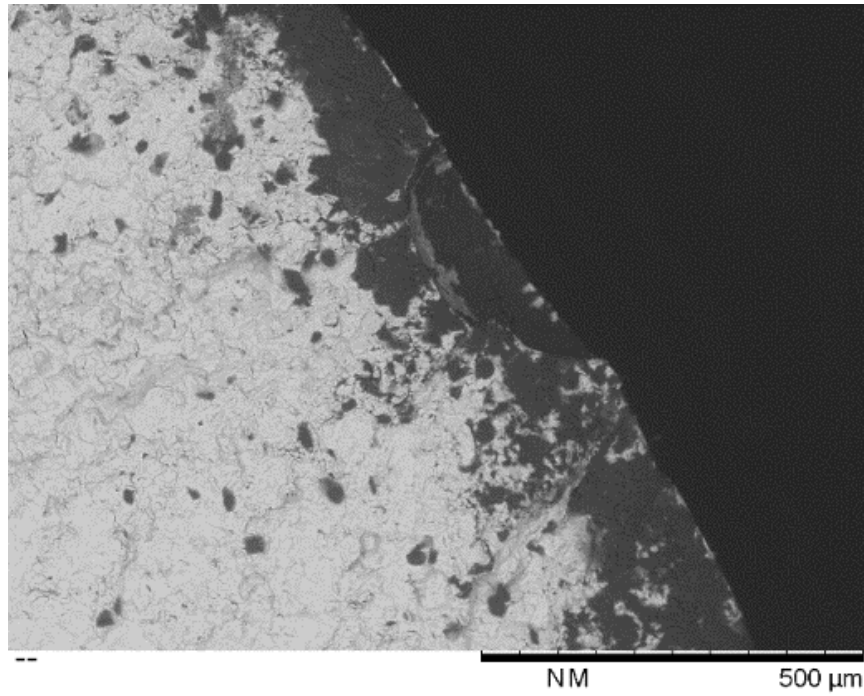


Figura E2 - Imagem da seção fraturada de corpo de prova com microdefeito cilíndrico tipo II, submetido a fadiga axial. Imagem obtida por MEV.

A Figura E3 mostra a região de fratura de um corpo de prova com microdefeito tipo III (500 μm) submetido a carregamento de fadiga axial.

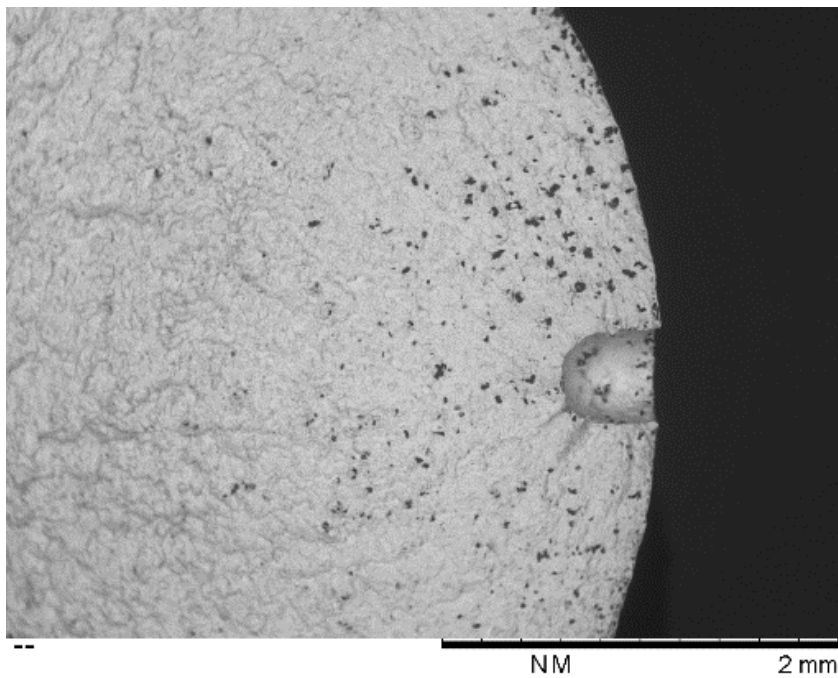
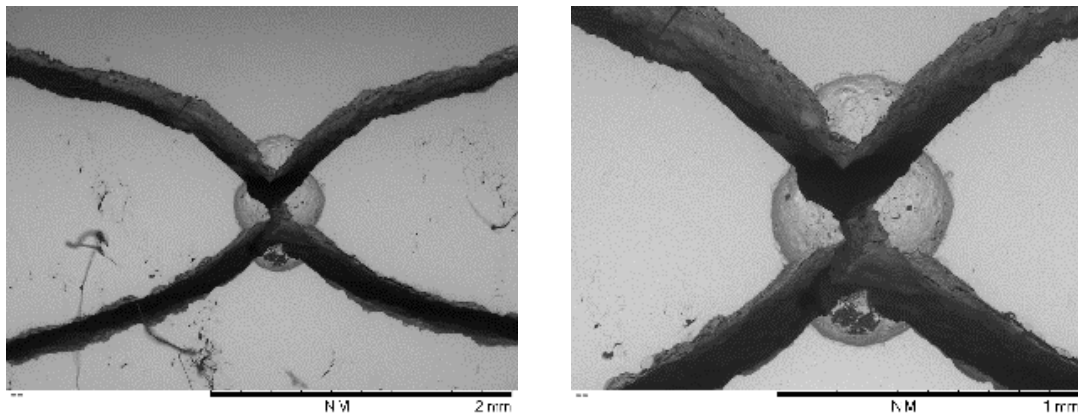


Figura E3 - Imagem da seção fraturada de corpo de prova com microdefeito tipo III, submetido a fadiga axial. Imagem obtida por MEV.

A Figura E4 mostra as características da trinca em corpo de prova com defeito cilíndrico tipo I (300 μm) submetido a carregamento de fadiga torcional alternada

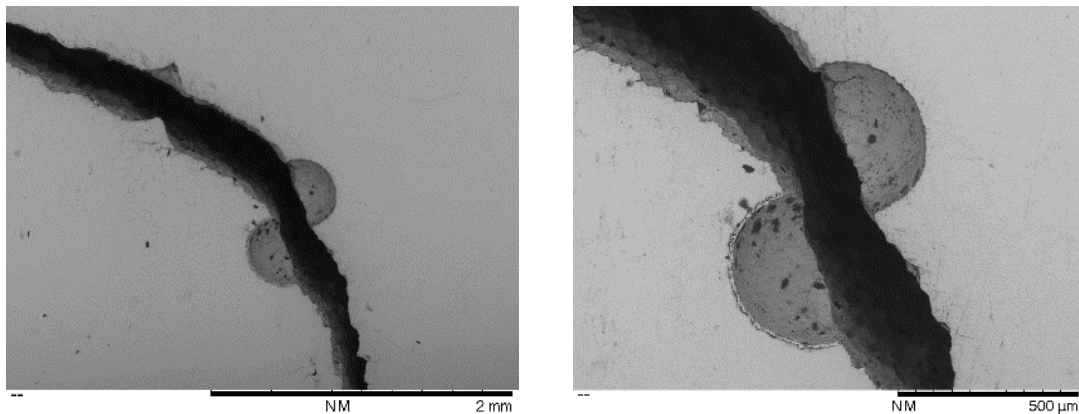


Sentido de carregamento



Figura E4 - Imagens da seção fraturada de corpo de prova com defeito cilíndrico ($\sqrt{\text{area}}=300\ \mu\text{m}$), submetido a fadiga torcional alternada (carregamento em torno de Y). Imagem obtida por MEV.

A Figura E5 apresenta as características de propagação de trincas em corpo de prova com microdefeito cilíndrico submetido a carregamento de fadiga multiaxial proporcional.



Sentido de carregamento



Figura E5 - Imagens da seção fraturada de corpo de prova com microdefeito cilíndrico ($\sqrt{\text{area}}=300\ \mu\text{m}$), submetido a fadiga multiaxial proporcional. Carregamento na direção e em torno de Y. Imagem obtida por MEV.

A Figura E6 mostra o desenvolvimento de trincas em corpo de prova com defeito cilíndrico submetido a carregamento de fadiga multiaxial.

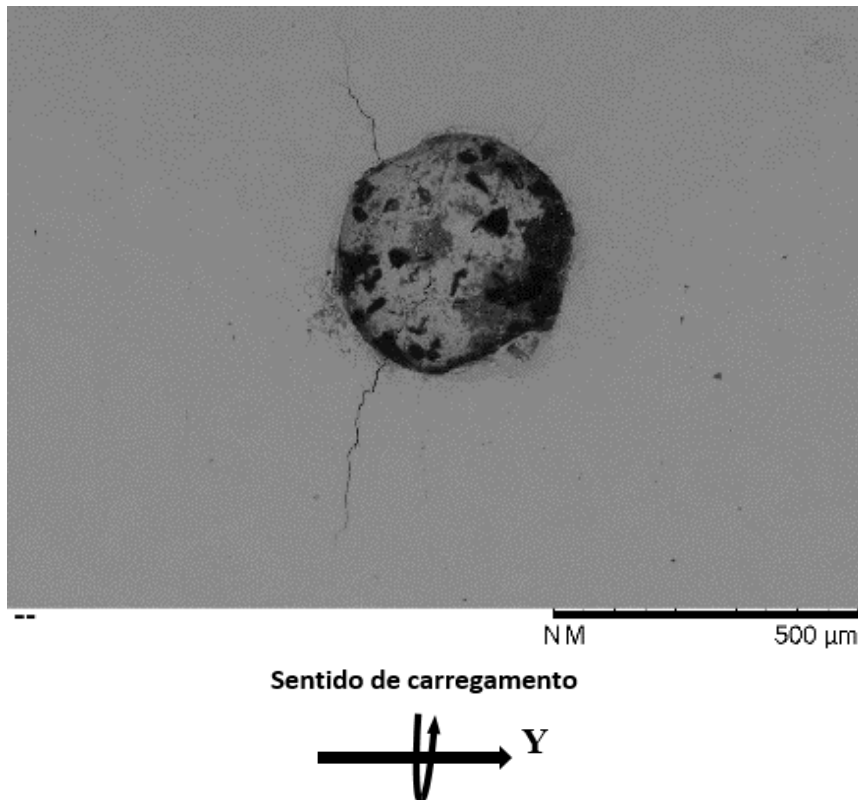


Figura E6 - Imagens da seção fraturada de corpo de prova com microdefeito cilíndrico ($\sqrt{area} = 400 \mu\text{m}$) submetido a fadiga multiaxial proporcional. Carregamentos na direção e em torno de Y. Imagem obtida por MEV.

As Figuras E7, E8, E9 e E10 mostram imagens fotográficas (Maq. Sony 14.1 mp) ilustrando as características básicas das superfícies de falha dos corpos de prova que romperam, visto que para os ensaios axiais, não houve interrupção do ensaio antes da separação das superfícies de falha.

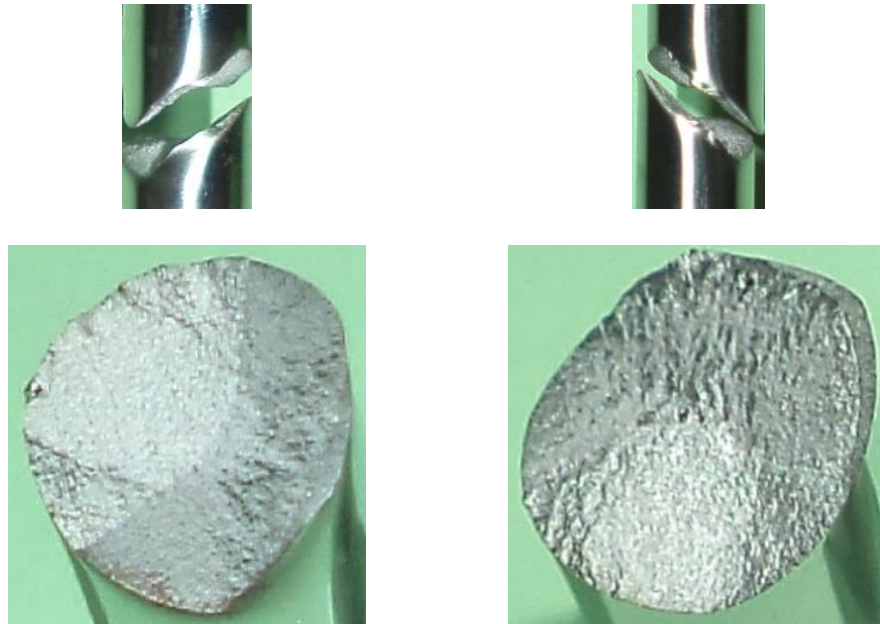


Figura E7 - Imagens da fratura de corpo de prova sem defeito submetido a carregamento de fadiga axial. Carregamento na direção longitudinal do espécime.

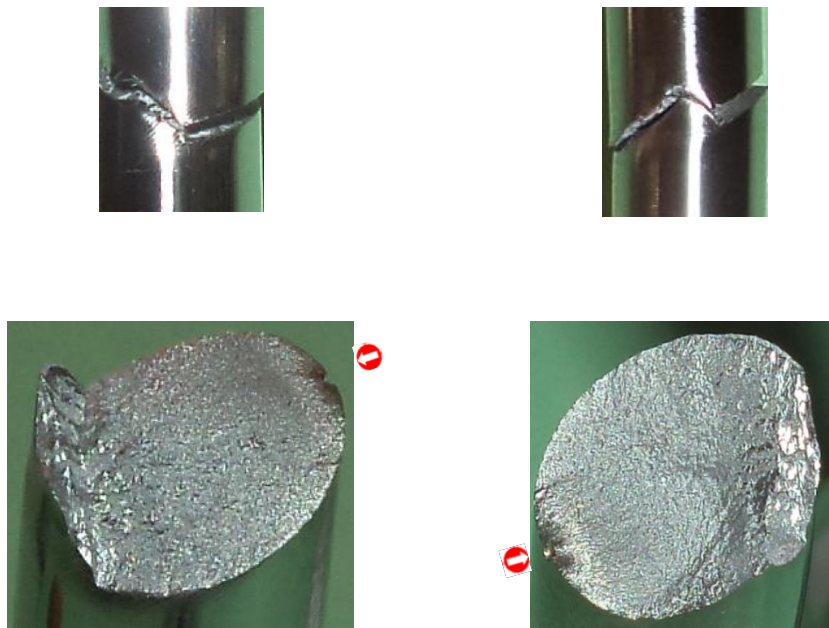


Figura E8 - Imagens da fratura de corpo de prova submetido a carregamento de fadiga axial com defeito (300 μm). Carregamento na direção longitudinal do espécime.

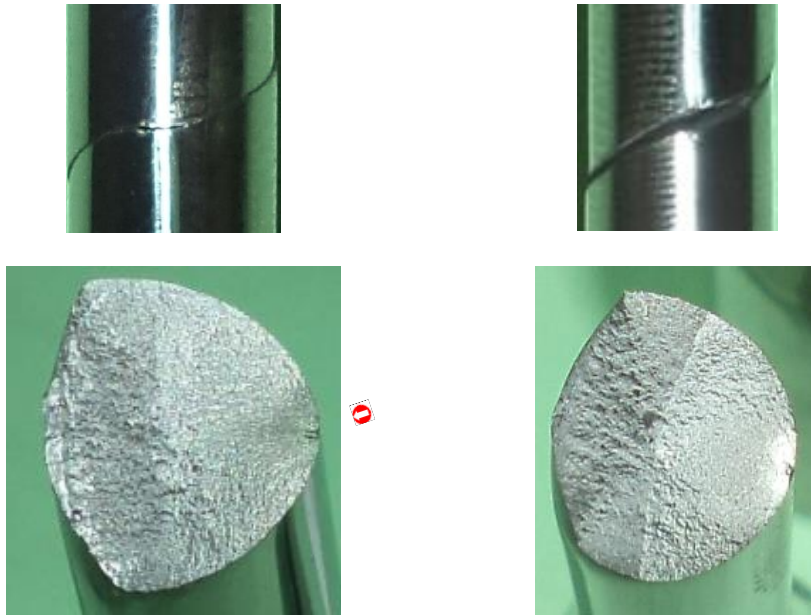


Figura E9 - Imagens da fratura de corpo de prova submetido a carregamento de fadiga axial com defeito (500 μm). Carregamento na direção longitudinal do espécime.

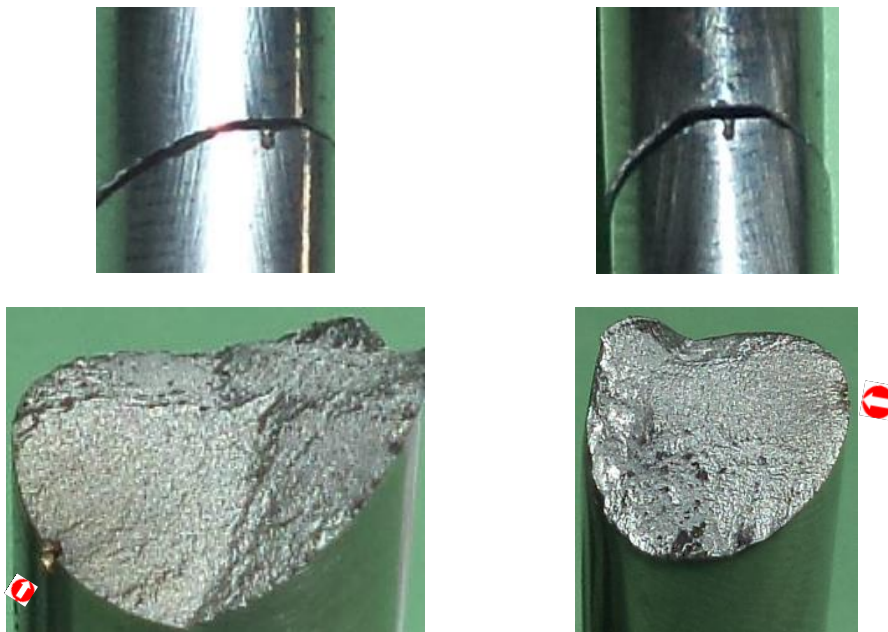
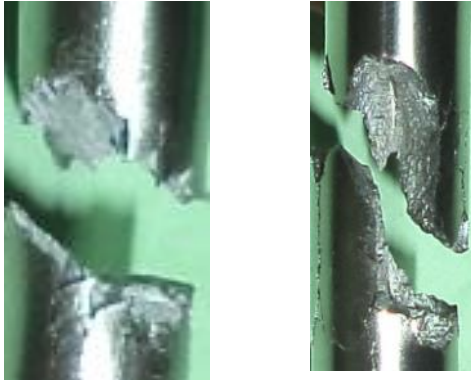


Figura E10 - Imagens da fratura de corpo de prova submetidos a carregamento de fadiga axial com defeito (700 μm). Carregamento na direção longitudinal do espécime.

As Figuras E11 e E12 apresentam imagens fotográficas de corpos de prova fraturados por fadiga torcional alternada.

Sem defeito



300 μm

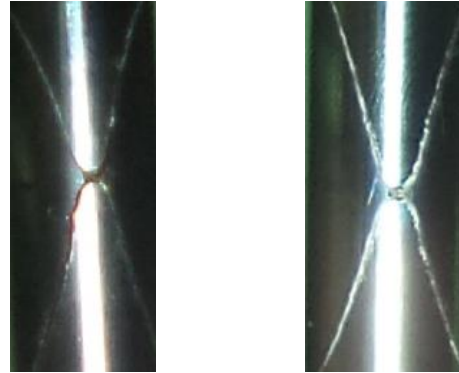


Figura E11 - Imagens das trincas geradas após falha dos corpos de prova submetidos a carregamento de fadiga torcional alternada. Carregamento em torno do eixo longitudinal do espécime. Imagens obtidas por câmera digital, modelo Sony 14.1.

500 μm



700 μm

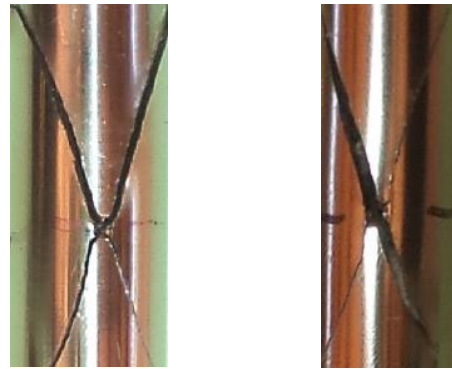


Figura E12 - Imagens das trincas geradas após falha dos corpos de prova submetidos a carregamento de fadiga torcional alternada. Carregamento em torno do eixo longitudinal do espécime. Imagens obtidas por câmera digital, modelo Sony 14.1.

REFERENCIAS

- ABBOTT, A. P. et al. Voltammetric and impedance studies of the electropolishing of type 316 stainless steel in a choline chloride based ionic liquid. **Electrochimica Acta**, v. 51, p. 4420–4425, 2006.
- ADRIANO, V.S.R. et al. The influence of the fatigue process zone size on fatigue life estimations performed on aluminum wires containing geometric discontinuities using the Theory of Critical Distances. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v. 97, n. July, p. 265–278, 2018.
- ARAÚJO, J.A. et al. On the use of the Theory of Critical Distances and the Modified Wöhler Curve Method to estimate fretting fatigue strength of cylindrical contacts. **International Journal of Fatigue**, v. 29, n. 1, p. 95–107, 2007.
- ARAÚJO, L.C. et al. An alternative approach to calibrate multiaxial fatigue models of steels with small defects. **Procedia Structural Integrity**, v. 19, p. 19–26, 2019.
- ASTM E140-02. **Standard Hardness Conversion Tables for Metals1 Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness**. ASTM International, 2002.
- ASTM E18-15. **Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials**. American Society for Testing and Materials, 2015.
- ASTM B912-00. **Standard Specification for passivation of stainless steels using electropolishing**. Philadelphia, 2000.
- ASTM E466-15. **Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials**. ASTM Int. West Conshohocken, PA. 2015.
- ASTM E739-10. **Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ϵ -N) Fatigue Data**, ASTM Int. West Conshohocken, PA. 2015.
- AVILÉS, R. et al. Influence of laser polishing on the high cycle fatigue strength of medium carbon AISI 1045 steel. **International Journal of Fatigue**, v. 33, n. 11, p. 1477–1489, Nov. 2011.

- BANDARA, C.S. et al. Fatigue Strength Prediction Formulae for Steels and Alloys in the Gigacycle Regime. **International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing**, v. 1, n. 3, p. 256–260, 2013.
- BANDARA, C.S. et al. Developing a full range S-N curve and estimating cumulative fatigue damage of steel elements. **Computational Materials Science**, v. 96, n. PA, p. 96–101, 2015.
- BANDARA, C.S. et al. **Full range S-N curves for fatigue life evaluation of steels using hardness measurements**. International Journal of Fatigue. **Anais...Elsevier Ltd**, 1 Jan. 2016.
- BANNANTINE, J.A.; COMER, J.J.; HANDROCK, J.L. **Fundamentals of Metal Fatigue Analysis**. Prentice Hall, 1990.
- BERETTA, S.; FOLETTI, S.; VALIULLIN, K. Fatigue strength for small shallow defects/cracks in torsion. **International Journal of Fatigue**, v. 33, n. 3, p. 287–299, mar. 2011.
- BILLAUDEAU, T.; NADOT, Y.; BEZINE, G. Multiaxial fatigue limit for defective materials: Mechanisms and experiments. **Acta Materialia**, v. 52, n. 13, p. 3911–3920, 2 ago. 2004.
- BONNERIC, M. et al. **Contribution of the introduction of artificial defects by additive manufacturing to the determination of the Kitagawa diagram of Al-Si alloys**. Procedia Structural Integrity. **Anais...Elsevier B.V.**, 2021.
- BROWN, M.W., AND MILLER, K.J. “A Theory for Fatigue Under Multiaxial Stress-Strain Conditions,”. **Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers**, v. Vol. 187, p. 745–756, 1973.
- CARPINTERI, A. et al. A multiaxial criterion for notch high-cycle fatigue using a critical-point method. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 75, n. 7, p. 1864–1874, 2008.
- CARPINTERI, A. et al. Structural integrity assessment of metallic components under multiaxial fatigue: The C-S criterion and its evolution. **Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures**, v. 36, n. 9, p. 870–883, 2013.
- CASTRO, F.C.; MAMIYA, E.N.; BEMFICA, C. A critical plane criterion to multiaxial fatigue of metals containing small defects. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 43, n. 11, 1 nov. 2021.

- CHU, C.C. Fatigue damage calculation using the critical plane approach. **Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME**, v. 117, n. 1, p. 41–49, 1995.
- COSTA, R.A.; CASTRO, F.C. **Avaliação de um novo critério para predição do limite de fadiga de metais com microdefeitos**. XX CONEMI - Congresso Internacional de Engenharia Mecânica e Industrial. **Anais...2020**. Disponível em: <XX - CONEMI - Congresso Internacional de Engenharia Mecânica e Industrial>. Acesso em: 1 abr. 2023.
- CRUPI, V. et al. Experimental analyses of SFRP material under static and fatigue loading by means of thermographic and DIC techniques. **Composites Part B**, v. 77, p. 268–277, 2015.
- DANG VAN, K. et al. "Criterion for High-Cycle Fatigue Failure under Multiaxial Loading," in *Biaxial and Multiaxial Fatigue*, EGF 3. **Mechanical Engineering Publications, London**, v. 1, p. 459–478, 1989.
- DARRELL SOCIE & GARY MARQUIS. **Multiaxial fatigue**, SAE International. 1999.
- DELSTAR METAL FINISHING. “**Electropolishing – A User’s Guide to Applications, Quality Standards and Specifications**”, Ninth Edition, January 2003, Delstar Metal Finishing, Inc. 2003.
- DIAS, A.L.; BEMFICA, C.; CASTRO, F.C. Multiaxial high cycle fatigue of 304L stainless steel with a small defect. **International Journal of Fatigue**, v. 156, 1 mar. 2022.
- DOWLING, N.E. **Mechanical Behaviour of materials. Engineering Methods for Deformation, Fracture and Fatigue. International Edition**, 4^a Ed. ed. 2013.
- DUNNE, F.P.E. **Fatigue crack nucleation: Mechanistic modelling across the length scales**. **Current Opinion in Solid State and Materials Science**. Elsevier Ltd, 2014.
- ELLYIN, F.; GOLOS, K. Multiaxial fatigue damage criterion. **Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME**, v. 110, n. 1, p. 63–68, 1988.
- ENDO, M.; MURAKAMI, Y. Effects of an Artificial Small Defect on Torsional Fatigue Strength of Steels. **Journal of Engineering Materials and Technology**, v. 109, n. 2, p. 124–129, 1 abr. 1987.
- ENDO, M.; ISHIMOTO, I. The fatigue strength of steels containing small holes under out-of-phase combined loading. **International Journal of Fatigue**, v. 28, n. 5–6, p. 592–597,

maio 2006.

FATEMI, A.; KURATH, P. Multiaxial Fatigue Life Predictions Under the Influence of Mean-Stresses. p. 110: 380-388, 1988.

FATEMI, A.; SOCIE, D.F. A critical plane approach to multiaxial fatigue damage including out-of-phase loading. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, v. 11, n. 3, p. 149–165, 1988.

FELTNER C. AND MORROW J. “Microplastic Strain Hysteresis Energy as a Criterion for Fatigue Fracture,”. **Journal of Basic Engineering, Transactions of the ASME**, v. 1, p. 15–22, 1961.

FINDLEY, W.N. “Modified Theories of Fatigue Failure Under Combined Stress,”. **Proceedings of the Society of Experimental Stress Analysis**, v. 14, No. 1, p. 35–46, 1956.

GADOUINI, H.; NADOT, Y.; REBOURS, C. Influence of mean stress on the multiaxial fatigue behaviour of defective materials. **International Journal of Fatigue**, v. 30, n. 9, p. 1623–1633, set. 2008.

GARUD, Y.S. A new approach to the evaluation of fatigue under multiaxial loadings. **Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME**, v. 103, n. 2, p. 118–125, 1981.

GLINKA, G.; WANG, G.; PLUMTREE, A. Mean Stress Effects in Multiaxial Fatigue. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, v. 18, n. 7–8, p. 755–764, 1995.

HEYWOOD, R.B. **Designing Against Fatigue**. Chapman and Hall, 1962.

HRYNIEWICZ, T.; ROKOSZ, K. Polarization characteristics of magneto electropolishing stainless steels. **Materials Chemistry and Physics**, v. 122, n. 1, p. 169–174, 1 jul. 2010.

HRYNIEWICZ, T.; ROKOSZ, K.; ROKICKI, R. Electrochemical and XPS studies of AISI 316L stainless steel after electropolishing in a magnetic field. **Corrosion Science**, v. 50, n. 9, p. 2676–2681, set. 2008.

HUMMA. **Guia do eletropolimento, catálogo técnico**, 2015.

JUVINALL, ROBERT C., AND MARSHEK, K.M. **Fundamentals of machine component design**. Sixth edit, Hoboken, NJ, 2017.

- KIMAKH, K. et al. **Improvement of fatigue life of AISI 1045 carbon steel of parts obtained by turning process through feed rate.** *Procedia Structural Integrity. Anais. Elsevier B.V.*, 2018.
- KITAGAWA H; TAKAHASHI S. **Applicability of fracture mechanics to very small cracks or the cracks in the early stage.** In: *Proceedings of the Second International Conference on Mechanical Behavior of Materials.* Metals Park, OH: ASM. **Anais.** 1976.
- KOHOUT, J.; VECHET, S. International Journal of Fatigue A new function for fatigue curves characterization and its multiple merits. **International Journal of Fatigue**, v. 23, p. 175–183, 2001.
- LAGODA, T. et al. Correlation of Uniaxial Cyclic Torsion and Tension-Compression for Low-Cycle Fatigue. **Materials Science**, v. 53, n. 4, p. 522–531, 2018.
- LAZZARIN, P.; SUSMEL, L. A stress-based method to predict lifetime under multiaxial fatigue loadings. **Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures**, v. 26, n., p. 1171–1187, 2003.
- LEE, Y. L. et al. **Fatigue Testing and Analysis: Theory and Practice.** 2005.
- LI, W. et al. Influence of microstructure and surface defect on very high cycle fatigue properties of clean spring steel. **International Journal of Fatigue**, v. 60, p. 48–56, mar. 2014.
- LIU, K.C. A Method Based on Virtual Strain-Energy Parameters for Multiaxial Fatigue Life Prediction,” *Advances in Multiaxial Fatigue*, ASTM STP 1191, D. L. McDowell and R. Ellis. p. 67–84. 1993.
- LIU, Y.B. et al. Dependence of fatigue strength on inclusion size for high-strength steels in very high cycle fatigue regime. **Materials Science and Engineering A**, v. 517, n. 1–2, p. 180–184, 2009.
- MACHADO, P. V. S. et al. Multiaxial fatigue assessment of steels with non-metallic inclusions by means of adapted critical plane criteria. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v. 108, p. 102585, 2020.
- MAMIYA, E. N.; CASTRO, F. C.; ARAÚJO, J. A. Recent developments on multiaxial fatigue: The contribution of the University of Brasília. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v. 73, p. 48–59, 2014.

- MARTÍNEZ, J. M. G. Tese Doutorado em Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília. Previsão de vida em fadiga em fios de alumínio liga contendo microfuros utilizando métodos numéricos. p. 107, 2018.
- MARTÍNEZ, J.M.G. et al. Geometrical size effect in the fatigue life predictions of aluminum wires with micro holes using methods of the critical distance. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 209, p. 147–161, 15 mar. 2019.
- MCDIARMID, D.L. A general criterion for high cycle multiaxial fatigue failure. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, v. 14, n. 4, p. 429–453, 1991.
- MOČKO, W. The influence of stress-controlled tensile fatigue loading on the stress-strain characteristics of AISI 1045 steel. **Materials and Design**, v. 58, p. 145–153, 2014.
- MÖLLER, B. et al. Low cycle fatigue life assessment of welded high-strength structural steels based on nominal and local design concepts. **International Journal of Fatigue**, v. 101, p. 192–208, 2017.
- MOREL, F.; MOREL, A.; NADOT, Y. Comparison between defects and micro-notches in multiaxial fatigue - The size effect and the gradient effect. **International Journal of Fatigue**, v. 31, n. 2, p. 263–275, fev. 2009.
- MU, P. et al. Influence of complex defect on cast AS7G06-T6 under multiaxial fatigue loading. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 123, p. 148–162, 2014a.
- MU, P. et al. Multiaxial fatigue design of cast parts: Influence of complex defect on cast AS7G06-T6. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 131, p. 315–328, 1 set. 2014b.
- MUGHRABI, H. Specific features and mechanisms of fatigue in the ultrahigh-cycle regime. **International Journal of Fatigue**, v. 28, n. 11, p. 1501–1508, 2006.
- MURAKAMI, Y. **Metal Fatigue: Effects of small defects and non-metallic inclusions**. UK. ELSEVIER., 2002.
- MURAKAMI, Y. **Material defects as the basis of fatigue design**. International Journal of Fatigue. **Anais**, ago. 2012.
- MURAKAMI, Y.; ENDO, T. Effects of small defects on fatigue strength of metals. **International Journal of Fatigue**, v. 2, n. 1, p. 23–30, 1980.
- MURAKAMI, Y.; ENDO, M. Quantitative evaluation of fatigue strength of metals containing various small defects or cracks. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 17, n.

- 1, p. 1–15, 1 jan. 1983.
- MURAKAMI, Y.; ENDO, M. Effects of defects, inclusions and inhomogeneities on fatigue strength. **Fatigue**, v. 16, p. 163–182, 1994.
- NADOT, Y.; BILLAUDEAU, T. Multiaxial fatigue limit criterion for defective materials. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 73, n. 1, p. 112–133, jan. 2006.
- NASR, A. et al. Fatigue initiation in C35 steel: Influence of loading and defect. **International Journal of Fatigue**, v. 32, n. 4, p. 780–787, abr. 2010.
- NASR, A. et al. Fatigue life assessment for material containing defects under multiaxial loading. **Metallurgical Research and Technology**, v. 114, n. 1, 2017.
- NORTON, R.L. **Projeto de máquinas uma abordagem integrada**. Bookman, 4ª Edição, 2013.
- NOURIAN-AVVAL, A.; FATEMI, A. Fatigue Design with High Pressure Die Cast Aluminum Including the Effects of Defects, Section Size, Stress Gradient, and Mean Stress. **Materials Today Communications**, v. 25, 1 dez. 2020.
- NOURIAN-AVVAL, A.; FATEMI, A. Fatigue performance and life prediction of cast aluminum under axial, torsion, and multiaxial loadings. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v. 111, n. October 2020, p. 102842, 2021.
- PILKEY, W. D.; PETERSON, R. E. **Peterson's stress concentration factors**. Wiley, 1997.
- QUEIROZ, H. S. et al. A coupled critical plane - \sqrt{area} methodology to estimate fatigue life for an AISI 1045 steel with small artificial defects. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v. 121, n. May, p. 103426, 2022.
- ROSA, G. LA; RISITANO, A. Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components. **International Journal of Fatigue**, v. 22, p. 65–73, 2000.
- SÁ, M.V.C. et al. The role of the shear and normal stress gradients on life estimation of notched Al7050-T7451 under multiaxial loadings. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v. 97, p. 38–47, 1 out. 2018.
- SANAEI, N.; FATEMI, A. Defect-based fatigue life prediction of L-PBF additive manufactured metals. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 244, n. January, p. 107541, 2021.

- SCHÖNBAUER, B.M.; MAYER, H. Effect of small defects on the fatigue strength of martensitic stainless steels. **International Journal of Fatigue**, v. 127, p. 362–375, 1 out. 2019.
- SHAMSAEI, N.; MCKELVEY, S.A. Multiaxial life predictions in absence of any fatigue properties. **International Journal of Fatigue**, v. 67, p. 62–72, 2014.
- SIMONEAU, A.; NG, E.; ELBESTAWI, M. Grain size and orientation effects when microcutting AISI 1045 steel. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 56, n. 1, p. 57-60, 2007.
- SINES, G. “Behavior of Metals Under Complex Static and Alternating Stresses,” in *Metal Fatigue*, G. Sines and J.L. Waisman. Em: MCGRAW HILL, p. 145–169. 1959.
- SKF. Bearing damage and failure analysis. Em: **PUB BU/I3 14219/2 EN. 2017.**
- SMITH, RN.; WATSON, P.; TOPPER, TH. A stress-strain function for the fatigue of metals (Stress-strain function for metal fatigue including mean stress effect). **Journal of materials**, v. 5, n. 4, p. 767–778, 1970.
- SOCIE, D. Multiaxial Fatigue Damage Models. **Journal of Engineering Materials and Technology**, v. 109, n. 4, p. 293–298, 1987.
- STARKE, P.; WU, H. Use of non-destructive testing methods in a new one-specimen test strategy for the estimation of fatigue data. **International Journal of Fatigue**, v. 111, p. 177–185, 1 jun. 2018.
- SUN, Z. et al. Corrosion mechanism investigation of TiN/Ti coating and TC4 alloy for aircraft compressor application. **Chinese Journal of Aeronautics**, v. 33, n. 6, p. 1824–1835, 1 jun. 2020.
- SUSMEL, L. The theory of critical distances: a review of its applications in fatigue. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 75, n. 7, p. 1706–1724, 2008.
- SUSMEL, L. **Multiaxial notch fatigue. From nominal to local stress/strain quantities.** 2009.
- SUSMEL, L; LAZZARIN, P. A bi-parametric Wöhler curve for high cycle multiaxial fatigue assessment. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, v. 25, n.1, p. 63–78, 2002.
- SUSMEL, L.; TAYLOR, D. Two methods for predicting the multiaxial fatigue limits to

- sharp notches. **Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures**, v. 26, n. 9, p. 821–833, 2003.
- SUSMEL, L.; TAYLOR, D. A simplified approach to apply the theory of critical distances to notched components under torsional fatigue loading. **International Journal of Fatigue**, v. 28, n. 4, p. 417–430, abr. 2006.
- SUSMEL, L.; TAYLOR, D. A novel formulation of the theory of critical distances to estimate lifetime of notched components in the medium-cycle fatigue regime. **Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures**, v. 30, n. 7, p. 567–581, 2007.
- SWAIN, J. **The “then and now” of electropolishing, anopol Ltd, Surface Word**. 2010.
- SZALA, G.; LIGAJ, B. Application of hybrid method in calculation of fatigue life for C45 steel (1045 steel) structural components. **International Journal of Fatigue**, v. 91, p. 39–49, 2016.
- TAYLOR, D.; BOLOGNA, P.; BEL KNANI, K. Prediction of fatigue failure location on a component using a critical distance method. **International Journal of Fatigue**, v. 22, n. 9, p. 735–742, 2000.
- TECHNOLOGY, S.A.; SAUSE, M.G.R.; JASIŪNIENĖ, E. **Structural Health Monitoring Damage Detection Systems for Aerospace**. 2022.
- THIEULOT-LAURE, E.; POMMIER, S.; FRÉCHINET, S. A multiaxial fatigue failure criterion considering the effects of the defects. **International Journal of Fatigue**, v. 29, n. 9–11, p. 1996–2004, set. 2007.
- TORRES, N.G. **Estudo experimental da influência de pequenos defeitos na vida à fadiga em aço de baixo carbono**. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília). 2019.
- TORRES N.G; MAMIYA, E.N. **Experimental Study of the Influence os Small Defects on Fatigue life in Low Carbon Steel. In: 25th International Congress of Mechanical Engineering, 2019, Uberlândia. Proceedings of the 25th International Congress of Mechanical Engineering, 2019**. In: 25th International Congress of Mechanical, 2019.
- VINCENT, M. et al. Interaction between a surface defect and grain size under high cycle fatigue loading: Experimental approach for Armco iron. **International Journal of Fatigue**, v. 87, p. 81–90, 1 jun. 2016.

- WALTER D.P.; DEBORAH F.P. **Peterson's Stress Concentration Factors**. 3rd. ed. John Wiley, 2008.
- WANG, Q.Y. et al. Gigacycle fatigue of ferrous alloys. **Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures**, v. 22, n. 8, p. 667–672, 1999.
- YANASE, K. A Study on the Multiaxial Fatigue Failure Criterion with Small Defects. **Materials Performance and Characterization**, v. 2, n. 1, p. 20130013, 11 out. 2013.
- YANASE, K.; ENDO, M. Multiaxial high cycle fatigue threshold with small defects and cracks. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 123, p. 182–196, 2014.
- YU, M.T.; DUQUESNAY, D.L.; TOPPER, T.H. Notch fatigue behaviour of SAE1045 steel. **International Journal of Fatigue**, v. 10, n. 2, p. 109–116, 1988.