



PROJETO DE GRADUAÇÃO

Análise em Fadiga do Aço 4140

Por

Alexandre Lima Meuren

Brasília, dezembro de 2018

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

Análise em Fadiga do Aço em 4140

POR

Alexandre Lima Meuren

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Banca Examinadora

Prof. José Alexander Araújo, UnB/ ENM (Orientador)

Prof. Fábio Comes de Castro, UnB/ ENM

Prof. Jorge Luiz de Almeida Ferreira, UnB/ENM

Brasília, dezembro de 2018

Agradecimentos

Agradeço a minha família, meus pais Adalberto e Lúcia e meus irmãos Henrique, Lorena e Felipe, por sempre me apoiarem e acreditarem em mim.

Aos amigos da engenharia mecânica, principalmente Sarah Maria de Albuquerque e Sósthene Fragoso que foram de grande ajuda no decorrer do curso e sem vocês este curso não seria o mesmo.

Aos amigos Marcos Nihari, Rafael Bessoni e Raphael Julio. Que mesmo distantes e nos vendo pouco, ainda são muito presentes.

Aos amigos Juliana Lemos, Karla Garreto e Artur Moraes, com quem, sem dúvida, mais compartilhei meus últimos momentos nesta universidade.

Ao meu orientador, José Alexander Araújo, por ter aceitado me orientar e por todo apoio no decorrer do projeto.

E por fim, a todos outros amigos presentes na minha vida e que infelizmente esqueci de citar.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é avaliar metodologias utilizadas para determinar o limite de fadiga de aços internamente defeituosos submetidos a carregamentos de tração/compressão e submetidos a carregamentos de torção pura. Serão avaliados ensaios feitos seguindo o Método da Escada Modificado, determinando-se os limites de fadiga através dele.

Também serão determinados os limites de fadiga através do Método do Parâmetro \sqrt{area} , proposto por Murakami, utilizado para aços que possuem inclusões não-metálicas. E posteriormente serão comparados os resultados obtidos pelos dois métodos, para se verificar a validade do segundo.

O aço utilizado para os ensaios será o 42CrMo4 (SAE 4140). Este aço é utilizado na fabricação de virabrequins de grupo geradores estacionários e através de uma análise microscópica feita de uma amostra deste aço, foi verificado que ele é internamente defeituoso, possuindo inclusões não-metálicas. Deste modo, foi possível aplicar o Método do Parâmetro \sqrt{area} onde a conclusão chegada foi de que o método é eficaz, cumprindo corretamente a sua função, sendo uma maneira rápida e econômica, para tal fim.

ABSTRACT

The objective of this work is to evaluate methodologies used to determine the fatigue limit of internally defective steels subjected to traction/compression loads and subjected to pure torsional loads. Trials made following the Modified Staircase Method will be evaluated, determining the fatigue limits through it.

The fatigue limits will also be determined through the Method of the Parameter \sqrt{area} , proposed by Murakami, used for steels that have nonmetallic inclusions. Then the results obtained by the two methods will be compared to verify the validity of the second one.

The steel used for the tests shall be 42CrMo4 (SAE 4140). This steel is used in the manufacture of stationary generator set crankshafts and through a microscopic analysis of a sample of this steel, it has been found that it is internally defective, having nonmetallic inclusions. In this way, it was possible to apply the Method of the Parameter \sqrt{area} where the conclusion was that the method is effective, fulfilling its function correctly, being a quick and economical way, for that purpose.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	viii
LISTA DE SÍMBOLOS	ix
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2. OBJETIVO E ESTRUTURA DO RELATÓRIO.....	2
2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS	3
2.1. MECANISMO DE FALHA POR FADIGA	3
2.2. FADIGA UNIAXIAL.....	4
3. PARÂMETRO \sqrt{area}.....	6
3.1. INTRODUÇÃO.....	6
3.2. INCLUSÕES NÃO METÁLICAS COMO ORIGEM DE FRATURA EM FADIGA	6
3.3. DETERMINAÇÃO DO PARÂMETRO \sqrt{area} PELO MÉTODO DE ESTATÍSTICA DE EXTREMO .	9
3.4. DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE DA TEORIA DOS VALORES EXTREMOS.....	11
4. EXTENSÃO DO PARÂMETRO \sqrt{area} PARA O PROBLEMA DE FADIGA UNIAXIAL TORCIONAL	13
5. MÉTODO DA ESCADA	15
5.1. MÉTODO DA ESCADA CONVENCIONAL	15
5.2. MÉTODO DA ESCADA MODIFICADO	18
6. METODOLOGIA	19
6.1. INTRODUÇÃO.....	19
6.2. MATERIAL.....	19
6.3. NORMAS A SEREM SEGUIDAS NOS ENSAIOS DE FADIGA.....	20
6.4. ESTIMANDO AS CURVAS S-N E τ -N	22
6.5. MÉTODO DA ESCADA MODIFICADO	25
6.6. CÁLCULO DOS LIMITES DE FADIGA PELO PARÂMETRO \sqrt{area}	26
7. RESULTADOS.....	29
7.1. INTRODUÇÃO.....	29
7.2. RESULTADO DA CURVA S-N ESTIMADA	29
7.3. RESULTADO DA CURVA τ -N ESTIMADA.....	30
7.4. RESULTADOS DO MÉTODO DA ESCADA MODIFICADO PARA O CASO UNIAXIAL	31
7.5. RESULTADOS DO MÉTODO DA ESCADA MODIFICADO PARA O CASO TORCIONAL	34

7.6.	RESULTADOS DO PARÂMETRO \sqrt{area} PARA ENSAIOS UNIAXIAIS.....	34
7.7.	RESULTADOS DO PARÂMETRO \sqrt{area} PARA ENSAIOS TORCIONAIS.....	39
7.8.	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	48
8.	CONCLUSÃO	49
8.1.	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	50
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Eixo virabrequim de grupo gerador com aproximadamente 7 metros de comprimento e 6 toneladas.....	1
Figura 2.1 - Nucleação de trincas no interior dos grãos de uma estrutura cristalina.....	3
Figura 2.2 - Curva S-N.....	4
Figura 2.3 - Efeito da tensão média na resistência e limite de fadiga.....	5
Figura 3.1 - Um exemplo de inclusão observado no centro de um “olho de peixe” observado na superfície da fratura por fadiga.....	8
Figura 3.2 - Classificação das inclusões por localização.....	8
Figura 3.3 - Procedimento de classificação de inclusão por estatísticas de valores extremos.....	9
Figura 6.1 - Dimensões do Corpo de Prova.....	20
Figura 6.2 – Foto do Corpo de Prova utilizado.....	20
Figura 6.3 – Máquina MTS 809.....	21
Figura 6.4 – Máquina MTS 810.....	22
Figura 6.5 - Curvas S-N generalizadas para diferentes tipos de carregamentos, para aços.....	23
Figura 6.6 – Fator de Carregamento (C_L) para diferentes tipos de carregamento).....	24
Figura 6.7 – Fator de Acabamento de Superfície em função da rugosidade e do S_u	25
Figura 6.8 – Construção dos planos de análise do método do parâmetro \sqrt{area} para os casos: (A) – uniaxial, (B) – torcional.....	26
Figura 6.9 – Foto da politriz POLIPAN-2 PANTEC.....	27
Figura 6.10 – Foto do microscópio LEXT OLS4100.....	27
Figura 6.11 – Foto de amostras prontas para a análise no microscópio.....	28
Figura 7.1 – Curva S-N para o aço 4140.....	30
Figura 7.2 – Curva τ -N para o aço 4140.....	31
Figura 7.3 – Resultados do método da escada modificado para o caso uniaxial.....	32
Figura 7.4 – Gráfico das distribuições de Gumbel, Weibull e Fréchet para o caso uniaxial.....	36
Figura 7.5 – Inclusões no plano de tensão principal uniaxial.....	38
Figura 7.6 – Gráfico das distribuições de Gumbel, Weibull e Fréchet para o caso torcional a partir de uma amostra com falha.....	41
Figura 7.7 – Inclusões no plano de tensão principal torcional, para uma amostra já falhada.....	43
Figura 7.8 – Gráfico das distribuições de Gumbel, Weibull e Fréchet para o caso torcional a partir de uma amostra sem falha.....	45
Figura 7.9 – Inclusões no plano de tensão principal torcional, para uma amostra não falhada.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 - Fator K para um limite de tolerância unilateral de uma distribuição normal.....	17
Tabela 6.1 - Propriedades Mecânicas do Aço 4140.....	19
Tabela 6.2 - Composição Química do Aço 4140.....	19
Tabela 7.1 – Estimativa da Tensão em 10^3 e 10^6 ciclos para curva S-N do aço 4140.....	29
Tabela 7.2- Resultados dos ensaios em tração-compressão do aço 4140.....	29
Tabela 7.3 – Estimativa da Tensão em 10^3 e 10^6 ciclos para curva τ -N do aço 4140.....	30
Tabela 7.4- Resultados dos ensaios em torção pura do aço 4140.....	30
Tabela 7.5 – Resultados do método da escada modificado para ensaios uniaxiais.....	32
Tabela 7.6 – Cálculo dos parâmetros F, A e B do método da escada.....	33
Tabela 7.7 – Resultados do método da escada modificado para ensaios torcionais.....	34
Tabela 7.8 – Áreas de inclusão medidas para o caso uniaxial.....	35
Tabela 7.9 – Áreas de inclusão para o caso torcional a partir de uma amostra falhada.....	40
Tabela 7.10 – Áreas de inclusão para o caso torcional a partir de uma amostra não falhada.....	44
Tabela 7.11 – Erro relativo das distribuições de Gumbel, Weibull e Fréchet para o caso uniaxial.....	48
Tabela 7.12 – Erro relativo das distribuições de Gumbel, Weibull e Fréchet para o caso torcional.....	48

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

d	incremento do método da escada
n	vetor unitário de um plano
n_x, n_y, n_z	componentes do vetor unitário n
N_f	número de ciclos
R	razão de carregamento
t	vetor tensão

Símbolos Gregos

σ	tensor das tensões
σ_n	tensão normal
σ_p	esforço paralelo ao plano da trinca
σ_f'	coeficiente de resistência à fadiga
σ_s	desvio padrão do método da escada
σ_w	limite de fadiga sob carregamento uniaxial
τ_w	limite de fadiga sob carregamento torcional
α	expoente de resistência à fadiga
μ_s	média do método da escada

Subscritos

a	amplitude
\max	valor máximo
\min	valor mínimo
n	relativo à tensão normal
i	relativo ao i -ésimo ponto/instante

Siglas

IRMSE	Inclusion Rating Method by Statistics of Extreme
-------	--

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

A falha por fadiga acontece em estruturas sujeitas a tensões dinâmicas e oscilantes. Essas falhas podem ocorrer em níveis de tensão muito menores que os de limite de resistência à tração ou limite de escoamento, para uma falha estática. As análises de fadiga podem ser dos tipos uniaxiais ou multiaxiais. A fadiga uniaxial estuda o efeito, ao longo do tempo, de carregamentos que geram tensões em uma única direção, já o multiaxial, de carregamentos que geram tensões em direções distintas.

Um problema que influencia na análise em fadiga de um material é fato dele ser ou não um material internamente defeituoso. As chamadas inclusões não-metálicas influenciam substancialmente as propriedades mecânicas de um determinado material, alterando seu limite de fadiga. Por esse motivo, a análise de fadiga em materiais internamente defeituosos se torna uma tarefa altamente complexa, principalmente quando o componente está submetido a carregamentos multiaxiais não proporcionais, mas essa complexidade torna estudos que abordam este tema relativamente escassos. Por outro lado, a importância prática e econômica da condução de estudos desta natureza pode ser exemplificada pelas diversas falhas por fadiga recentemente ocorridas nos eixos virabrequins de grupos geradores utilizados em termoelétricas brasileiras. O custo devido ao reparo e a lucro cessante provocado por este tipo de falha pode chegar a dezenas de milhões de reais. O valor do eixo apenas (quase sete metros de comprimento e aproximadamente seis toneladas) pode facilmente superar a casa de dois milhões de reais.



Figura 1.1 – Eixo virabrequim de grupo gerador com aproximadamente 7 metros de comprimento e 6 toneladas.

Uma maneira experimental de se determinar o limite de fadiga é através do método da escada. Neste método é conduzido um ensaio de fadiga, no material que se deseja descobrir o limite, sob uma determinada tensão inicial estimada e caso ele não falhe, um novo ensaio é conduzido sob uma tensão acima da inicial de acordo com um incremento, caso falhe, um novo ensaio é então conduzido a uma tensão abaixo de um incremento. Este método é bastante eficiente e é o mais popular para tal fim. Porém, é um método demorado de se aplicar.

Outro método para se determinar o limite de fadiga sem necessidade de se fazer ensaios foi proposto por Murakami. Contudo, tal método é exclusivo para aços que possuem inclusões não metálicas e sujeitos apenas a fadiga uniaxial. Murakami propôs que o limite de fadiga uniaxial de um aço pode ser determinado apenas com dois parâmetros, a dureza e a raiz da área de inclusão do aço. Uma extensão deste método foi proposto por Endo e Ishimoto, tornando-o utilizável também para fadiga biaxial. Entretanto, para fadiga multiaxial, tal método ainda não é utilizável.

1.2. OBJETIVO E ESTRUTURA DO RELATÓRIO

O objetivo deste trabalho é determinar o limite de fadiga uniaxial e o limite de fadiga em torção pura do aço 4140 utilizando o método da escada. E determinar o limite de fadiga uniaxial e em torção pura do aço 4140 através do método proposto por Murakami, pois com uma análise microscópica feita do aço 4140, foi verificado que o mesmo é naturalmente defeituoso, possuindo inclusões não-metálicas.

Determinando os limites de fadigas pelos dois métodos, deseja-se então comparar os dois resultados, verificando se o método proposto por Murakami é realmente válido.

Além deste capítulo introdutório, este trabalho apresenta os seguintes capítulos:

Capítulo 2, onde serão apresentados os principais conceitos necessários à caracterização da fadiga.

Capítulo 3, onde serão apresentados o parâmetro \sqrt{area} e a técnica de avaliação das inclusões por meio das estatísticas dos extremos.

Capítulo 4, onde se explica a extensão do parâmetro \sqrt{area} para o caso biaxial.

Capítulo 5, onde é descrito detalhadamente o método da escada.

Capítulo 6, onde a metodologia do projeto será descrita.

Capítulo 7, onde serão apresentados os resultados.

Capítulo 8, onde serão apresentadas as conclusões.

2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS

2.1. MECANISMO DE FALHA POR FADIGA

A falha por fadiga acontece em estruturas sujeitas a tensões dinâmicas e oscilantes. Essas falhas podem ocorrer em níveis de tensão muito menores que os de limite de resistência à tração ou limite de escoamento, para uma falha estática.

A nucleação, a formação de microtrincas e crescimento estável de trincas até a fratura do material, são estágios do dano por fadiga. Em 1903, Erwing e Humphrey conduziram um trabalho experimental no qual foi possível descrever pela primeira vez o processo de iniciação da trinca.

A figura 2.1 representa parte da estrutura cristalina de um material sujeito a um carregamento de tração periódico $\sigma(t)$ de maneira que a maior tensão cisalhante é observada à 45° em relação à direção axial de um carregamento de tração.

Após um certo número de ciclos, ocorre a formação de bandas de escorregamento geradas pelas deformações plásticas devido à tensão de cisalhamento (linhas no interior dos hexágonos).

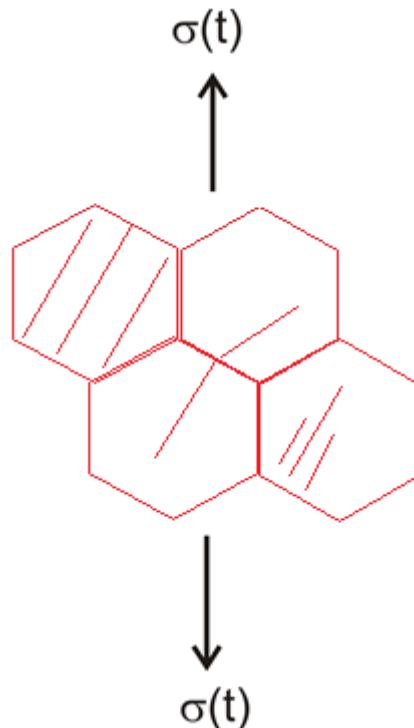


Figura 2.1 - Nucleação de trincas no interior dos grãos de uma estrutura cristalina.

2.2. FADIGA UNIAXIAL

Para determinar a resistência dos materiais sob a ação de cargas de fadiga, diversos ensaios em corpos de prova padronizados devem ser realizados. Como resultado, curvas de fadiga são definidas na qual a ordenada representa a resistência à fadiga e a abscissa o número de ciclos para a fratura. Essas curvas são chamadas de curvas S-N.

Por meio de dados experimentais é possível relacionar o número de ciclos até a falha (N_f) com a amplitude de tensão (σ_a) para um dado material, segundo a relação de Basquin:

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (2.17)$$

em que σ_a é a amplitude de tensão, N_f é o número de ciclos até a falha, σ'_f é o coeficiente de resistência à fadiga e b é o expoente de resistência a fadiga.

A figura abaixo representa uma curva S-N com limite de resistência à fadiga ocorrendo em 10^6 ciclos. Esse limite representa o número de ciclos para que ocorra vida infinita, ou seja, é a amplitude de tensão máxima do qual abaixo dela não será observado o fenômeno de fadiga, mesmo quando o material estiver submetido a um número infinito de ciclos.

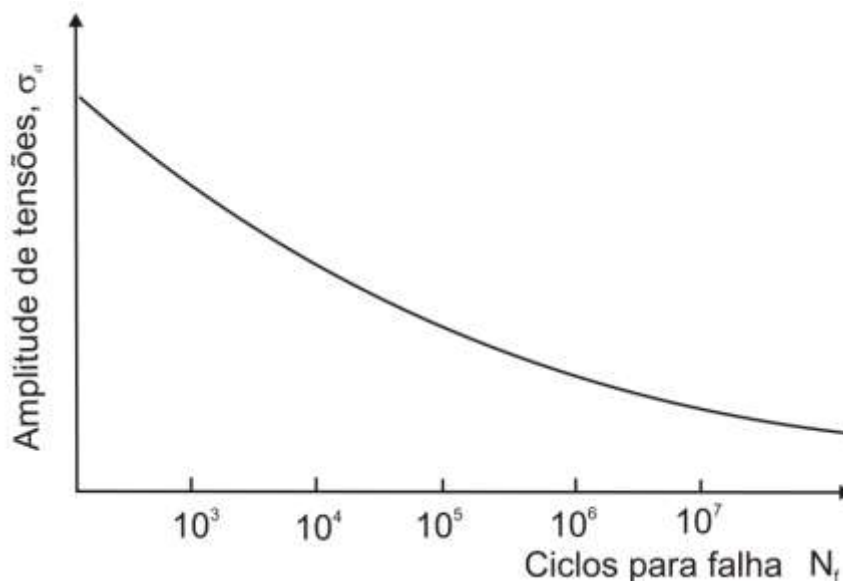


Figura 2.2 – Curva S-N.

A presença de uma componente de tensão média tem um efeito significativo na falha em fadiga. Quando uma componente de tensão média de tração é somada à componente alternada, o material apresenta falhas com tensões alternadas inferiores às que ocorreriam sob um carregamento puramente alternado. E esse aumento no nível de tensão média irá resultar em uma diminuição na vida em fadiga do material, como pode ser visto na figura a seguir.

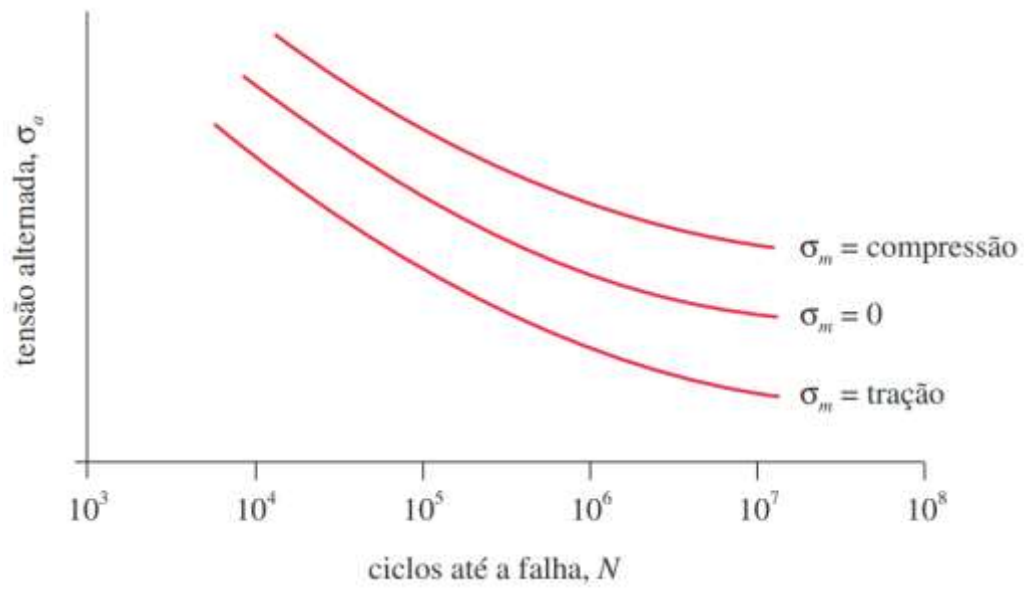


Figura 2.3 – Efeito da tensão média na resistência e limite de fadiga (Norton, 4ª edição, 2013).

3. PARÂMETRO \sqrt{area}

3.1. INTRODUÇÃO

As inclusões não metálicas são a causa predominante de uma menor resistência à fadiga em aços, mesmo para aços limpos e de alta resistência. Para prever o limite de fadiga e avaliar a qualidade do aço, Murakami propôs, em 1994, um método de classificação de inclusão baseado em estatísticas dos extremos. Esse método foi chamado de Método de Classificação de Inclusão por Estatística dos Extremos/Inclusion Rating Method by Statistics of Extreme (IRMSE).

Esse método mostra que se escolhermos um parâmetro de tamanho apropriado para as inclusões, o tamanho das inclusões obedecerá às estatísticas da teoria do valor extremo. O parâmetro de tamanho apropriado é a raiz quadrada da área projetada da inclusão máxima contida em uma área ou volume de inspeção padrão, \sqrt{area}_{max} . Deve-se prever o tamanho da inclusão máxima que pode estar contida em uma área ou volume maior que a área de inspeção padrão e então usar o parâmetro de tamanho, \sqrt{area}_{max} , para prever a faixa de dispersão da resistência à fadiga de aços duros.

3.2. INCLUSÕES NÃO METÁLICAS COMO ORIGEM DE FRATURA EM FADIGA

A figura (3.1) mostra um exemplo de inclusão não metálica que foi observada na origem da fadiga de um rolamento de aço sob um teste de fadiga em flexão rotativa. Se esta inclusão não existisse nesta amostra, a resistência à fadiga dela deveria ser maior que a tensão aplicada, $\sigma_a = 1078 \text{ MPa}$. Como o tamanho e a localização das inclusões não-metálicas se espalham aleatoriamente, a resistência à fadiga de aços de alta resistência se dispersam naturalmente. Embora existisse uma opinião firme de que a composição química do metal e a forma das inclusões não-metálicas influenciariam substancialmente no limite de fadiga, Murakami et al. relataram através de evidências experimentais distintas que o tamanho das inclusões (definido por \sqrt{area}) é o parâmetro geométrico mais crucial.

É conhecido empiricamente que o limite de fadiga intrínseco dos aços é determinado pela dureza de sua microestrutura. Para aços com $H_v < 400$, inclusões não-metálicas contidas em aços comerciais não são prejudiciais e temos a seguinte fórmula empírica

$$\sigma_w \cong 1,6H_v \quad (3.1)$$

onde σ_w é o limite de fadiga (MPa) e H_v é a dureza Vickers (kgf/mm²). Entretanto, para aços com $H_v > 400$, o efeito das inclusões se revela e o limite de fadiga intrínseco ou ideal, dado pela equação (3.1) não pode ser alcançado. A resistência à fadiga depende do tamanho (\sqrt{area}) e da localização da inclusão fatal e da dureza da matriz. As equações de Murakami que prevêem o limite de fadiga são classificadas em três categorias dependendo da localização da inclusão.

Limite de fadiga para uma inclusão na superfície

$$\sigma_w = 1,43 \frac{H_v + 120}{(\sqrt{area})^{\frac{1}{6}}} \quad (3.2)$$

Limite de fadiga para uma inclusão em contato com a superfície livre

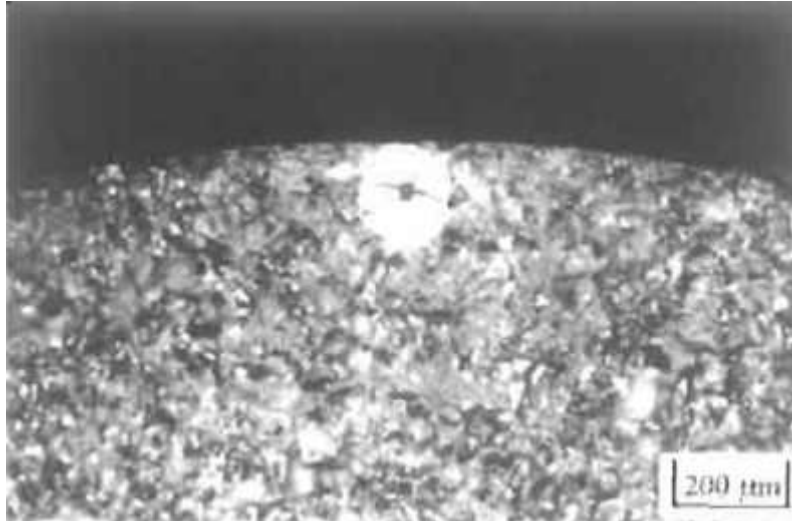
$$\sigma_w = 1,41 \frac{H_v + 120}{(\sqrt{area})^{\frac{1}{6}}} \quad (3.3)$$

Limite de fadiga para uma inclusão interna

$$\sigma_w = 1,56 \frac{H_v + 120}{(\sqrt{area})^{\frac{1}{6}}} \quad (3.4)$$

onde as unidades são: σ_w :MPa, \sqrt{area} : μm , e H_v : kgf/mm².

Já que para um valor de área constante, uma inclusão é mais prejudicial quando existe apenas em contato com a superfície livre de uma amostra, podemos usar a equação (3.3) em combinação com o maior valor de área, \sqrt{area}_{max} , obtido pelo IRMSE para prever o limite inferior (σ_{wl}) da resistência à fadiga dispersa de muitos espécimes ou elementos de máquinas.



Dureza Virckers $H_v = 636 \text{ kgf/mm}^2$
 Raiz quadrada da área projetada da inclusão $\sqrt{\text{area}} = 19,3 \mu\text{m}$
 Distância da superfície $h = 96 \mu\text{m}$
 Tensão aplicada na origem da fratura $\sigma' = 859 \text{ MPa}$
 Composição química da inclusão: Al-Ca-Mg-O

Figura 3.1 – Um exemplo de inclusão observado no centro de um “olho de peixe” observado na superfície da fratura por fadiga (Murakami, 2002).



Figura 3.2 – Classificação das inclusões por localização. (Murakami, 2002).

3.3. DETERMINAÇÃO DO PARÂMETRO $\sqrt{\text{área}}$ PELO MÉTODO DE ESTATÍSTICA DE EXTREMO

Como já foi dito, Murakami propôs um método para determinar o parâmetro $\sqrt{\text{área}}$ máximo de um aço utilizando Teoria dos Valores Extremos. Porém, nessa teoria temos diversas distribuições de probabilidade diferentes que podem ser utilizadas. A distribuição proposta por Murakami foi a de Gumbel, a seguir será mostrado um passo a passo de como determinar a maior raiz de área de inclusão exatamente como foi proposto por Murakami e na seção seguinte serão apresentadas outras distribuições de probabilidade utilizadas pela estatística dos extremos.

A figura (3.3) explica o procedimento prático para implementar o método de classificação de inclusão por estatística de extremos. O procedimento é brevemente explicado a seguir.

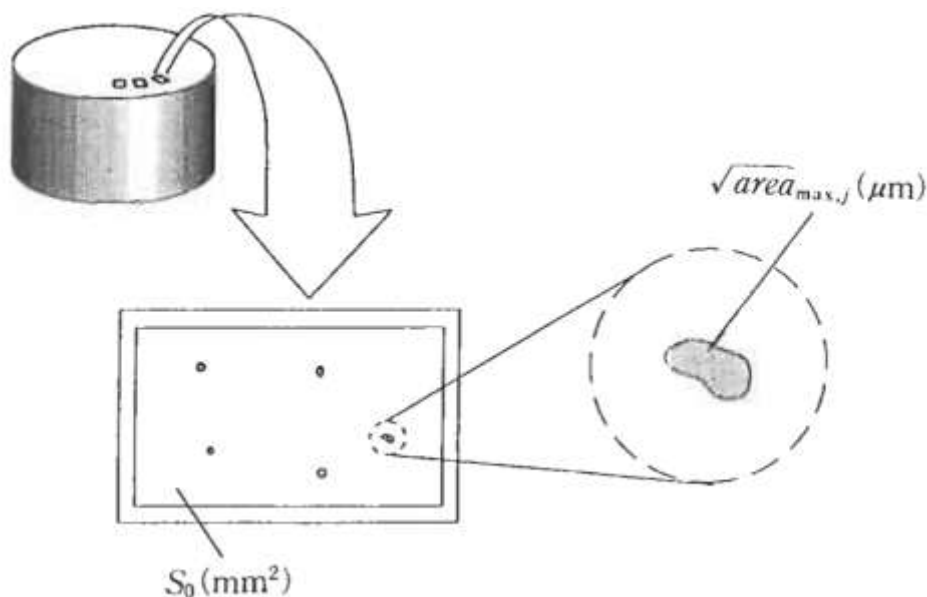


Figura 3.3 – Procedimento de classificação de inclusão por estatísticas de valores extremos (Murakami, 2002).

(1) Uma seção, perpendicular à tensão máxima principal, da amostra é cortada. Após o polimento com papel abrasivo nº 2000, a superfície de teste é finalizada com acabamento espelhado.

(2) Uma área de inspeção padrão S_0 (mm^2) é fixada. Geralmente, é aconselhável tirar uma foto em um microscópio de uma área aproximadamente equivalente a S_0 . Na área S_0 , a inclusão de maior tamanho é selecionada. Então, a raiz quadrada da área projetada dessa inclusão selecionada é calculada. Essa operação é repetida n vezes (em n áreas S_0).

(3) Os valores de $\sqrt{\text{área}}_{\text{max},j}$ são classificados, começando pelo menor, e indexados: (com $j = 1, 2, \dots, n$). Então temos a seguinte relação:

$$\sqrt{\text{área}}_{\text{max},1} \leq \sqrt{\text{área}}_{\text{max},2} \leq \dots \leq \sqrt{\text{área}}_{\text{max},n} \quad (3.5)$$

A função de distribuição cumulativa F , e as variáveis reduzidas y , são então calculadas pelas equações.

$$F_j = \frac{j}{n+1} \quad (3.6)$$

$$y_j = -\ln \left[-\ln \left(\frac{j}{n+1} \right) \right] \quad (3.7)$$

(4) Os dados são então plotados em papel de probabilidade. O ponto j tem o eixo das abscissas como sendo $\sqrt{area_{max,j}}$ e o eixo das coordenadas sendo representado por F_j ou y_j .

(5) As variáveis reduzidas y_j , plotadas contra $\sqrt{area_{max,j}}$ dão uma linha reta. A distribuição linear dos tamanhos máximos de inclusões pode ser expressa pela equação

$$\sqrt{area_{max}} = ay + b \quad (3.8)$$

em que

$$y = -\ln \left[-\ln \left(\frac{T-1}{T} \right) \right] \quad (3.9)$$

$$T = \frac{S}{S_0} \quad (3.10)$$

T representa o período de retorno e S a área de previsão e os parâmetros a e b são determinados através da regressão linear.

(7) Tendo encontrado a equação (3.8), para determinar o parâmetro $\sqrt{area_{max}}$ então basta usá-la, e para então encontrar o limite de resistência à fadiga, basta utilizar o valor do parâmetro encontrado nas fórmulas (3.2), (3.3) ou (3.4).

3.4. DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE DA TEORIA DOS VALORES EXTREMOS

A Teoria dos Valores Extremos desempenha um papel importante na modelagem de eventos com probabilidades muito pequenas ou eventos raros. Os modelos probabilísticos baseados nesta teoria visam prever, a partir de um conjunto de valores máximos de um evento contido em um domínio pequeno, um valor máximo contido de um evento contido em um domínio maior. Ou seja, no caso das inclusões não-metálicas contidas em um aço, essa teoria pode ser usada por exemplo para prever a maior raiz de área de uma inclusão contida em um corpo de prova feito de aço, a partir de um conjunto de máximas inclusões em diversas áreas de inspeção S_0 , como explicado anteriormente.

Contudo, esta teoria apresenta diversas distribuições de probabilidade diferentes que podem ser utilizadas. Neste caso, o Murakami propôs utilizar a distribuição de Gumbel, que apresenta a seguinte função de distribuição acumulada:

$$F(x) = \exp \left\{ - \exp \left(- \left(\frac{x-b}{a} \right) \right) \right\} \quad (3.11)$$

Aplicando logaritmo neperiano dos dois lados, é possível chegar na seguinte expressão.

$$y = \frac{x-b}{a} = - \ln[- \ln(F)] \quad (3.12)$$

Portanto, analisando a equação (3.12) podemos perceber que a estratégia proposta por Murakami, nada mais é que determinar os parâmetros **a** e **b** graficamente a partir de uma regressão linear e assim obter uma função que nos permite calcular o valor máximo que queremos. Pois conhecemos **x** e **y**, já que os valores **x** são as raízes de inclusão ordenadas do menor para maior e o valor de **y** é $-\ln[-\ln(F)]$, sendo **F** chamado de rank e no caso em questão, Murakami propôs utilizar o valor apresentado na equação (3.6), mas existem também outros valores de rank que podem ser utilizados.

As três distribuições mais utilizadas na teoria dos valores extremos são a de Weibull, a de Gumbel e a de Fréchet. A distribuição de Weibull possui a seguinte função de distribuição acumulada:

$$F(x) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{x}{a} \right)^k \right\} \quad (3.13)$$

Já a distribuição de Fréchet apresenta a seguinte função de distribuição acumulada:

$$F(x) = \exp\left\{-\left(\frac{x}{a}\right)^{-k}\right\} \quad (3.14)$$

Aplicando o logaritmo neperiano dos dois lados, temos que para distribuição de Weibull:

$$\ln[-\ln(1 - F)] = k \ln(x) - k \ln(a) \quad (3.15)$$

Onde pode ser feito uma regressão linear com $Y = \ln[-\ln(1 - F)]$ e $X = \ln(x)$. Já para a distribuição de Fréchet, temos:

$$-\ln[-\ln(F)] = k \ln(x) - k \ln(a) \quad (3.16)$$

Onde pode ser feito uma regressão linear com $Y = -\ln[-\ln(F)]$ e $X = \ln(x)$.

Após determinar os parâmetros das distribuições, basta achar o valor \sqrt{area}_{max} isolando o valor de x nas equações (3.13) e (3.14):

$$\textit{Weibull:} \quad \sqrt{area}_{max} = a[-\ln(1 - F)]^{\frac{1}{k}} = a \left[-\ln\left(\frac{1}{T}\right) \right]^{\frac{1}{k}} \quad (3.17)$$

$$\textit{Fréchet:} \quad \sqrt{area}_{max} = a[-\ln(F)]^{-\frac{1}{k}} = a \left[-\ln\left(\frac{T - 1}{T}\right) \right]^{-\frac{1}{k}} \quad (3.18)$$

Portanto, é interessante fazer uma análise usando cada uma das três distribuições e comparar qual das três é mais eficiente, onde supõe-se que a usada por Murakami será realmente a melhor.

4. EXTENSÃO DO PARÂMETRO \sqrt{area} PARA O PROBLEMA DE FADIGA UNIAXIAL TORCIONAL

Na literatura, Endo e Ishimoto propuseram um critério para lidar com o problema da fadiga uniaxial e torcional conjuntas, e uma série de estudos foi conduzida usando o critério. De acordo com o critério, os limites de fadiga sob carga conjunta e sob carga uniaxial são correlacionados pela seguinte equação:

$$\sigma_n + \kappa\sigma_p = \sigma_w \quad (4.1)$$

onde σ_w é o limite de fadiga para fadiga conjunta, σ_n é a tensão aplicada perpendicularmente a trinca, σ_p é a tensão aplicada paralelamente a trinca e κ é um parâmetro de biaxialidade. Baseado no ponto de vista da mecânica da fratura, o valor de $\kappa = -0,18$ pode ser estimado. Neste estudo, examinamos a adequação da Eq. (25) fazendo uso do modelo McEvily. Nota-se que o valor constante de $k = -0,18$ é uma aproximação e não representa o caso geral sob carga multiaxial.

Combinando as equações (3.1), (3.2) e (3.3) do caso uniaxial com a equação (4.1), Endo e Ishimoto chegaram nas equações abaixo para o caso biaxial.

Limite de fadiga para uma inclusão na superfície

$$\sigma_{nw} = \left(1 + \kappa \frac{\sigma_p}{\sigma_n}\right) \times 1,43 \frac{H_v + 120}{(\sqrt{area})^{\frac{1}{6}}} \quad (4.2)$$

Limite de fadiga para uma inclusão em contato com a superfície livre

$$\sigma_{nw} = \left(1 + \kappa \frac{\sigma_p}{\sigma_n}\right) \times 1,41 \frac{H_v + 120}{(\sqrt{area})^{\frac{1}{6}}} \quad (4.3)$$

Limite de fadiga para uma inclusão interna

$$\sigma_{nw} = \left(1 + \kappa \frac{\sigma_p}{\sigma_n}\right) \times 1,56 \frac{H_v + 120}{(\sqrt{area})^{\frac{1}{6}}} \quad (4.4)$$

Quando a razão $\sigma_p/\sigma_n = 0$, temos o caso uniaxial já mostrado, já quando $\sigma_p/\sigma_n = -1$ temos o caso de torção pura. Assim, substituindo $\sigma_p/\sigma_n = -1$ e $\kappa = -0,18$ nas equações (4.2), (4.3) e (4.4), temos as seguintes fórmulas para o limite de fadiga em torção:

Limite de fadiga para uma inclusão na superfície

$$\tau_w = 1,21 \frac{H_v + 120}{(\sqrt{area})^{\frac{1}{6}}} \quad (4.5)$$

Limite de fadiga para uma inclusão em contato com a superfície livre

$$\tau_w = 1,19 \frac{H_v + 120}{(\sqrt{area})^{\frac{1}{6}}} \quad (4.6)$$

Limite de fadiga para uma inclusão interna

$$\tau_w = 1,32 \frac{H_v + 120}{(\sqrt{area})^{\frac{1}{6}}} \quad (4.7)$$

Assim como o caso uniaxial, o caso mais prejudicial é o da inclusão em contato com a superfície, sendo portanto este caso o que devemos utilizar para prever o limite de fadiga em torção.

5. MÉTODO DA ESCADA

5.1. MÉTODO DA ESCADA CONVENCIONAL

O método da escada é um método utilizado em ensaios de fadiga para se determinar o limite de fadiga de um material, sendo o mais popular para tal fim. Ele consiste em primeiramente estimar um limite de fadiga e então é conduzido um teste de fadiga com uma tensão um pouco abaixo do valor estimado. Se o espécime falhar antes da vida estipulada, o próximo espécime deve ser testado em um nível de tensão um incremento abaixo do anterior. Já se ele não falhar, um novo teste deve ser conduzido com um nível de tensão um incremento acima do anterior. Para este método, recomenda-se em torno de 15 espécimes e os incrementos de tensão normalmente escolhidos são abaixo de 5% do valor inicial estimado para o limite de fadiga.

Após conduzir os testes, deve-se então utilizar um método para determinar os parâmetros estatísticos do teste. Os dois métodos mais utilizados são o de Zhang-Keccecioglu e o de Dixon-Mood. O primeiro método tem a flexibilidade de ajustar os dados de teste a uma distribuição estatística diferente da distribuição normal e pode ser usado para etapas de tensão variáveis. O último método é fácil de usar e geralmente fornece resultados conservadores, sendo portanto o mais utilizado.

O método de Dixon-Mood fornece fórmulas aproximadas para média (μ_S) e para o desvio padrão (σ_S) do limite de fadiga (S_e), ele assume que o limite de fadiga segue uma distribuição normal. É preciso determinar essas duas propriedades estatísticas usando os dados do evento menos frequente (ou seja, apenas os dados dos testes que falharam ou apenas os dados dos testes que sobreviveram). Os níveis de tensão S_i são espaçados igualmente por um incremento d escolhido e numerados de $i = 0$ até $i = p$, sendo em $i = 0$ o menor nível de tensão e em $i = p$ o maior nível de tensão. O incremento deve estar no seguinte intervalo:

$$0,5\sigma_S \leq d \leq 2,0\sigma_S \quad (5.1)$$

Denotado por f_i o número de amostras no evento menos frequente de tensão i , os números abaixo podem ser calculados:

$$F = \sum f_i \quad (5.2)$$

$$A = \sum i f_i \quad (5.3)$$

$$B = \sum i^2 f_i \quad (5.4)$$

Sendo assim, a média será:

$$\mu_S = S_0 + d \left(\frac{A}{F} \pm \frac{1}{2} \right) \quad (5.5)$$

Onde o sinal (+) é usado se o evento menos frequente for de sobrevivência e o sinal (-) é usado se o evento menos frequente for de falha.

Já o desvio padrão é estimado por:

$$\sigma_S = 1,62d \left[\frac{BF - A^2}{F^2} + 0,029 \right], \text{ caso } \frac{BF - A^2}{A^2} \geq 0,3 \quad (5.6)$$

e

$$\sigma_S = 1,53 d, \text{ caso } \frac{BF - A^2}{A^2} < 0,3 \quad (5.7)$$

Assim, possuindo a média e o desvio padrão para uma distribuição normal, é possível determinar o limite de fadiga, com uma determinada confiabilidade e confiança, pela fórmula abaixo:

$$S_{e,R,C} = \mu_S - K\sigma_S \quad (5.8)$$

Onde o fator K para um limite de tolerância unilateral de uma distribuição normal é tabelado e a tabela para encontrá-lo se encontra na página seguinte.

Tabela 5.1 - Fator K para um limite de tolerância unilateral de uma distribuição normal. (Lieberman, 1958)

C	0.75					0.90				
	0.75	0.90	0.95	0.99	0.999	0.75	0.90	0.95	0.99	0.999
n										
3	1.464	2.501	3.152	4.396	5.805	2.602	4.258	5.310	7.340	9.651
4	1.256	2.134	2.680	3.726	4.910	1.972	3.187	3.967	5.437	7.128
5	1.152	1.961	2.463	3.421	4.507	1.698	2.742	3.400	4.666	6.112
6	1.087	1.860	2.336	3.243	4.273	1.540	2.494	3.091	4.242	5.556
7	1.043	1.791	2.250	3.126	4.118	1.435	2.333	2.894	3.972	5.201
8	1.010	1.740	2.190	3.042	4.008	1.360	2.219	2.755	3.783	4.955
9	0.984	1.702	2.141	2.977	3.924	1.302	2.133	2.649	3.641	4.772
10	0.964	1.671	2.103	2.927	3.858	1.257	2.065	2.586	3.532	4.629
11	0.947	1.646	2.073	2.885	3.804	1.219	2.012	2.503	3.444	4.515
12	0.933	1.624	2.048	2.851	3.760	1.188	1.966	2.448	3.371	4.420
13	0.919	1.606	2.026	2.822	3.722	1.162	1.928	2.403	3.310	4.341
14	0.909	1.591	2.007	2.796	3.690	1.139	1.895	2.363	3.257	4.274
15	0.899	1.577	1.991	2.776	3.661	1.119	1.866	2.329	3.212	4.215
16	0.891	1.566	1.977	2.756	3.637	1.101	1.842	2.299	3.172	4.164
17	0.883	1.554	1.964	2.739	3.615	1.085	1.820	2.272	3.136	4.118
18	0.876	1.544	1.951	2.723	3.595	1.071	1.800	2.249	3.106	4.078
19	0.870	1.536	1.942	2.710	3.577	1.058	1.781	2.228	3.078	4.041
20	0.865	1.528	1.933	2.697	3.561	1.046	1.765	2.208	3.052	4.009
21	0.859	1.520	1.923	2.686	3.545	1.035	1.750	2.190	3.028	3.979
22	0.854	1.514	1.916	2.675	3.532	1.025	1.736	2.174	3.007	3.952
23	0.849	1.508	1.907	2.665	3.520	1.016	1.724	2.159	2.987	3.927
24	0.845	1.502	1.901	2.656	3.509	1.007	1.712	2.145	2.969	3.904
25	0.842	1.496	1.895	2.647	3.497	0.999	1.702	2.132	2.952	3.882
30	0.825	1.475	1.869	2.613	3.545	0.966	1.657	2.080	2.884	3.794
35	0.812	1.458	1.849	2.588	3.421	0.942	1.623	2.041	2.833	3.730
40	0.803	1.445	1.834	2.568	3.395	0.923	1.598	2.010	2.793	3.679
45	0.795	1.435	1.821	2.552	3.375	0.908	1.577	1.986	2.762	3.638
50	0.788	1.426	1.811	2.538	3.358	0.894	1.560	1.965	2.735	3.604

5.2. MÉTODO DA ESCADA MODIFICADO

O método da escada modificado é uma variação do método da escada original e é utilizado quando o número de espécimes é limitado. Ele é um método proposto pelo CIMAC (Conselho Internacional de Máquinas de Combustão) e pode ser encontrado na norma “IACS UR M53, Appendix IV - Guidance for evaluation of Fatigue Tests”.

Diferente do método original, o valor de tensão inicial escolhido deve ser um pouco abaixo do valor de tensão estimado para o limite de fadiga. Fora isso, após um espécime ser conduzido a um teste, o mesmo deve ser reutilizado com uma tensão igual a próxima tensão incrementada caso não tenha ocorrido falha, já para quando ocorre falha, um novo espécime é utilizado com dois incrementos abaixo do incremento de falha anterior.

Assim, o número total de amostras não será exatamente o número de espécimes e sim o número de testes que falharam somados aos números de testes que não falharam. Fora essas mudanças, o resto dos procedimentos são exatamente iguais aos do método da escada original.

6. METODOLOGIA

6.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo será descrito a metodologia utilizada no projeto, bem como apresentada as características do material utilizado. Em resumo, o passo a passo da metodologia será:

- i. Realizar ensaios uniaxiais para estimar a curva S-N;
- ii. Realizar ensaios torcionais para estimar a curva τ -N;
- iii. Realizar o Método da Escada Modificado para determinar o limite de fadiga uniaxial;
- iv. Realizar o Método da Escada Modificado para determinar o limite de fadiga torcional;
- v. Realizar o Método do Parâmetro \sqrt{area} para determinar o limite de fadiga uniaxial;
- vi. Realizar o Método do Parâmetro \sqrt{area} para determinar o limite de fadiga torcional;
- vii. Comparar os resultados obtidos pelo Método da Escada Modificado e pelo Método do Parâmetro \sqrt{area} .

6.2. MATERIAL

O material utilizado neste trabalho é o aço DIN 42CrMo4, cuja as propriedades mecânicas e a composição química são bastante similares ao do aço 4140. Este aço foi verificado em microscópio como um material naturalmente defeituoso, pois possui inclusões não metálicas. A formação dessas inclusões é uma consequência inevitável da físico-química das reações que ocorrem durante o processo de fabricação dos aços, podendo se formar devido às operações de desoxidação e tratamento inadequados, desgastes de refratários, entre outros motivos.

As propriedades mecânicas e a composição química do aço 4140, foram fornecidas pela PUC- Rio e encontram-se nas tabelas 6.1 e 6.2.

Tabela 6.1 – Propriedades Mecânicas do Aço 4140

Limite de Escoamento - S_y (MPa)	710
Limite de Resistência a Tração - S_u (MPa)	900
Alongamento	20%
Redução de Área	60%
Dureza Vickers - H_v (kgf/mm²)	320

Tabela 6.2 – Composição Química do Aço 4140

C%	Si% max	Mn%	P% max	S% max	Cr%	Mo%
0,38-0,45	0,40	0,60-0,90	0,025	0,035	0,90-1,20	0,15-0,30

6.3. NORMAS A SEREM SEGUIDAS NOS ENSAIOS DE FADIGA

Os ensaios serão realizados seguindo a norma ASTM E466-15 - Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials.

6.3.1 Desenho Técnico do Corpo de Prova

Os corpos de provas foram produzidos de acordo com a norma ASTM E466-15, nela, temos que o CP deve obedecer às seguintes características:

- O diâmetro da seção de teste deve estar entre 0,200 in (5,08 mm) e 1,000 in (25,4 mm);
- A área da seção transversal da parte com maior diâmetro deve ser pelo menos 1,5 vezes maior que a da área da seção de teste, mas de preferência 4 vezes maior;
- O raio de filete deve ser pelo menos 8 vezes o diâmetro da seção de teste;
- O comprimento da seção de teste deve ser aproximadamente duas a três vezes maior que o diâmetro da seção de teste;
- A área de teste deve ter rugosidade máxima de superfície de $0,2 \mu m$.

Atendendo as seguintes exigências, foi desenvolvido o corpo de prova com as dimensões a seguir:

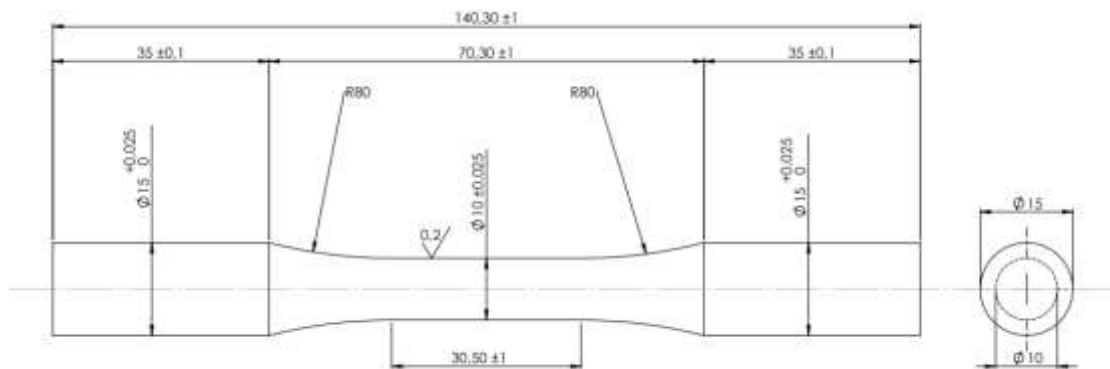


Figura 6.1 – Dimensões do Corpo de Prova.



Figura 6.2 – Foto do corpo de prova utilizado.

6.3.2 Máquinas Utilizadas nos Ensaios

As máquinas que foram utilizadas para realizar os ensaios em fadiga tanto da parte de estimar as curvas S-N e τ -N, quanto da parte do Método da Escada Modificado foram:

- MTS 809 – Utilizada tanto para os ensaios uniaxiais quanto torcionais;
- MTS 810 – Utilizada apenas para ensaios uniaxiais.

As máquinas MTS 809 são equipadas com garras de capacidade de 100 kN tração/compressão e 1100 Nm de torque e são capazes de realizar ensaios de fadiga controlados por força e por deformação.

A pressão na garra tem um limite de 45 MPa e pode ser calcula pela seguinte fórmula:

$$\sigma_{collet} = 0,422 \sqrt{P^2 + \left(\frac{2T}{D}\right)^2} \quad (6.1)$$

Onde P é força axial aplicada em kN, T é o torque aplicado em Nm e D é o diâmetro do corpo de prova em centímetros.



Figura 6.3 – Máquina MTS 809.

Já as máquinas MTS 810 possuem capacidade de 100 kN em tração/compressão e a pressão na garra possui limite de 21MPa e pode ser calculada pela seguinte fórmula:

$$\begin{aligned}\sigma &= 0,18P \rightarrow \text{para ensaios cíclicos} \\ \sigma &= 0,16P \rightarrow \text{para ensaios monotônicos}\end{aligned}\tag{6.2}$$

Onde P é a força aplicada em kN.



Figura 6.4 – Máquina MTS 810.

6.4. ESTIMANDO AS CURVAS S-N E τ -N

6.4.1 – Estimando a Curva S-N

Serão feitos ensaios de fadiga em tração e compressão alternada pura, afim de levantar a curva S-N para obter o limite de fadiga em tração-compressão alternada f_{-1} , que é necessário para determinar os parâmetros dos modelos multiaxiais de fadiga.

Primeiramente deve-se estimar esta curva a partir do limite de resistência a tração final do material (S_u), que é o apresentado na Tabela 6.1. Conhecendo-se o valor de S_u , então deve-se utilizá-lo para determinar as constantes “a” e “b” da equação (6.3).

$$S = aN^b \quad (6.3)$$

Para estimar os valores de tensão para os pontos de 10^3 ciclos e 10^6 ciclos, usam-se os seguintes valores mostrados na imagem abaixo, sendo S_{1000} o valor da tensão para 10^3 ciclos e S_e o limite de fadiga, que também é o valor para tensão em 10^6 ciclos:

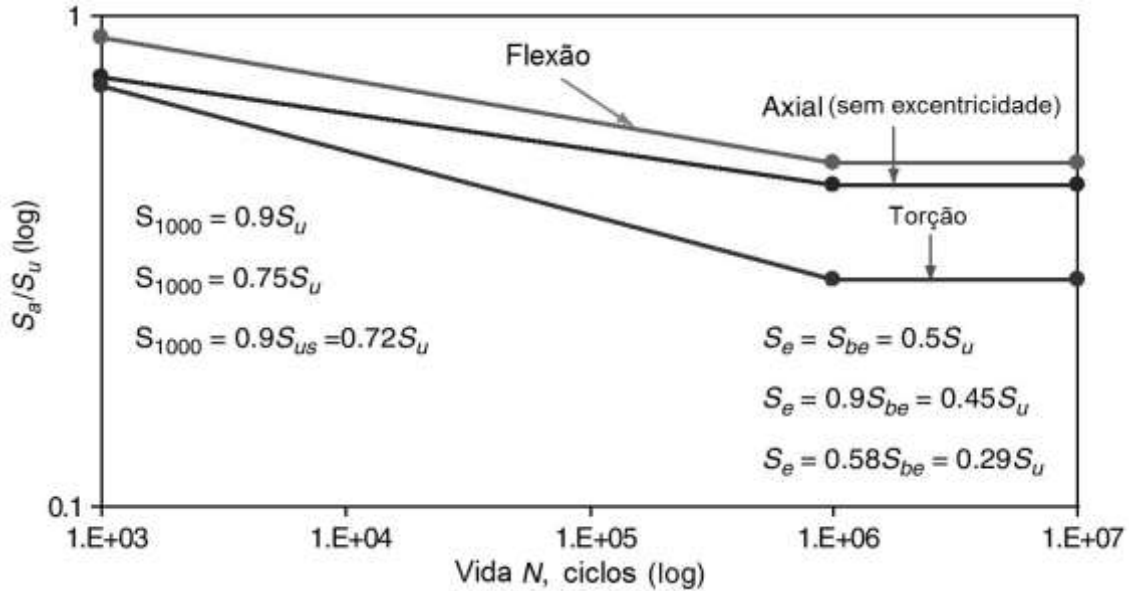


Figura 6.5 – Curvas S-N generalizadas para diferentes tipos de carregamentos, para aços (Yung Li-Lee modificado, 2005)

Conforme a imagem, temos que os valores de tensão para 10^3 e 10^6 ciclos, são:

$$S(N = 10^3) = 0,75S_u \quad (6.4)$$

$$S(N = 10^6) = 0,45S_u, \text{ para } S_u < 1400\text{MPa} \\ \text{ou } S(N = 10^6) = 700\text{MPa}, \text{ para } S_u > 1400\text{MPa} \quad (6.5)$$

Possuindo esses dois pontos para traçar a curva S-N, determinam-se então as constantes “a” e “b” e com elas temos uma estimativa inicial da curva S-N.

Com a estimativa inicial para curva S-N, é possível assim realizar os ensaios de fadiga calculando a tensão que se deve aplicar no corpo de prova para que o mesmo falhe para o número de ciclos desejado, utilizando a equação (6.1).

Com os novos dados coletados dos ensaios realizados, calculam-se novamente as constantes da equação (6.1) para gerar assim uma curva S-N mais precisa que a anterior. Possuindo a nova curva S-N traçada, determina-se então o limite de fadiga em tração-compressão alternada f_{-1} , que é o nosso objetivo.

6.2.3 - Estimando a Curva τ -N

Serão feitos também ensaios de fadiga em torção alternada para determinar o limite de fadiga em torção alternada t_{-1} , que também é necessário para determinar os parâmetros dos modelos de fadiga multiaxial.

Para se determinar a curva τ -N, é feito um processo similar ao descrito anterior, porém, de acordo com a Figura 6.2, os valores para as tensões estimadas em 10^3 e 10^6 ciclos, são:

$$\tau = aN^b \quad (6.6)$$

$$\tau(N = 10^3) = 0,72S_u \quad (6.7)$$

$$\begin{aligned} \tau(N = 10^6) &= 0,29S_u, \text{ para } S_u < 1400MPa \\ \text{ou } \tau(N = 10^6) &= \frac{700}{\sqrt{3}} = 404,1MPa, \text{ para } S_u > 1400MPa \end{aligned} \quad (6.8)$$

Possuindo os dois pontos estimados, do mesmo modo que o processo descrito anteriormente, determinam-se as constantes “a” e “b” e assim estima-se a curva τ -N.

E novamente, da mesma maneira que o processo descrito anteriormente, com a estimativa da curva τ -N é possível planejar os ensaios calculando-se a tensão necessária para que o corpo de prova falhe para um determinado número de ciclos.

Com os novos dados coletados dos ensaios realizados, calculam-se novamente as constantes da equação (6.4) para gerar assim uma curva τ -N mais precisa que a anterior. Possuindo a nova curva τ -N traçada, determina-se então o limite de fadiga em torção alternada t_{-1} , que é o nosso objetivo.

6.2.3 – Calculando os Fatores Modificadores

Como o projeto leva em conta também os fatores modificadores de tensão limite de fadiga, então as equações (6.3) e (6.6) são alteradas devido à aplicação dos fatores modificadores. Serão utilizado o Fator de Carregamento (C_L), o Fator de Acabamento de Superfície (C_S) e o Fator de Tamanho (C_D). Sendo estes determinados da maneira mostrada abaixo.

Fator de Carregamento (C_L):

Tipo de Carregamento	C_L	Comentários
Axial Puro	0.9	
Axial (com leve flexão)	0.7	
Flexão	1.0	
Torcional	0.58	Para aços
Torcional	0.8	Para ferro fundido

Figura 6.6 – Fator de Carregamento (C_L) para diferentes tipos de carregamento (Yung-Li Lee modificado, 2005).

Conforme a tabela acima, serão usado os valores de 0,9 e 0,58 para os casos axiais e torcionais respectivamente.

Fator de Acabamento de Superfície (C_s):

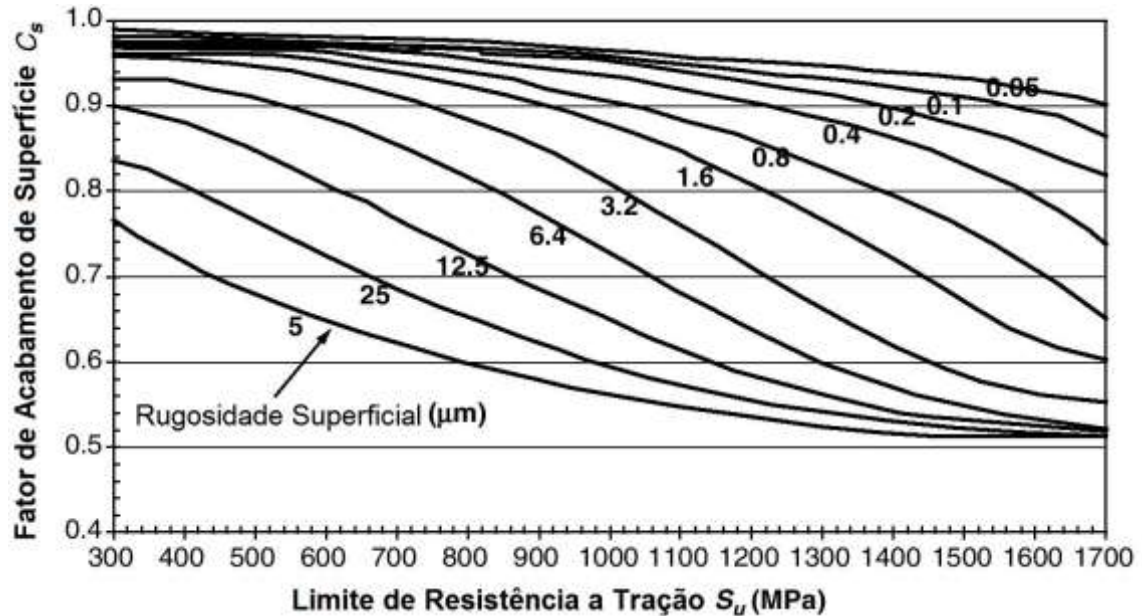


Figura 6.7 – Fator de Acabamento de Superfície em função da rugosidade e do S_u (Yung-Li Lee modificado, 2005).

Portanto, de acordo com o gráfico acima, para uma rugasidade de $0,2\mu m$ e $S_u = 900MPa$, utilizaremos um fator de acabamento superficial $C_s = 0,95$.

Fator de Tamanho (C_D):

$$C_D = 1,189 \times d^{-0,097} \quad \text{para } 8 \text{ mm} < d < 250 \text{ mm} \quad (6.7)$$

Portanto, para o diâmetro de 10 mm do corpo de prova, o fator de tamanho será $C_D = 0,95$.

6.5. MÉTODO DA ESCADA MODIFICADO

Após estimar as curvas S-N e τ -N e estimar um valor inicial para os limites de fadiga uniaxial e torcional, foi realizado então o Método da Escada Modificado para se obter o limite de fadiga uniaxial e torcional. O primeiro valor de tensão aplicada no procedimento do Método da Escada foi decidido a partir do valor estimado pelas curvas, já o número de ciclos utilizado nos ensaios foi de 2 milhões ou até falhar, e então os testes foram realizados conforme o procedimento descrito no capítulo 5.

6.6. CÁLCULO DOS LIMITES DE FADIGA PELO PARÂMETRO \sqrt{area}

Para determinar os limites de fadiga uniaxial e torcional pelo Método do Parâmetro \sqrt{area} , descrito no Capítulo 3, foram cortadas amostras do corpo de prova e depois embutidas. As amostras foram cortadas conforme o método descrito anteriormente, seccionadas paralelamente ao plano das tensões principais, portanto as amostras a serem analisadas para o caso uniaxial foram cortadas paralelas a seção do diâmetro do corpo de prova, já as amostras utilizadas para o caso torcional foram cortadas a 45 graus do plano de seção do diâmetro do corpo de prova. Foram preparadas duas amostras para o caso uniaxial e duas amostras para o caso torcional.

A figura 6.9 representa a construção do plano de análise para cada um dos casos, exemplificando os planos de cortes utilizados para seccionar parte do corpo de prova para se obter as amostras de análise.

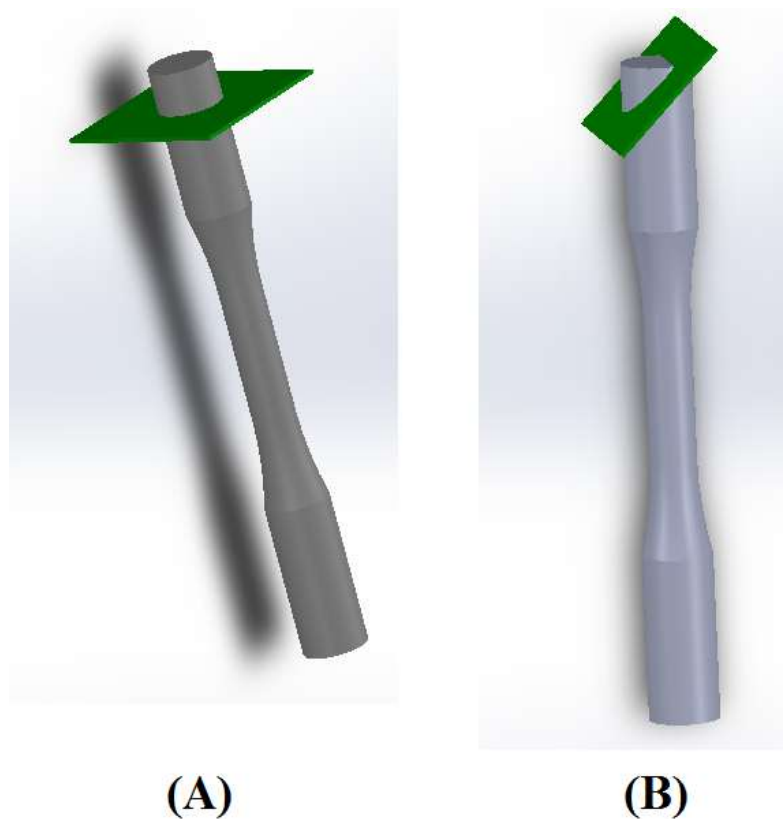


Figura 6.8 – Construção dos planos de análise do método do parâmetro \sqrt{area} para os casos: (A) – uniaxial, (B) – torcional.

As amostras embutidas então foram lixadas com lixas d'água de granulometria 220, depois 400, depois 800, depois 1200 e por último de 2000. A troca de cada lixa para a próxima foi feita após as amostras estarem todas perfeitamente lixadas com a lixa anterior, ou seja, com os riscos de lixamento apenas em uma direção e a amostra estando plana, não apresentando nenhuma formação de outros planos.

Após lixar com todas as lixas, as amostras foram então polidas com alumina 0,3 μm . Após o polimento, as amostras foram analisadas no microscópio confocal LEXT OLS4100, equipamento onde é possível não só enxergar as inclusões do aço, como medir a área delas. Com as áreas medidas, deu-se continuidade ao procedimento descrito no capítulo 3 e determinou-se os limites de fadiga uniaxial e torcional.

As amostras foram lixadas e polidas na politriz POLIPAN-2 PANTEC, apresentada abaixo.



Figura 6.9 – Foto da politriz POLIPAN-2 PANTEC.

Uma foto do microscópio LEXT OLS4100 utilizado para medir as áreas das inclusões se encontra abaixo.



Figura 6.10 – Foto do microscópio LEXT OLS4100.

A imagem abaixo apresenta dois exemplares de amostras já cortadas, lixadas e polidas, prontas para serem analisadas no microscópio.



Figura 6.11 – Foto de amostras prontas para a análise no microscópio.

7. RESULTADOS

7.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo teremos os resultados encontrados no projeto, ele está dividido da seguinte maneira:

- i. Resultados da curva S-N estimada;
- ii. Resultado da curva τ -N estimadas;
- iii. Resultado do Método da Escada Modificado para o caso uniaxial;
- iii. Resultado do Método da Escada Modificado para o caso torcional;
- iv. Resultado do Método do Parâmetro \sqrt{area} para o caso uniaxial;
- v. Resultado do Método do Parâmetro \sqrt{area} para o caso torcional;
- vi. Análise dos Resultados.

7.2. RESULTADO DA CURVA S-N ESTIMADA

Como descrito no capítulo de metodologia anterior, os primeiros ensaios feitos foram para estimar as curvas S-N e τ -N do material. Antes de realizar os ensaios foram primeiramente estimadas as tensões da curva S-N e τ -N para 10^3 ciclos e para 10^6 ciclos. Para curva S-N, essas tensões estimadas foram:

Tabela 7.1 – Estimativa da Tensão em 10^3 e 10^6 ciclos para curva S-N do aço 4140

Número de Ciclos	Tensão Estimada (MPa)
10^3	675
10^6	388,8

Já os resultados para os testes de tração-compressão encontram-se na tabela abaixo.

Tabela 7.2- Resultados dos ensaios em tração-compressão do aço 4140

Identificação	Força Aplicada (kN)	Tensão Aplicada (MPa)	Número de Ciclos até a Falha	Frequência (Hz)	Pressão da Garra (MPa)
CP3	43,0	547,5	10167	5	25
CP4	38,0	483,8	62560	5	25
CP7	32,5	413,8	338148	7	25

Traçando a curva S-N com utilizando tanto os pontos estimados quanto os obtidos pelos ensaios, temos o resultado apresentado na figura 7.1.

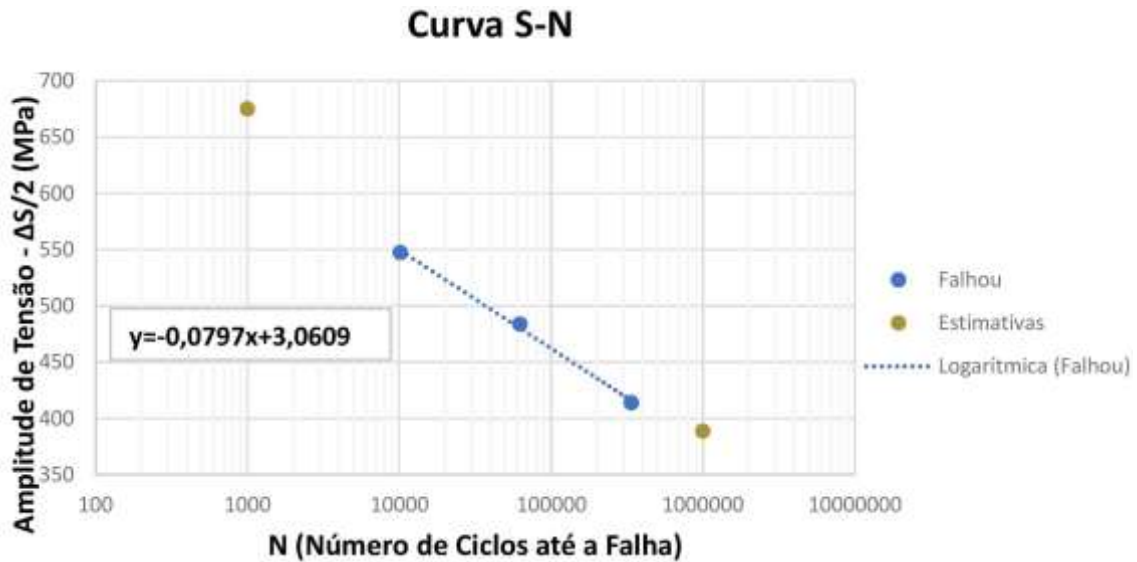


Figura 7.1 – Curva S-N para o aço 4140.

Com a curva S-N traçada, é possível determinar a seguinte expressão para curva S-N do aço 4140:

$$S = 1150,5 N^{-0,08} \quad (7.1)$$

Já o limite de fadiga estimado a partir da curva S-N estimada é:

$$S = 382,5 \text{ MPa} \quad (7.2)$$

7.3. RESULTADO DA CURVA τ -N ESTIMADA

As tensões estimadas em 10^3 ciclos e 10^6 ciclos para a curva τ -N foram:

Tabela 7.3 – Estimativa da Tensão em 10^3 e 10^6 ciclos para curva τ -N do aço 4140

Número de Ciclos	Tensão Estimada (MPa)
10^3	648
10^6	248

Já os resultados para os testes em torção pura se encontram na tabela abaixo.

Tabela 7.4- Resultados dos ensaios em torção pura do aço 4140

Identificação	Torque Aplicado (Nm)	Tensão Aplicada (MPa)	Número de Ciclos até a Falha	Frequência (Hz)	Pressão da Garra (MPa)
CP6	45,2	230,2	2503247 (não falhou)	13	35
CP5	63	320,9	145776	7	49
CP8	55	280,1	1146823	10	43
CP6(repetido)	55	280,1	696837	9	43

Traçando a curva τ -N com utilizando tanto os pontos estimados quanto os obtidos pelos ensaios, temos o seguinte resultado:

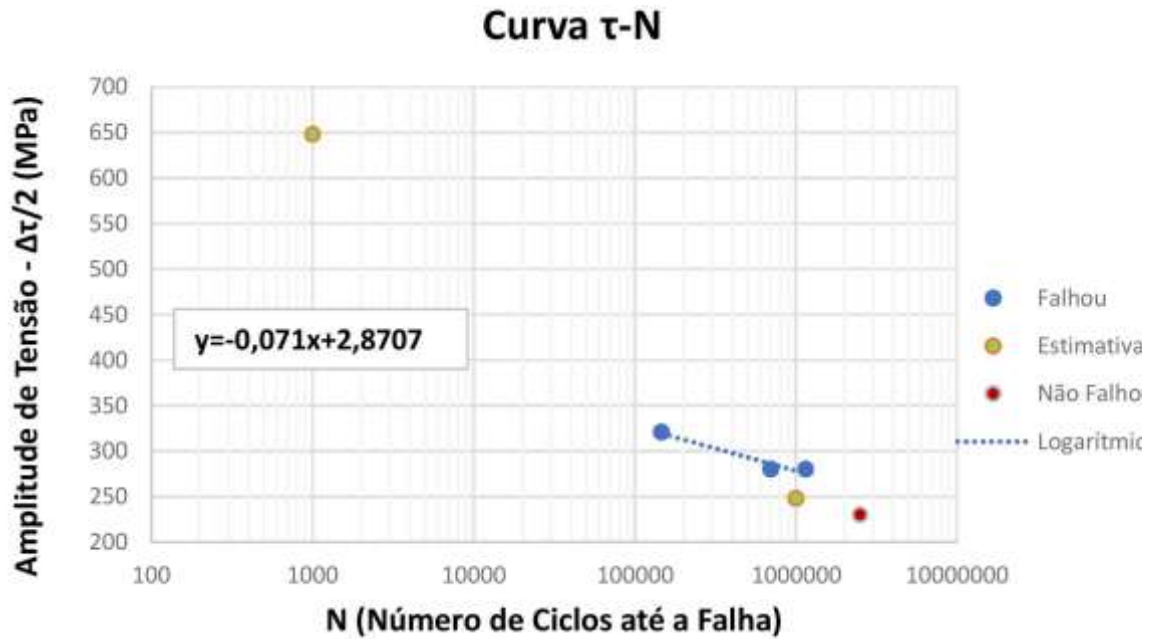


Figura 7.2 – Curva τ -N para o aço 4140.

Com a curva τ -N traçada, é possível determinar a seguinte expressão para curva τ -N do aço 4140:

$$\tau = 742,5 N^{-0,071} \quad (7.3)$$

Já o limite de fadiga estimado a partir da curva τ -N estimada é:

$$\tau = 278,4 \text{ MPa} \quad (7.4)$$

7.4. RESULTADOS DO MÉTODO DA ESCADA MODIFICADO PARA O CASO UNIAXIAL

Com base no limite de fadiga estimado pela curva S-N, um incremento de 15MPa foi escolhido para o método da escada. Já a tensão inicial escolhida para o primeiro ensaio foi de 345MPa. A tabela 7.5 contém os resultados dos ensaios realizados.

Tabela 7.5 – Resultados do método da escada modificado para ensaios uniaxiais

Identificação do CP	Amplitude de Força (kN)	Amplitude de Tensão (MPa)	Frequência (Hz)	Pressão da Garra (MPa)	Resultado do Ensaio
30	27,1	345	20	16	Run-Out
30	28,3	360	21	16	Run-Out
30	29,5	375	20	17	Run-Out
30	30,6	390	20	18	Falha: 423047 ciclos
54	28,3	360	15	16	Run-Out
54	29,5	375	15	17	Run-Out
54	30,6	390	15	18	Falha: 584601 ciclos
9	28,3	360	15	14	Run-Out
9	29,5	375	12	14	Run-Out
9	30,6	390	12	14	Run-Out
9	31,8	405	10	14	Falhou: 50432 ciclos
14	29,5	375	10	14	Run-Out
14	30,6	390	8	10	Falhou: 135157 ciclos

Colocando os resultados da tabela acima no gráfico da figura 7.3.

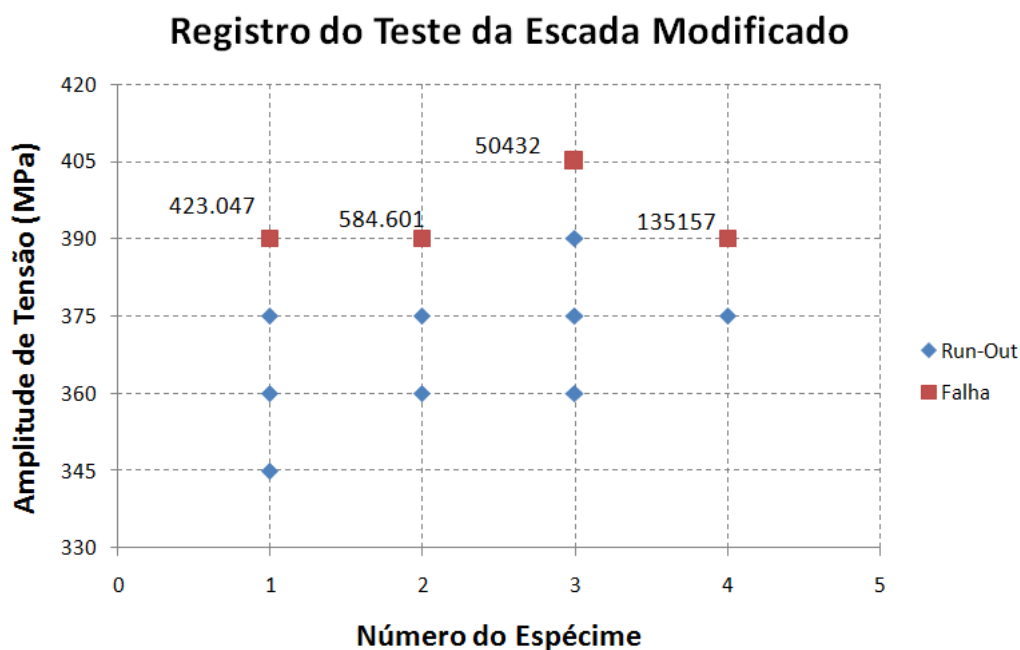


Figura 7.3 – Resultados do método da escada modificado para o caso uniaxial.

Analisando os dados obtidos de acordo com o Método da Escada Modificado, temos que o evento menos frequente é de falha. O nível de tensão 0 é de 390 MPa e o incremento de 15MPa, como já foi dito anteriormente. Os valores dos parâmetros F, A e B se encontram na tabela abaixo.

Tabela 7.6 – Cálculo dos parâmetros F, A e B do método da escada.

Nível de Tensão (MPa)	Índice do Nível (i)	f_i	if_i	i^2f_i
390	0	3	0	0
405	1	1	1	1
X	Soma:	4	1	1
X	Parâmetro:	F	A	B

Utilizando a fórmula (5.5) para calcular a média, temos:

$$\mu_S = S_0 + d \left(\frac{A}{F} - \frac{1}{2} \right) \rightarrow \mu_S = 390 + 15 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{2} \right)$$

$$\mu_S = 386,25 \text{ MPa} \quad (7.5)$$

Utilizando a fórmula (5.7) para calcular o desvio padrão, temos:

$$\frac{BF - A^2}{A^2} = 0,1875 \rightarrow \sigma_S = 1,53d = 1,53 \times 15$$

$$\sigma_S = 22,95 \text{ MPa} \quad (7.6)$$

Considerando dois casos para o valor de K, um com os valores de 90% para confiabilidade e de confiança, e outro com 95% de confiabilidade e 90% de confiança, temos os valores para K de 2,219 e 2,755, respectivamente, segundo a tabela (5.1), o que nos dá o seguinte resultado para o limite de fadiga uniaxial:

$$S_{e,R,C} = \mu_S - K\sigma_S \rightarrow S_{e,90,90} = 386,25 - 2,219 \times 22,95$$

$$S_{e,95,90} = 386,25 - 2,755 \times 22,95$$

$$S_{e,90,90} = 335,3 \text{ MPa} \quad e \quad S_{e,95,90} = 323,02 \text{ MPa} \quad (7.7)$$

7.5. RESULTADOS DO MÉTODO DA ESCADA MODIFICADO PARA O CASO TORCIONAL

Com base no limite de fadiga estimado pela curva τ -N, um incremento de 12,5MPa foi escolhido para o método da escada. Já a tensão inicial escolhida para o primeiro ensaio foi de 237,5MPa. Os ensaios torcionais ainda estão sendo feitos e infelizmente não foram finalizados a tempo para o projeto, porém serão continuados em projetos futuros. Deste modo, a tabela abaixo não apresenta dados suficientes para concluir a análise torcional, mas está aqui como modo de registro.

Tabela 7.7 – Resultados do método da escada modificado para ensaios torcionais.

Identificação do CP	Carga (Nm)	Tensão (MPa)	Frequência (Hz)	Pressão da Garra (MPa)	Resultado do Ensaio
12	46,4	237,5	12	35	Run-Out

7.6. RESULTADOS DO PARÂMETRO $\sqrt{\text{área}}$ PARA ENSAIOS UNIAXIAIS

Para realizar o procedimento proposto por Murakami, foi utilizada uma área de inspeção $S_0 = 0,36 \text{ m}^2$ e duas amostras de um corpo de prova já falhado foram embutidas e preparadas conforme o método proposto.

Sabendo que o plano de tensões principais é um plano paralelo a área com seção de 10 mm de diâmetro do corpo de prova, então a área S será:

$$S = \pi 5^2$$
$$S = 78,5 \text{ mm}^2 \quad (7.8)$$

Deste modo, utilizando a fórmula (3.10) para calcular o período de retorno, temos:

$$T = \frac{S}{S_0} = \frac{78,5}{0,36}$$
$$T = 218,16 \quad (7.9)$$

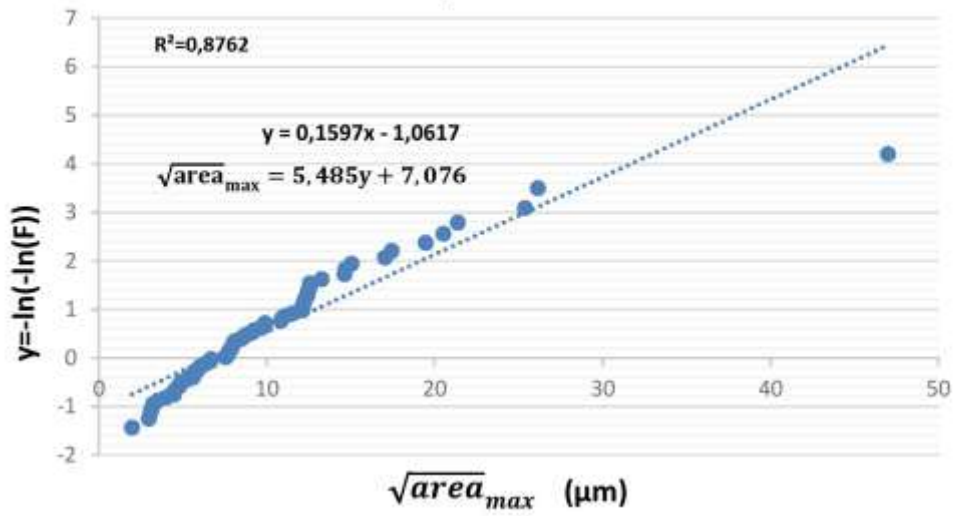
Os dados das raízes quadrada das áreas das inclusões, bem como os outros parâmetros necessários, se encontram na tabela a seguir.

Tabela 7.8 – Áreas de inclusão medidas para o caso uniaxial.

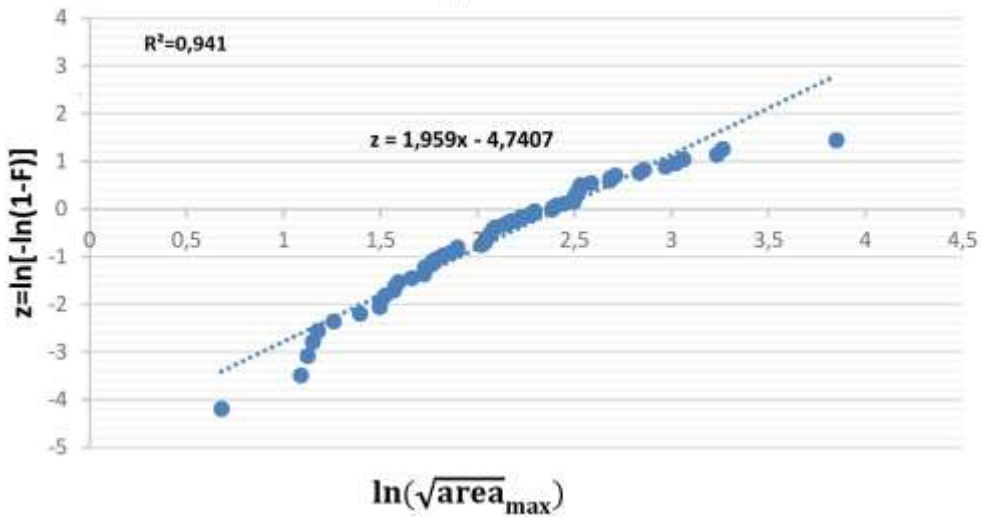
Seção de Inspeção: Transversal Área de Inspeção: $S_0 = 0,36 \text{ mm}^2$ Número de Inspeções: $n = 66$ Rank: $F_j = j/(n + 1)$			Gumbel: $y_j = -\ln[-\ln(F_j)]$ Weibull: $z_j = \ln[-\ln(1 - F_j)]$ Fréchet: $w_j = -\ln[-\ln(F_j)]$			
Medição (j)	F_j	$\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$ (µm)	$\ln(\sqrt{\text{area}}_{\text{max}})$	y_j	z_j	w_j
1	0,015	1,973	0,679	-1,436	-4,197	-1,436
2	0,030	2,972	1,089	-1,256	-3,496	-1,256
3	0,045	3,079	1,124	-1,133	-3,083	-1,133
4	0,060	3,159	1,150	-1,036	-2,788	-1,036
5	0,075	3,243	1,176	-0,954	-2,557	-0,954
6	0,090	3,517	1,257	-0,881	-2,366	-0,881
7	0,104	4,032	1,394	-0,815	-2,204	-0,815
8	0,119	4,461	1,495	-0,754	-2,062	-0,754
9	0,134	4,475	1,498	-0,697	-1,936	-0,697
10	0,149	4,577	1,521	-0,643	-1,822	-0,643
11	0,164	4,800	1,569	-0,592	-1,718	-0,592
12	0,179	4,839	1,577	-0,542	-1,623	-0,542
13	0,194	4,919	1,593	-0,495	-1,534	-0,495
14	0,209	5,261	1,660	-0,448	-1,451	-0,448
15	0,224	5,601	1,723	-0,403	-1,373	-0,403
16	0,239	5,637	1,729	-0,359	-1,299	-0,359
17	0,254	5,637	1,729	-0,316	-1,229	-0,316
18	0,269	5,842	1,765	-0,273	-1,162	-0,273
19	0,284	5,876	1,771	-0,231	-1,098	-0,231
20	0,299	6,036	1,798	-0,190	-1,037	-0,190
21	0,313	6,200	1,825	-0,149	-0,978	-0,149
22	0,328	6,446	1,863	-0,108	-0,921	-0,108
23	0,343	6,648	1,894	-0,067	-0,866	-0,067
24	0,358	6,658	1,896	-0,026	-0,813	-0,026
25	0,373	7,542	2,021	0,014	-0,761	0,014
26	0,388	7,671	2,037	0,055	-0,711	0,055
27	0,403	7,703	2,042	0,096	-0,662	0,096
28	0,418	7,759	2,049	0,136	-0,614	0,136
29	0,433	7,876	2,064	0,177	-0,567	0,177
30	0,448	7,903	2,067	0,219	-0,521	0,219
31	0,463	7,972	2,076	0,260	-0,476	0,260
32	0,478	8,017	2,082	0,303	-0,432	0,303
33	0,493	8,095	2,091	0,345	-0,388	0,345
34	0,507	8,467	2,136	0,388	-0,345	0,388
35	0,522	8,634	2,156	0,432	-0,303	0,432
36	0,537	8,791	2,174	0,476	-0,260	0,476
37	0,552	9,141	2,213	0,521	-0,219	0,521
38	0,567	9,239	2,223	0,567	-0,177	0,567
39	0,582	9,643	2,266	0,614	-0,136	0,614
40	0,597	9,903	2,293	0,662	-0,096	0,662
41	0,612	9,903	2,293	0,711	-0,055	0,711
42	0,627	10,846	2,384	0,761	-0,014	0,761
43	0,642	10,921	2,391	0,813	0,026	0,813
44	0,657	11,109	2,408	0,866	0,067	0,866
45	0,672	11,566	2,448	0,921	0,108	0,921
46	0,687	12,122	2,495	0,978	0,149	0,978
47	0,701	12,161	2,498	1,037	0,190	1,037
48	0,716	12,161	2,498	1,098	0,231	1,098
49	0,731	12,226	2,504	1,162	0,273	1,162
50	0,746	12,306	2,510	1,229	0,316	1,229
51	0,761	12,431	2,520	1,299	0,359	1,299
52	0,776	12,462	2,523	1,373	0,403	1,373
53	0,791	12,558	2,530	1,451	0,448	1,451
54	0,806	12,574	2,532	1,534	0,495	1,534
55	0,821	13,257	2,585	1,623	0,542	1,623
56	0,836	14,622	2,683	1,718	0,592	1,718
57	0,851	14,676	2,686	1,822	0,643	1,822
58	0,866	15,045	2,711	1,936	0,697	1,936
59	0,881	17,027	2,835	2,062	0,754	2,062
60	0,896	17,432	2,858	2,204	0,815	2,204
61	0,910	19,467	2,969	2,366	0,881	2,366
62	0,925	20,517	3,021	2,557	0,954	2,557
63	0,940	21,388	3,063	2,788	1,036	2,788
64	0,955	25,373	3,234	3,083	1,133	3,083
65	0,970	26,142	3,264	3,496	1,256	3,496
66	0,985	46,995	3,850	4,197	1,436	4,197

Com os dados coletados na tabela (7.8), é possível traçar os gráficos de cada uma das distribuições.

Distribuição de Gumbel



Distribuição de Weibull



Distribuição de Fréchet

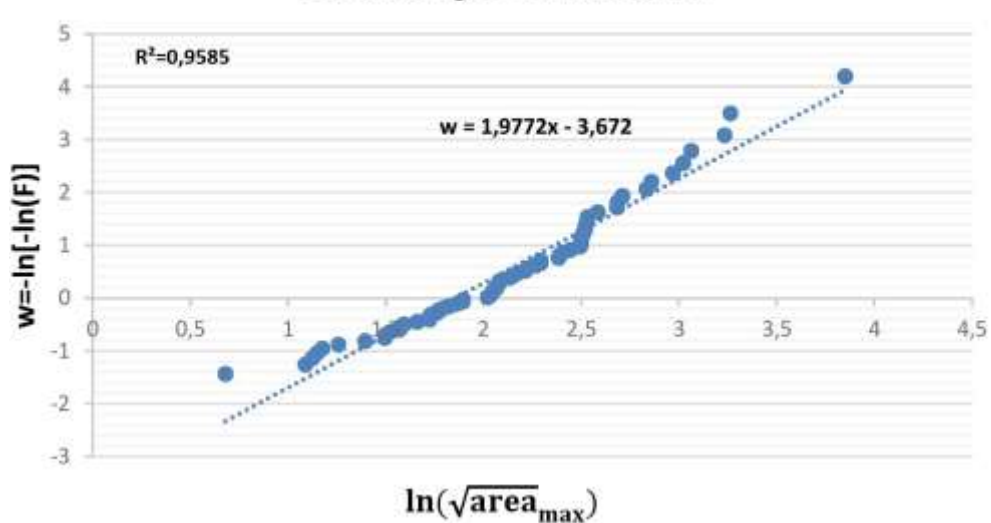


Figura 7.4 – Gráfico das distribuições de Gumbel, Weibull e Fréchet para o caso uniaxial.

A partir dos parâmetros encontrados nas regressões lineares da figura 7.4, temos as seguintes fórmulas para a raiz de área máxima:

$$\text{Gumbel: } \sqrt{\text{área}}_{max} = 5,485 \left\{ -\ln \left[-\ln \left(\frac{T-1}{T} \right) \right] \right\} + 7,076 \quad (7.10)$$

$$\text{Weibull: } \sqrt{\text{área}}_{max} = 11,24 \left[-\ln \left(\frac{1}{T} \right) \right]^{1,959} \quad (7.11)$$

$$\text{Fréchet: } \sqrt{\text{área}}_{max} = 6,4 \left[-\ln \left(\frac{T-1}{T} \right) \right]^{-\frac{1}{1,977}} \quad (7.12)$$

Substituindo o valor do período de retorno encontrado em (7.9), temos:

$$\text{Gumbel: } \sqrt{\text{área}}_{max} = 36,6 \mu\text{m} \quad (7.13)$$

$$\text{Weibull: } \sqrt{\text{área}}_{max} = 26,55 \mu\text{m} \quad (7.14)$$

$$\text{Fréchet: } \sqrt{\text{área}}_{max} = 97,5 \mu\text{m} \quad (7.15)$$

Substituindo os valores encontrados acima na fórmula (3.3), temos os seguintes limites de fadiga:

$$\text{Gumbel: } \sigma_w = 340,5 \text{ MPa} \quad (7.16)$$

$$\text{Weibull: } \sigma_w = 359,2 \text{ MPa} \quad (7.17)$$

$$\text{Fréchet: } \sigma_w = 289,2 \text{ MPa} \quad (7.18)$$

Algumas fotos das inclusões encontradas podem ser vistas nas imagens a seguir.

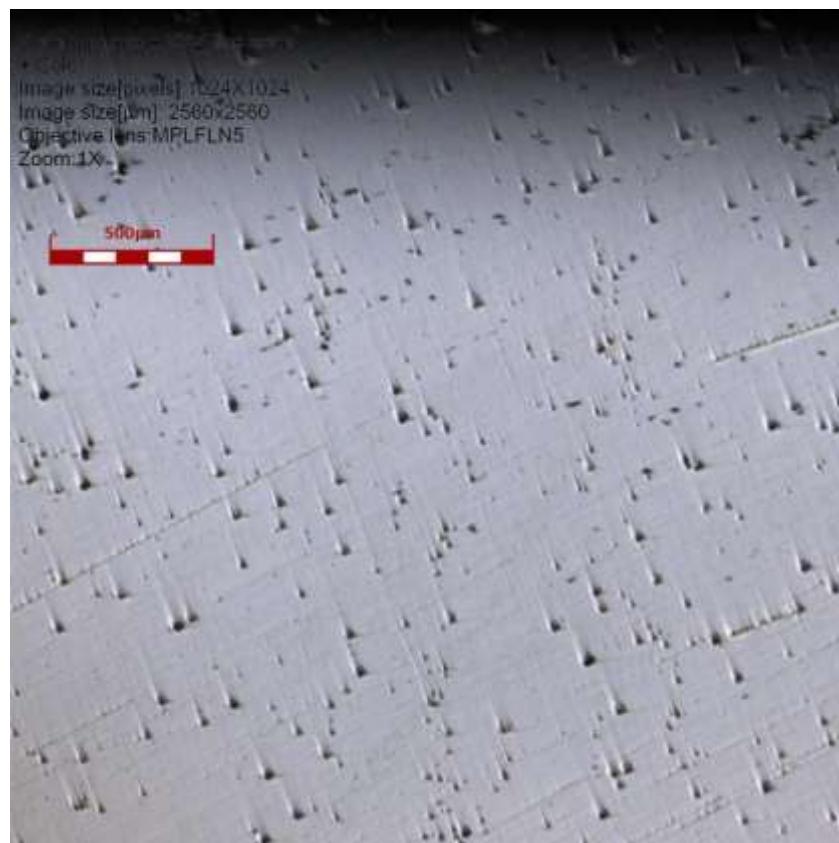
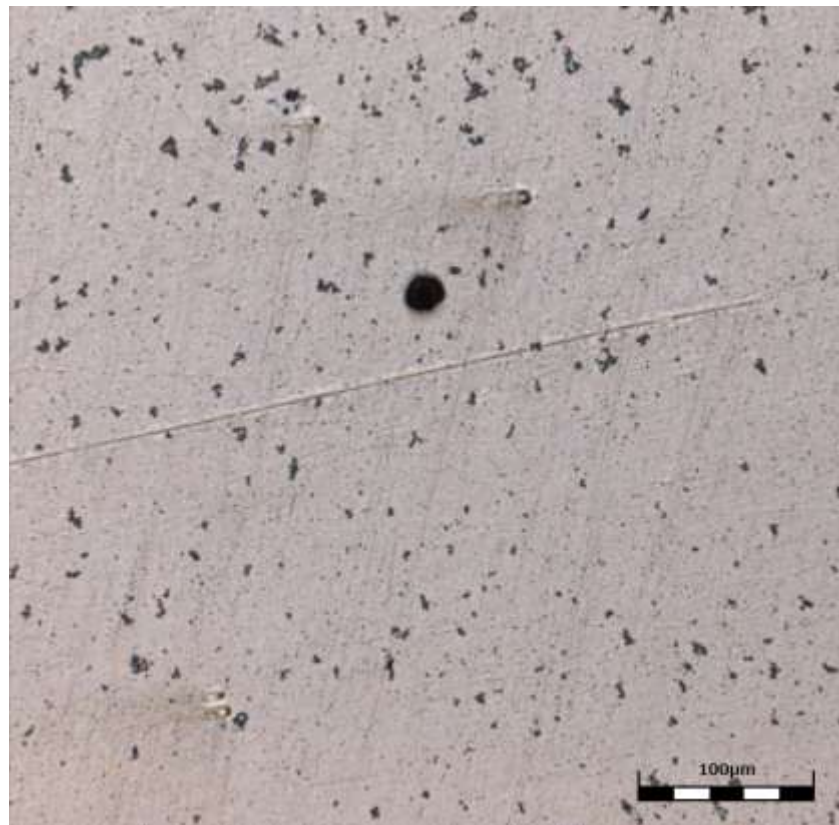


Figura 7.5 – Inclusões no plano de tensão principal uniaxial.

7.7. RESULTADOS DO PARÂMETRO $\sqrt{\text{área}}$ PARA ENSAIOS TORCIONAIS

Para realizar o procedimento para os casos torcionais também foi utilizado uma área de inspeção de $S_0 = 0,36 \text{ m}^2$ e duas amostras. Porém dessa vez as amostras foram retiradas uma de um corpo de prova já falhado por um ensaio uniaxial e outra retirada de um corpo de prova ainda não utilizado, apenas para verificar se existe alguma diferença nos resultados encontrados e averiguar se o procedimento do parâmetro $\sqrt{\text{área}}$ pode ser feito tanto com amostras falhadas quanto com amostras não utilizadas. Espera-se que o resultado seja indiferente haja visto o fato dos ensaios serem realizados em regime elástico.

Sabendo que o plano de tensões principais é um plano inclinado 45° em relação a área com seção de 10 mm de diâmetro do corpo de prova, então a área S será a área de uma elipse com eixo maior de $5\sqrt{2}$ mm e eixo menor 5 mm, logo:

$$S = \pi ab = \pi \times 5 \times 5\sqrt{2}$$

$$S = 111,07 \text{ mm}^2 \quad (7.19)$$

Deste modo, utilizando a fórmula (3.10) para calcular o período de retorno, temos:

$$T = \frac{S}{S_0} = \frac{111,07}{0,36}$$

$$T = 308,5 \quad (7.20)$$

Os dados das raízes quadrada das áreas das inclusões, bem como os outros parâmetros necessários, se encontram na tabela a seguir.

Tabela 7.9 – Áreas de inclusão para o caso torcional a partir de uma amostra falhada.

Seção de Inspeção: 45° Área de Inspeção: $S_0 = 0,36 \text{ mm}^2$ Número de Inspeções: $n = 45$ Rank: $F_j = j/(n + 1)$			Gumbel: $y_j = -\ln[-\ln(F_j)]$ Weibull: $z_j = \ln[-\ln(1 - F_j)]$ Fréchet: $w_j = -\ln[-\ln(F_j)]$			
Medição (j)	F_j	$\sqrt{\text{área}}_{\text{max}}$ (μm)	$\ln(\sqrt{\text{área}}_{\text{max}})$	y_j	z_j	w_j
1	0,022	4,404	1,483	-1,343	-3,818	-1,343
2	0,043	4,423	1,487	-1,143	-3,113	-1,143
3	0,065	4,423	1,487	-1,004	-2,696	-1,004
4	0,087	4,454	1,494	-0,893	-2,397	-0,893
5	0,109	4,578	1,521	-0,797	-2,162	-0,797
6	0,130	4,633	1,533	-0,711	-1,968	-0,711
7	0,152	4,860	1,581	-0,633	-1,801	-0,633
8	0,174	5,237	1,656	-0,559	-1,655	-0,559
9	0,196	5,308	1,669	-0,489	-1,525	-0,489
10	0,217	5,553	1,714	-0,423	-1,406	-0,423
11	0,239	5,992	1,790	-0,358	-1,297	-0,358
12	0,261	6,050	1,800	-0,295	-1,196	-0,295
13	0,283	6,230	1,829	-0,234	-1,102	-0,234
14	0,304	6,450	1,864	-0,174	-1,014	-0,174
15	0,326	6,484	1,869	-0,114	-0,930	-0,114
16	0,348	7,046	1,952	-0,055	-0,850	-0,055
17	0,370	7,148	1,967	0,005	-0,774	0,005
18	0,391	7,409	2,003	0,064	-0,700	0,064
19	0,413	7,949	2,073	0,123	-0,630	0,123
20	0,435	8,192	2,103	0,183	-0,561	0,183
21	0,457	8,562	2,147	0,243	-0,495	0,243
22	0,478	8,596	2,151	0,304	-0,430	0,304
23	0,500	9,273	2,227	0,367	-0,367	0,367
24	0,522	9,449	2,246	0,430	-0,304	0,430
25	0,543	9,532	2,255	0,495	-0,243	0,495
26	0,565	9,634	2,265	0,561	-0,183	0,561
27	0,587	10,018	2,304	0,630	-0,123	0,630
28	0,609	10,332	2,335	0,700	-0,064	0,700
29	0,630	10,583	2,359	0,774	-0,005	0,774
30	0,652	10,991	2,397	0,850	0,055	0,850
31	0,674	11,827	2,470	0,930	0,114	0,930
32	0,696	12,696	2,541	1,014	0,174	1,014
33	0,717	13,791	2,624	1,102	0,234	1,102
34	0,739	13,835	2,627	1,196	0,295	1,196
35	0,761	14,170	2,651	1,297	0,358	1,297
36	0,783	16,250	2,788	1,406	0,423	1,406
37	0,804	18,307	2,907	1,525	0,489	1,525
38	0,826	19,405	2,966	1,655	0,559	1,655
39	0,848	20,693	3,030	1,801	0,633	1,801
40	0,870	23,216	3,145	1,968	0,711	1,968
41	0,891	24,902	3,215	2,162	0,797	2,162
42	0,913	27,447	3,312	2,397	0,893	2,397
43	0,935	27,743	3,323	2,696	1,004	2,696
44	0,957	29,264	3,376	3,113	1,143	3,113
45	0,978	40,298	3,696	3,818	1,343	3,818

Com os dados coletados na tabela (7.9), é possível traçar os gráficos de cada uma das distribuições.

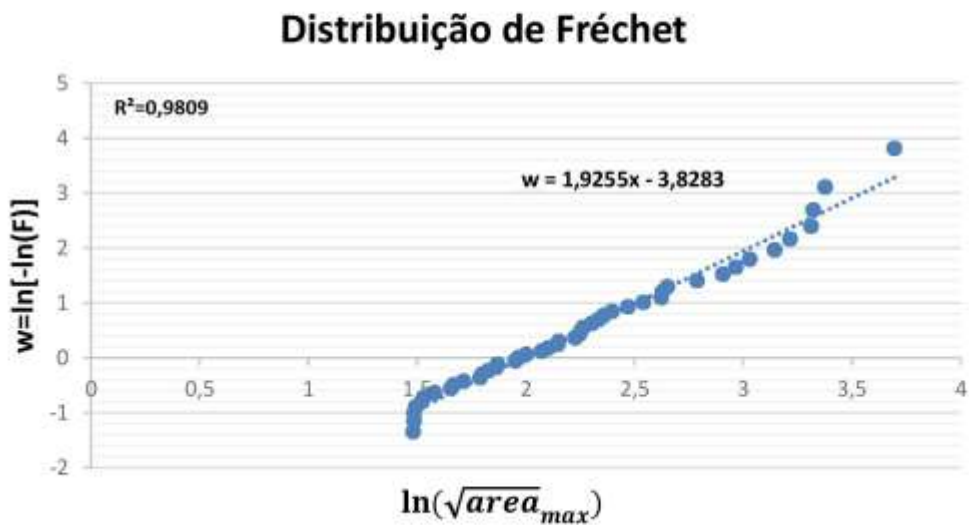
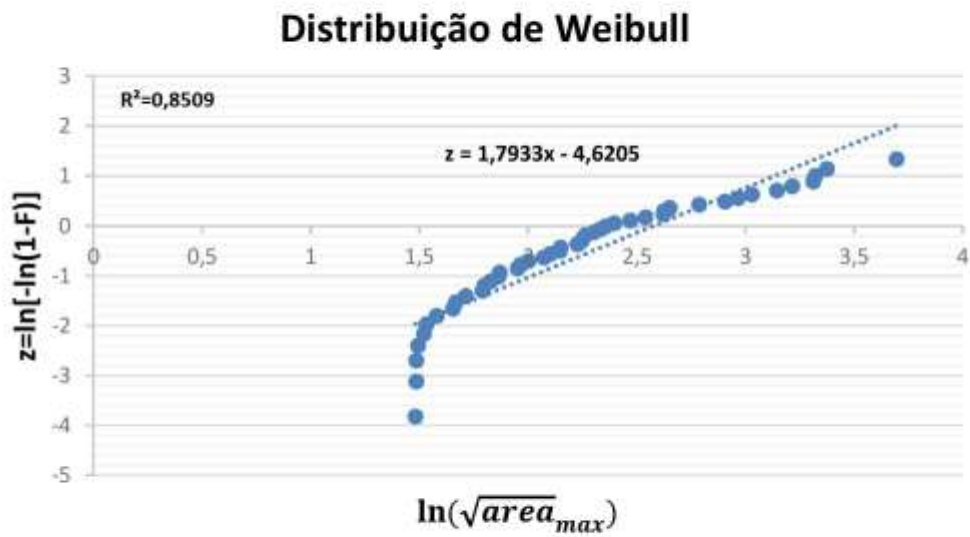
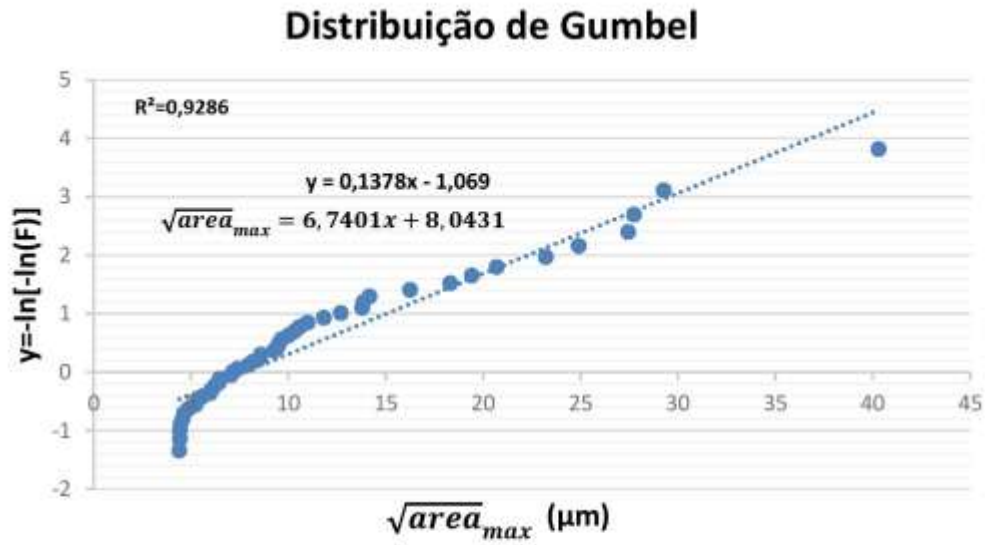


Figura 7.6 – Gráfico das distribuições de Gumbel, Weibull e Fréchet para o caso torcional a partir de uma amostra com falha.

A partir dos parâmetros encontrados nas regressões lineares da figura 7.6, temos as seguintes fórmulas para a raiz de área máxima:

$$\text{Gumbel: } \sqrt{\text{area}}_{max} = 6,740 \left\{ -\ln \left[-\ln \left(\frac{T-1}{T} \right) \right] \right\} + 8,043 \quad (7.21)$$

$$\text{Weibull: } \sqrt{\text{area}}_{max} = 13,2 \left[-\ln \left(\frac{1}{T} \right) \right]^{\frac{1}{1,793}} \quad (7.22)$$

$$\text{Fréchet: } \sqrt{\text{area}}_{max} = 7,3 \left[-\ln \left(\frac{T-1}{T} \right) \right]^{-\frac{1}{1,925}} \quad (7.23)$$

Substituindo o valor do período de retorno encontrado em (7.9), temos:

$$\text{Gumbel: } \sqrt{\text{area}}_{max} = 46,7 \mu\text{m} \quad (7.24)$$

$$\text{Weibull: } \sqrt{\text{area}}_{max} = 34,83 \mu\text{m} \quad (7.25)$$

$$\text{Fréchet: } \sqrt{\text{area}}_{max} = 143,35 \mu\text{m} \quad (7.26)$$

Substituindo os valores encontrados acima na fórmula (4.6), temos os seguintes limites de fadiga:

$$\text{Gumbel: } \tau_w = 275,95 \text{ MPa} \quad (7.27)$$

$$\text{Weibull: } \tau_w = 280,74 \text{ MPa} \quad (7.28)$$

$$\text{Fréchet: } \tau_w = 228,88 \text{ MPa} \quad (7.29)$$

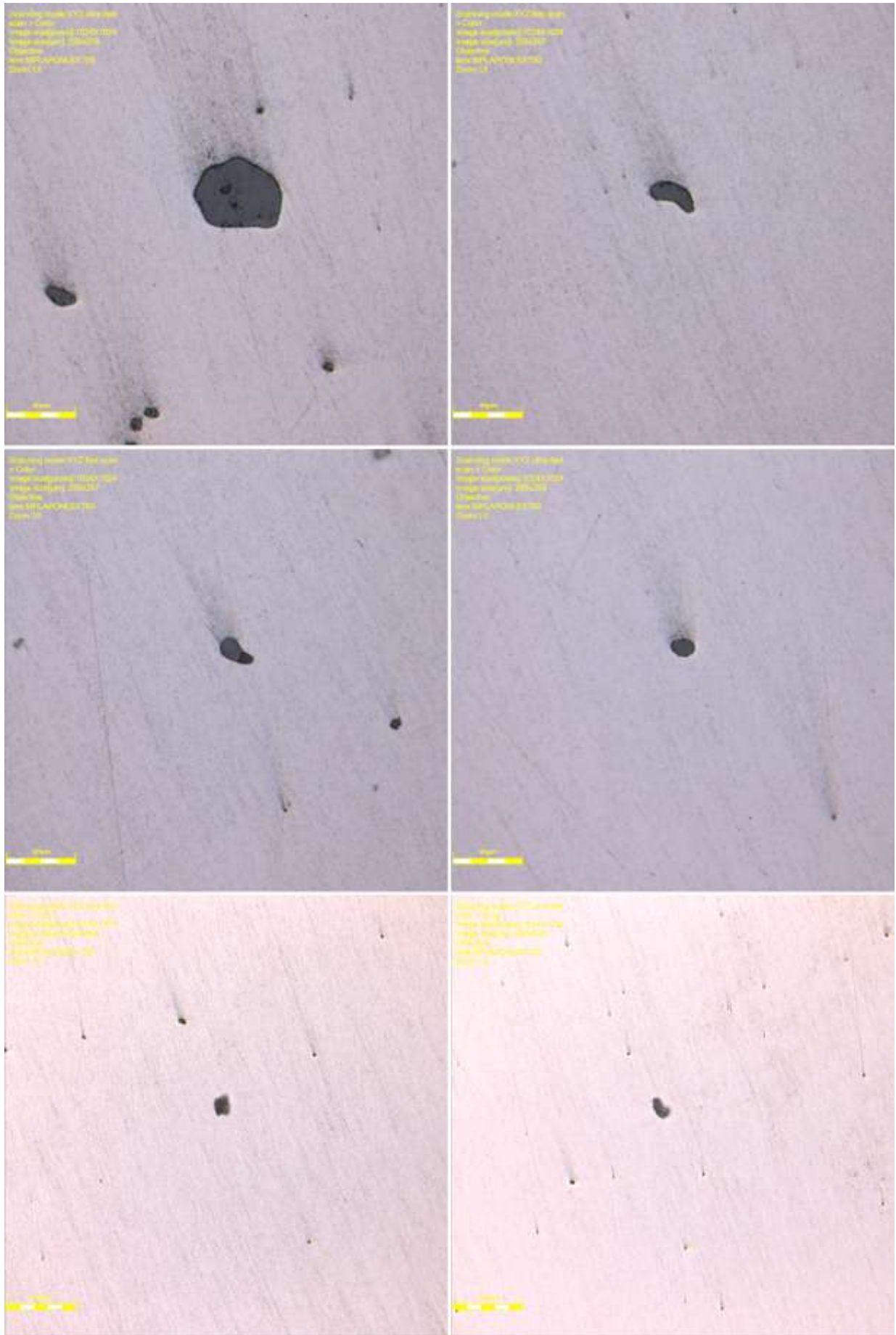


Figura 7.7 – Inclusões no plano de tensão principal torcional, para uma amostra já falhada.

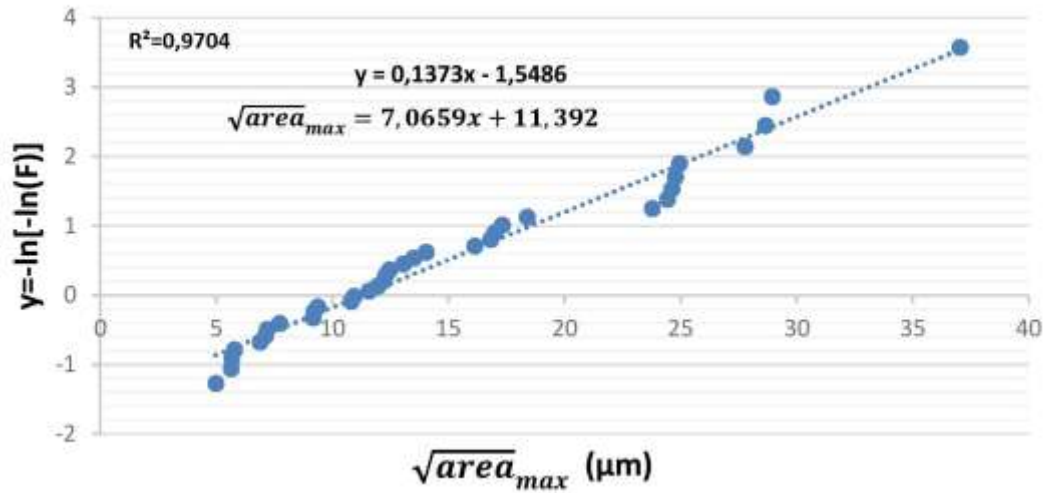
Agora vamos analisar o caso da amostra não falhada. Os dados das raízes quadrada das áreas das inclusões, bem como os outros parâmetros necessários, se encontram na tabela a seguir.

Tabela 7.10 – Áreas de inclusão para o caso torcional a partir de uma amostra não falhada.

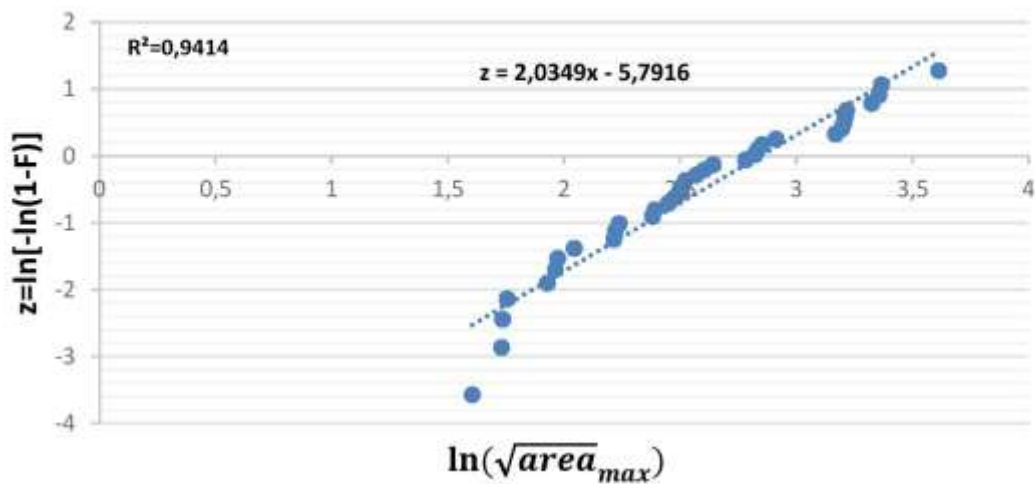
Seção de Inspeção: 45° Área de Inspeção: $S_0 = 0,36 \text{ mm}^2$ Número de Inspeções: $n = 45$ Rank: $F_j = j/(n + 1)$			Gumbel: $y_j = -\ln[-\ln(F_j)]$ Weibull: $z_j = \ln[-\ln(1 - F_j)]$ Fréchet: $w_j = -\ln[-\ln(F_j)]$			
Medição (j)	F_j	$\sqrt{\text{area}_{\max}}$ (μm)	$\ln(\sqrt{\text{area}_{\max}})$	y_j	z_j	w_j
1	0,028	4,976	1,605	-1,276	-3,569	-1,276
2	0,056	5,643	1,730	-1,061	-2,862	-1,061
3	0,083	5,671	1,735	-0,910	-2,442	-0,910
4	0,111	5,786	1,756	-0,787	-2,139	-0,787
5	0,139	6,877	1,928	-0,680	-1,900	-0,680
6	0,167	7,122	1,963	-0,583	-1,702	-0,583
7	0,194	7,197	1,974	-0,493	-1,531	-0,493
8	0,222	7,723	2,044	-0,408	-1,381	-0,408
9	0,250	9,166	2,216	-0,327	-1,246	-0,327
10	0,278	9,208	2,220	-0,248	-1,123	-0,248
11	0,306	9,361	2,237	-0,170	-1,009	-0,170
12	0,333	10,808	2,380	-0,094	-0,903	-0,094
13	0,361	10,934	2,392	-0,018	-0,803	-0,018
14	0,389	11,575	2,449	0,057	-0,708	0,057
15	0,417	11,962	2,482	0,133	-0,618	0,133
16	0,444	12,232	2,504	0,210	-0,531	0,210
17	0,472	12,312	2,511	0,287	-0,448	0,287
18	0,500	12,463	2,523	0,367	-0,367	0,367
19	0,528	13,065	2,570	0,448	-0,287	0,448
20	0,556	13,513	2,604	0,531	-0,210	0,531
21	0,583	14,048	2,643	0,618	-0,133	0,618
22	0,611	16,140	2,781	0,708	-0,057	0,708
23	0,639	16,812	2,822	0,803	0,018	0,803
24	0,667	16,999	2,833	0,903	0,094	0,903
25	0,694	17,326	2,852	1,009	0,170	1,009
26	0,722	18,393	2,912	1,123	0,248	1,123
27	0,750	23,789	3,169	1,246	0,327	1,246
28	0,778	24,439	3,196	1,381	0,408	1,381
29	0,806	24,636	3,204	1,531	0,493	1,531
30	0,833	24,785	3,210	1,702	0,583	1,702
31	0,861	24,953	3,217	1,900	0,680	1,900
32	0,889	27,776	3,324	2,139	0,787	2,139
33	0,917	28,653	3,355	2,442	0,910	2,442
34	0,944	28,958	3,366	2,862	1,061	2,862
35	0,972	37,051	3,612	3,569	1,276	3,569

Com os dados coletados na tabela (7.10), é possível traçar os gráficos de cada uma das distribuições.

Distribuição de Gumbel



Distribuição de Weibull



Distribuição de Fréchet

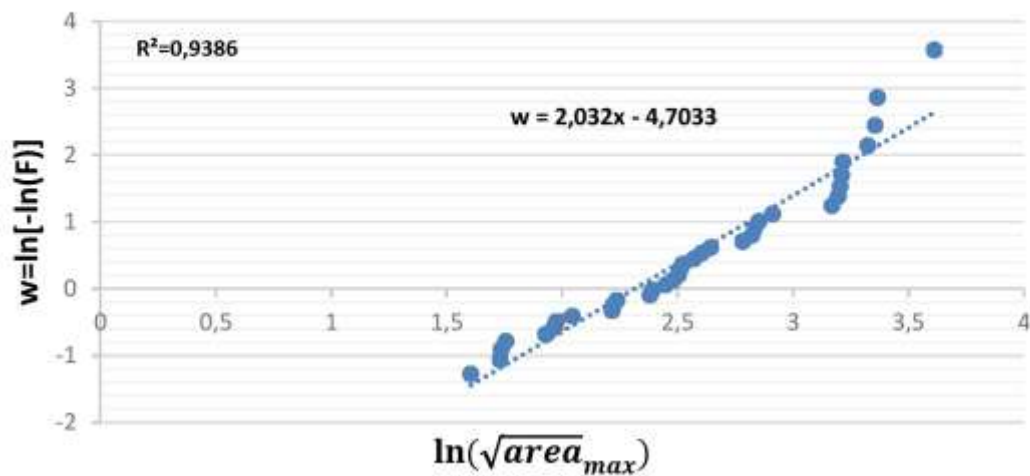


Figura 7.8 – Gráfico das distribuições de Gumbel, Weibull e Fréchet para o caso torcional a partir de uma amostra sem falha.

A partir dos parâmetros encontrados nas regressões lineares da figura 7.8, temos as seguintes fórmulas para a raiz de área máxima:

$$\text{Gumbel: } \sqrt{\text{area}}_{max} = 7,065 \left\{ -\ln \left[-\ln \left(\frac{T-1}{T} \right) \right] \right\} + 11,39 \quad (7.30)$$

$$\text{Weibull: } \sqrt{\text{area}}_{max} = 17,24 \left[-\ln \left(\frac{1}{T} \right) \right]^{\frac{1}{2,034}} \quad (7.31)$$

$$\text{Fréchet: } \sqrt{\text{area}}_{max} = 10,12 \left[-\ln \left(\frac{T-1}{T} \right) \right]^{\frac{1}{2,032}} \quad (7.32)$$

Substituindo o valor do período de retorno encontrado em (7.9), temos:

$$\text{Gumbel: } \sqrt{\text{area}}_{max} = 51,9 \mu\text{m} \quad (7.33)$$

$$\text{Weibull: } \sqrt{\text{area}}_{max} = 40,67 \mu\text{m} \quad (7.34)$$

$$\text{Fréchet: } \sqrt{\text{area}}_{max} = 169,78 \mu\text{m} \quad (7.35)$$

Substituindo os valores encontrados acima na fórmula (3.3), temos os seguintes limites de fadiga:

$$\text{Gumbel: } \tau_w = 271,1 \text{ MPa} \quad (7.36)$$

$$\text{Weibull: } \tau_w = 282,35 \text{ MPa} \quad (7.37)$$

$$\text{Fréchet: } \tau_w = 222,51 \text{ MPa} \quad (7.38)$$



Figura 7.9 – Inclusões no plano de tensão principal torcional, para uma amostra não falhada.

Observando os resultados encontrados para os limites de fadiga entre a amostra já falhada e a não falhada, percebe-se que a diferença entre os dois é muito pouco, portanto o fato de utilizar uma amostra de CP já falhado ou não, não faz diferença. Calculando então a média entre os dois resultados, temos:

$$\text{Gumbel: } \tau_w = 273,5 \text{ MPa} \quad (7.39)$$

$$\text{Weibull: } \tau_w = 281,5 \text{ MPa} \quad (7.40)$$

$$\text{Fréchet: } \tau_w = 225,7 \text{ MPa} \quad (7.41)$$

7.8. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Calculando o erro relativo em relação ao resultado obtido pelo Método da Escada Modificado e pelo Método do Parâmetro \sqrt{area} para o caso de fadiga uniaxial, temos:

Tabela 7.11 – Erro relativo das distribuições de Gumbel, Weibull e Fréchet para o caso uniaxial.

Limite de Fadiga Experimental para o caso R90C90: 335,3 MPa			
Limite de Fadiga Experimental para o caso R95C90: 323,02 MPa			
R- Confiabilidade; C-Confiança			
Tipo de Distribuição	Limite de Fadiga Obtido	Erro Relativo Caso R90C90	Erro Relativo Caso R95C90
Distribuição de Gumbel	340,5 MPa	1,52%	5,41%
Distribuição de Weibull	359,2 MPa	7,13%	11,20%
Distribuição de Fréchet	289,2 MPa	13,75%	10,47%

Já calculando o erro relativo em relação ao limite fadiga estimado e o obtido pelo Método do Parâmetro \sqrt{area} para o caso torcional, temos:

Tabela 7.12 – Erro relativo das distribuições de Gumbel, Weibull e Fréchet para o caso torcional.

Limite de Fadiga Experimental: 278,4 MPa		
Tipo de Distribuição	Limite de Fadiga Obtido	Erro Relativo
Distribuição de Gumbel	273,5 MPa	1,76%
Distribuição de Weibull	281,5 MPa	1,11%
Distribuição de Fréchet	225,7 MPa	18,9%

8. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado uma contextualização e definição de conceitos preliminares relacionados a fadiga, bem como uma descrição do Método da Escada Convencional e Método da Escada Modificado, que são procedimentos para se obter o limite de fadiga através de ensaios em fadiga de corpos de prova. Também foi apresentada uma descrição do Método do Parâmetro \sqrt{area} , proposto por Murakami, utilizado para determinar o limite de fadiga uniaxial de um aço sem ter que fazer nenhum ensaio de fadiga, caso o material apresente inclusões não metálicas, um método que depende apenas da dureza do aço e da sua maior raiz de área de inclusão. Um método de extensão desse parâmetro para fadiga biaxial, descrito por Endo e Ishimoto, foi apresentado com o intuito de utilizá-lo para determinar o limite de fadiga em torção pura.

O objetivo do projeto era determinar os limites de fadiga tanto uniaxial quanto torcional do aço 4140 por meio do Método da Escada Modificado e comparar com os limites de fadiga obtidos pelo Método do Parâmetro \sqrt{area} , pois esperava-se que o material fosse defeituoso e apresentasse inclusões não-metálicas, verificando assim a veracidade do método proposto por Murakami.

Foram feitos ensaios seguindo o Método da Escada Modificado apenas para o caso uniaxial e para este, foi determinado o limite de fadiga uniaxial com confiabilidade de 95% e confiança 90% e para confiabilidade de 90% e confiança 90%. Para o caso torcional, não foi possível terminar os ensaios há tempo, porém um limite de fadiga torcional foi estimado a partir de ensaios feitos para estimar a curva $\tau - N$ do material.

A respeito das inclusões do material, após análise em microscópio foi verificado que o mesmo realmente é defeituoso, apresentando diversas inclusões não-metálicas. Portanto, foi possível utilizar a Teoria dos Valores Extremos para prever um limite de fadiga. Murakami propôs a utilização da distribuição de probabilidade de Gumbel para o cálculo da maior raiz de área da inclusão, neste projeto foi utilizado não apenas ela como também as distribuições de Weibull e Fréchet, com o intuito de comparar qual dos três apresentava um melhor resultado.

O método de Murakami se demonstrou eficaz, apresentando um bom resultado quando comparado ao método experimental, sendo que a distribuição proposta por Murakami, de Gumbel, também apresentou o menor erro relativo para o caso uniaxial, de apenas 1,52% para 90% de confiabilidade e 90% de confiança, e 5,41% de erro para 95% de confiabilidade e 90% de confiança. Para o caso torcional, a distribuição de Gumbel foi a segunda melhor, com erro relativo de 1,76%, porém ela e a Weibull foram muito próximas, sendo essa de 1,11%. Tanto para o caso uniaxial quanto para o torcional, a distribuição com pior erro relativo foi a de Fréchet. Porém, ao se analisar o parâmetro R^2 para todas as regressões lineares feitas, para o

caso uniaxial e para o caso torcional com falha a distribuição de Fréchet foi a que mais se aproximou de uma reta, já para o caso torcional sem falha, a distribuição de Gumbel foi a que mais se aproximou. Logo, temos aqui uma pequena incoerência nos resultados, visto que Fréchet apresentou o resultado que mais divergiu de todos, porém apresentou a melhor regressão em alguns momentos. Entretanto, todos os gráficos feitos apresentaram bons resultados para regressões lineares, todos com parâmetro R^2 maiores que 80%, portanto não desqualifica o fato da distribuição de Gumbel ser a melhor, visto que apresentou menor erro relativo e todos os gráficos se aproximaram bastante de retas, sendo que o de Gumbel foi o que mais se aproximou de uma reta para o caso torcional, podendo assim concluir que Murakami estava certo em optar por Gumbel.

Outra verificação feita, que não era um objetivo do projeto mas vale a pena ressaltar, é que o Método do Parâmetro \sqrt{area} pode ser feito medindo as raízes de áreas das inclusões do aço tanto quando ele não foi sujeito a nenhum esforço quanto depois de sujeito de esforços em fadiga em regime elástico. Já era esperado que os formatos das inclusões não se alterassem, pois os ensaios foram feitos em regime elástico, e após aplicar o Método do Parâmetro \sqrt{area} para uma amostra de material não utilizada e de outra já falhada foi possível verificar que realmente não influencia, já que os resultados obtidos foram muito semelhantes.

8.1. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como continuação do projeto o que espera ser feito primeiramente é a finalização do Método da Escada Modificado para o caso torcional para verificar a validade do Método do Parâmetro \sqrt{area} para o caso torcional. Após estes testes, deve-se realizar ensaios multiaxiais para determinar o limite de fadiga do aço 4140 para o caso multiaxial e deve-se também propor um método de modificar os modelos do plano crítico utilizados nos casos de fadiga multiaxial para que eles passem a considerar materiais defeituosos, visto que estes não são válidos para o caso de materiais internamente defeituosos como ocorre com o aço 4140.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Carlos dos Santos Pires, José, “Análise Termodinâmica e Avaliação Experimental da Formação de Inclusões em Aços de Baixo Carbono ao Longo das Etapas de Elaboração e Solidificação no Lingotamento Contínuo,” Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2004.

Endo M., Ishimoto I. The fatigue strength of steels containing small holes under out-of-phase combined loading. *Int J Fatigue* 2006;28:592–7.

Endo M., Yanase K. Multiaxial high cycle fatigue threshold with small defects and cracks. *Elsevier Engineering Fracture Mechanics* 123 (2014) 182–196.

Ferreira A., Hann L. *Extreme Value Theory: An Introduction*, Springer 2006.

IACS UR M53, Appendix IV - Guidance for evaluation of Fatigue Tests. CONSEIL INTERNATIONAL DES MACHINES A COMBUSTION, 16.10.2009.

Lee, Y., *Fatigue Testing and Analysis (Theory and Practice)*, First. Oxford: Elseiver Science Ltda, 2005.

Lieberman, G. J. Tables for one-sided statistical tolerance limits. *Industrial Quality Control*. 14(10): 7-9: 1958.

Murakami, Y., *Metal Fatigue: Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions*, First. Oxford: Elseiver Science Ltda, 2002.

Robert L. Norton; *Projeto de Máquinas – Uma Abordagem Integrada*; Editora: bookman, 4^a Edição, 2013.

Susmel, L., *Multiaxial notch fatigue: From nominal to stress/strain quantities*, First published 2009, Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC.