

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA

Projeto e usinagem de um corpo de prova para ensaio de propagação de
trinca de fadiga

Rodrigo Tadashi Fujimoto

Orientado Prof. Claudio Geraldo Schon

São Paulo

2016

Departamento de Engenharia
Metalúrgica e de Materiais da
Escola Politécnica da USP

RODRIGO TADASHI FUJIMOTO

Projeto e usinagem de um corpo de prova para ensaio de propagação de
trinca de fadiga – São Paulo

v.1

Dissertação à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para
obtenção do título de bacharel em
engenharia metalúrgica

Área de Concentração: mecânica dos
materiais

Orientador: Prof. Claudio Geraldo
Schon

São Paulo

2016

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho aos meus pais,
a minha irmã Vanessa e meus
amigos por incondicional apoio
durante a execução desse trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Claudio Geraldo Schon pela orientação durante todo o trabalho.

Ao Felipe Carneiro, mestrando que me ajudou e orientou durante todas as etapas do projeto assim como sempre esteve disposto a esclarecer eventuais dúvidas.

A todos os técnicos dos laboratórios da mecânica e da metalúrgica que disponibilizaram de seus conhecimentos para executar cada experimento com perfeição.

Um especial agradecimento ao professor Marcílio Alves, professor da engenharia mecânica da Universidade de São Paulo, por disponibilizar a máquina na qual foram feitos os ensaios e por nos ajudar na condução do projeto com sua experiência e conhecimento.

RESUMO

Projeto e preparação do material de corpo de prova desde os tratamentos térmicos das barras de alumínio AA 2011 até o ensaio de propagação de trinca com os corpos de prova já usinados.

O objetivo principal desse projeto é de criar uma aula experimental para a disciplina de mecânica dos materiais, ministrada pelo professor Schon, e assim introduzir aos alunos da Universidade de São Paulo conceitos introdutórios da mecânica da fratura.

Todo esse processo pré-ensaio de tratamento térmico e usinagem foi feito num período de três meses devido ao envolvimento de um grande número pessoas no projeto e enorme quantidade de atividades a serem feitas para que o ensaio fosse feito de forma correta.

Depois do ensaio, que foram realizadas algumas vezes para que possamos estar familiarizados com as condições do corpo de prova e da máquina, tivemos que fazer o tratamento dos dados para que pudessemos discuti-lo e chegarmos as conclusões comparando os resultados com a literatura.

Palavras-chave: Projeto, objetivo, ensaio, trinca e usinagem

ABSTRACT

Design and preparation of the specimen material from the heat treatment of AA 2011 aluminum bars until the crack propagation test with specimens already machined.

The main objective of this project is to create an experimental class for the discipline of mechanics of materials, given by Professor Schon, and thus introduce students to the University of São Paulo introductory concepts of fracture mechanics.

All this pre-trial process of heat treatment and machining was done in a period of three months due to the involvement of many people in the design and huge amount of activities to be made so that the test was done correctly.

After the test, which was performed a few times so that we can be familiar with the conditions of the test piece and the machine, we had to make the processing of data so we could discuss it and reach conclusions by comparing the results with the literature.

Keywords: Design, objective, test, crack and machined.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Carregamento cíclico de amplitude constante	13
Figura 2 - Parâmetros de carregamento	14
Figura 3 - Esquema dos três estágios da propagação de trinca de fadiga	15
Figura 4 - Marcas de estrias numa liga de alumínio	15
Figura 5 - Foto da barra da liga de alumínio AA 2011	17
Figura 6 – Desenho da peça para ensaio em corpo de prova retangular	18
Figura 7 – Desenho da peça utilizada	19
Figura 8 – Vistas superior e frontal da oeça em AutoCAD.....	20
Figura 9 - Peça pré e pós usinagem	20
Figura 10 - Instron Eletropuls 10000	21
Figura 11 - Modelo do sistema de preensão da peça do Bao	22
Figura 12 - Foto do experimento conduzido pelo Bao do CCT	22
Figura 13 - Foto de como a peça foi presa no experimento	23
Figura 14 - Área onde ocorre a maior pressão na peça.....	25
Figura 15 - Gráfico teórico de tensão sobre o tempo exercido sobre a peça	26
Figura 16 - Gráfico que relaciona o da/dN com o delta K	26
Figura 17 - Gráfico prático de tensão sobre o tempo exercido sobre a peça	27
Figura 18 - Microscopia da região fraturada em 30x	29
Figura 19 - Microscopia da região fraturada em 500x	29

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Composição da liga de alumínio AA 2011	17
Tabela 2 - Coeficientes c1 a c5 com base em α	24
Tabela 3 - Comparação entre os parâmetros teóricos com os práticos	27

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AutoCad: software computacional de CAD

CCT: Corpo de prova compacto de tração

MeV: Microscópio eletrônico de varredura

LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta\sigma$: variação da tensão
 σ_{\max} : tensão máxima
 σ_{\min} : tensão mínima
 σ_a : amplitude de tensão
 σ_m : tensão média
 R : razão da tensão
 da/dN = propagação de trinca de fadiga
 ΔK : variação do fator de intensidade de tensão
 a : tamanho da trinca
Al: alumínio
Si: silício
Fe: ferro
Cu: cobre
Zn: zinco
mm: milímetros
°C: graus Celsius
 T_{\max} : força máxima
 T_{\min} : força mínima
Ac: área de contato
N: numero de ciclos

ÍNDICE

1. Introdução	12
2. Revisão bibliográfica	13
2.1 Fadiga	13
2.1.1 Carregamento cíclico.....	13
2.1.2 Parâmetros de carregamento.....	13
2.2 Fratura por fadiga.....	14
2.2.1 Nucleação da trinca	14
2.2.2 Propagação da trinca	14
2.2.3 Superfícies de fratura.....	15
2.3 Relação de Paris	15
3. Materiais e métodos.....	17
3.1 Material base	17
3.2 Preparação da amostra	17
3.2.1 Solubilização da barra.....	18
3.2.2 Têmpera da barra	18
3.2.3 Usinagem da peça.....	18
3.2.3.1 Desenho do artigo	18
3.2.3.2 Desenho no AutoCad	19
3.2.3.3 Peça usinada	20
3.2.4 Precipitação da peça	21
3.2.5 Ensaio de propagação da trinca de fadiga	21
3.2.5.1 Máquina de ensaio	21
3.2.5.2 Preensaão da peça na máquina	21
4. Resultados e Discussão	24
4.1 Cálculo teórico do carregamento	24
4.2 Ensaio e resultados práticos	27
4.3 Discussão entre a diferença entre o teórico e o prático	27
4.3.1 Modo de como a peça foi presa na máquina	28
4.3.2 Diferentes ligas usadas	28
4.4 Microscopia da peça quebrada.....	28
5. Conclusão	30
6. Referências bibliográficas	31

1. INTRODUÇÃO

A Revolução Industrial influenciou diretamente a engenharia como vemos atualmente e como ela evoluiu ao longo das centenas de anos. Os processos de manufatura artesanais deram lugar as máquinas, estruturas e ao uso de novas fontes energéticas como carvão e eletricidade.

Essas novas máquinas submetidas a carregamentos cílicos começavam a falhar e sua ocorrência era de difícil previsão pelos engenheiros da época, principalmente devido a falta de conhecimento em fadiga.

Depois de muito estudo ao longo dos séculos XIX e XX, a previsibilidade com que a ruptura por fadiga aconteça é de mais fácil previsão, visto que inúmeros gráficos e simuladores estão disponíveis para que posamos monitorar tanto a vida útil do material quanto a tensão mínima e máxima que podemos aplicar para que o material rompa como em experimentos labororiais.

Hoje em dia, há uma preocupação maior com o bom funcionamento os dispositivos adventos da Revolução Industrial, principalmente em relação ao aspecto da segurança. A falha de uma peça devido a fadiga pode causar um acidente automobilístico, um incêndio numa fábrica, botando em risco vidas de pessoas.

Dito isso, esse experimento visa estudar e tentar melhor entender o processo de propagação de trinca de fadiga, assim como mostrar toda a preparação que foi feita pré-experimento para o ensaio fosse feito de forma correta.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fadiga

Definição de fadiga: Fadiga ocorre devido a carregamentos cílicos exercidos sobre o material gerando a nucleação de trinca e sua posterior propagação, de forma que finalmente ocorre sua fratura.

2.1.1 Carregamento cílico

Em ensaios de laboratório, geralmente são empregados carregamentos cílicos com amplitude constante, pois se torna mais fácil o estudo da propagação da trinca de fadiga ao simplificar o ensaio a ser realizado no material.

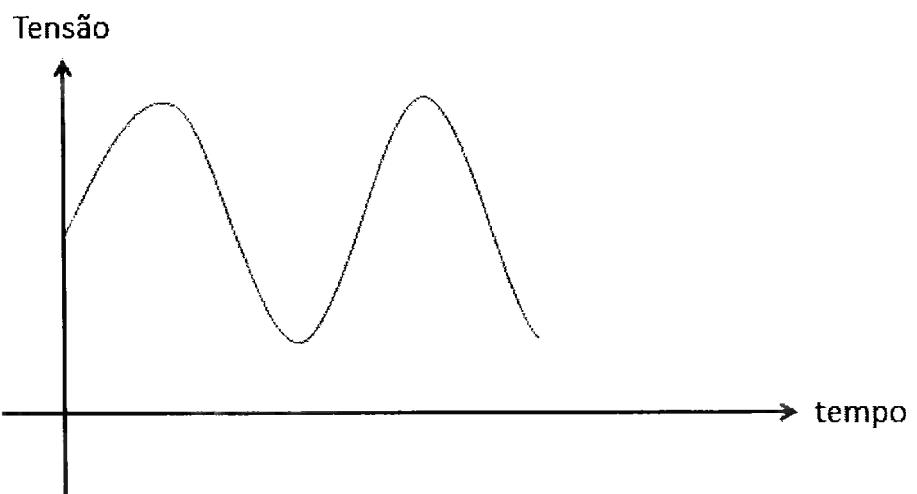


Figura 1 - Carregamento cílico de amplitude constante

2.1.2 Parâmetros de carregamento

Definição de parâmetros de carregamento essenciais para o entendimento do experimento:

- Faixa de tensão: $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ (E1)

- Amplitude de tensão: $\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$ (E2)

- Tensão média: $\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$ (E3)

- Razão de tensão: $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$ (E4)

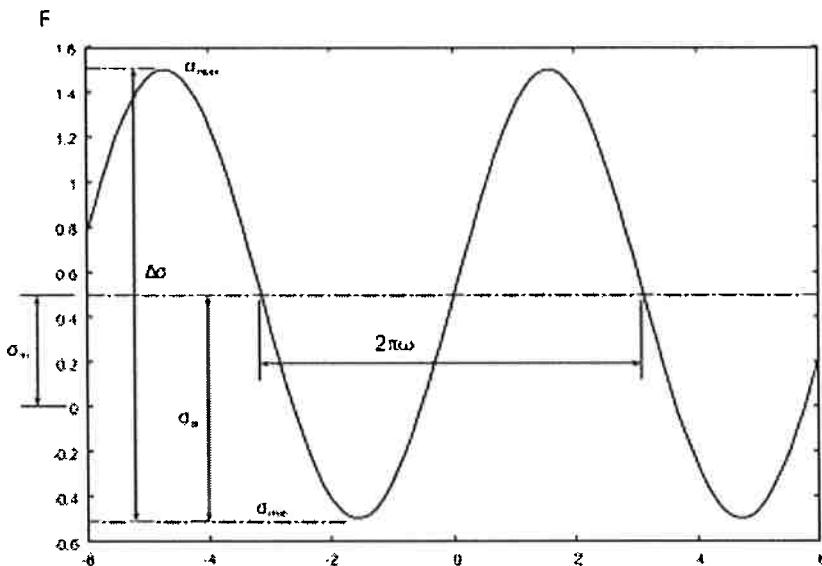


Figura 2 - Parâmetros de carregamento

2.2 Fratura por fadiga

Basicamente, a fratura por fadiga é dividida em três estágios: nucleação da trinca, propagação estável da trinca e propagação instável da trinca.

2.2.1 Nucleação da trinca

A nucleação da trinca geralmente ocorre em superfícies ou interfaces como contornos de grão ou interfaces matriz/inclusão. Tensões normais de tração favorecem a nucleação da trinca, com isso, áreas onde há concentração de tensão tem maior probabilidade de nucleação da trinca.

2.2.2 Propagação da trinca

A propagação da trinca corresponde ao estágio II da figura abaixo e é caracterizado por uma trinca principal que se propaga formando um ângulo de 90º do eixo de carregamento.

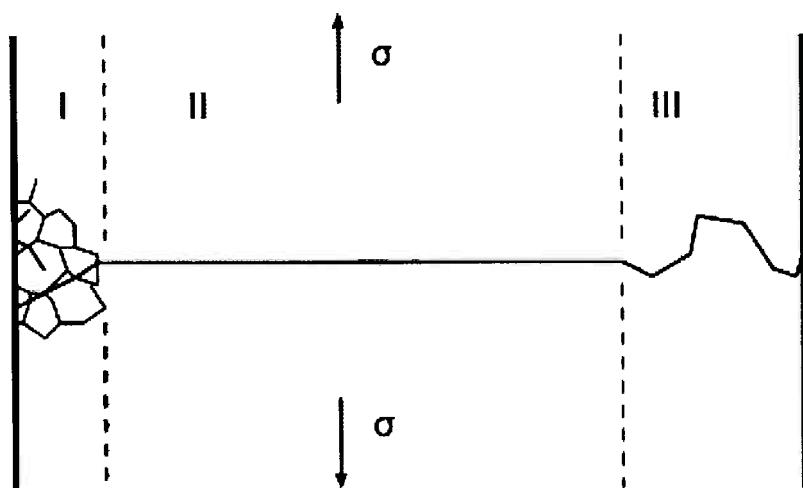


Figura 3 - Esquema dos três estágios da propagação de trinca de fadiga

2.2.3 Superfícies de fratura

Marcas concêntricas na superfície de fratura são formadas durante a vida útil do componente e são chamadas de estrias. As estrias são relacionadas à posição da trinca a cada ciclo de carregamento, assim conseguimos medir a taxa de avanço da trinca pela distância entre as estrias.

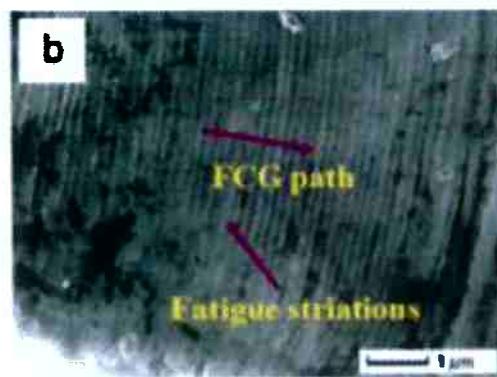


Figura 4 - Marcas de estrias numa liga de alumínio

2.3 Relação de Paris

P.C. Paris, autor que relacionou a propagação de trincas de fadiga com a variação do fator de intensidade de tensão $\Delta K \equiv Y \Delta\sigma\sqrt{\pi a}$ por:

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^n \quad (E5)$$

3. Materiais e Métodos

3.1 Material base

No experimento foi utilizado a liga de alumínio AA 2011. É uma liga de boa usinabilidade mas de péssima resistência à corrosão. A composição segue na tabela abaixo:

Componente	Al	Si	Fe	Cu	Zn	Outros
Quantidade	> 90%	0,40%	0,70%	5%/6%	0,30%	0,15%

Tabela 1 - Composição da liga de alumínio AA 2011

Barras cilíndricas da liga de alumínio de 35mm de diâmetro foram usadas como na figura 5.



Figura 5 - Foto da barra da liga de alumínio AA 2011

3.2 Preparação da amostra

Passo-a-passo de todas as etapas necessárias para realizar o teste final na máquina de fadiga.

3.2.1 Solubilização da barra

Primeiro passo no processo de preparação da amostra foi a solubilização da barra da liga de alumínio. O tratamento térmico dessa liga envolve solubilização à 525°C durante aproximadamente 15 minutos.

3.2.2 Têmpera da barra

Tratamento T6, tratamento térmico de têmpera em água com o intuito de produzir têmperas estáveis.

3.2.3 Usinagem da peça

Esse terceiro processo consiste em algumas pequenas etapas:

3.2.3.1 Desenho do artigo

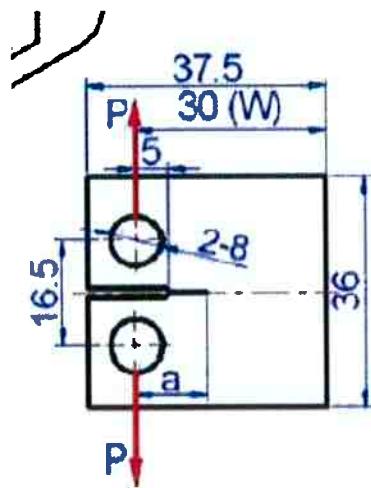


Figura 6 – Desenho da peça para ensaio em corpo de prova retangular

Primeiramente, começamos procurando por usar a norma padrão para ensaio de peças de fatiga e nela encontramos como na figura 6, um “layout” retangular, porém foi escolhido uma outra forma devido ao fato das barras serem cilíndricas, porque se usinássemos uma peça retangular num corpo cilíndrico perderíamos muito corpo de prova e a peça não se encaixaria na máquina para realização dos teste.

Portanto, precisamos usar um outro formato que seja mais adequado para a nossa experiência. O desenho é do artigo do Bao e podemos ver na foto abaixo:

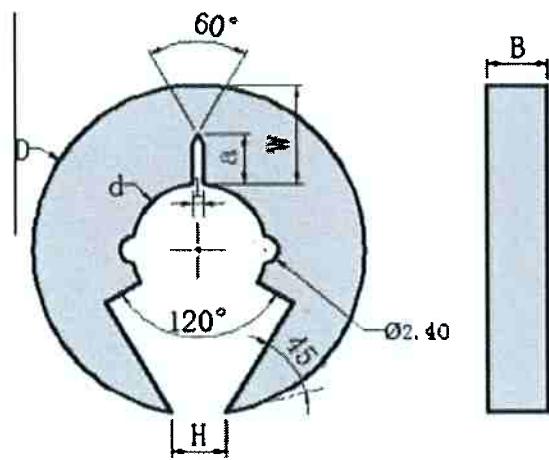


Figura 7 – Desenho da peça utilizada

3.2.3.2 Desenho no AutoCad

Para pedido da usinagem na oficina pelos técnicos, vistas frontal e lateral foram feitas no AutoCad.

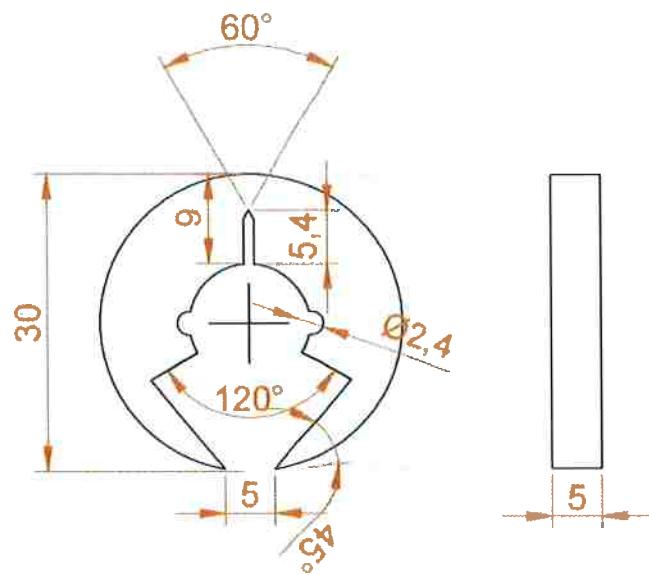


Figura 8 - Vistas superior e lateral da peça em AutoCAD

3.2.3.3 Peça usinada

Após o envio do desenho da peça para os técnicos de laboratório, eles a usinaram com as medidas dadas.



Figura 9 - Peça pré e pós usinagem

3.2.4 Precipitação da peça

Depois do layout da peça estar pronta, a peça foi endurecida por precipitação a 160ºC por 15 horas.

3.2.5 Ensaio de propagação da trinca de fadiga

3.2.5.1 Máquina de ensaio



Figura 10 - Instron Eletropuls 10000

3.2.5.2 Preensaõ da peça na máquina

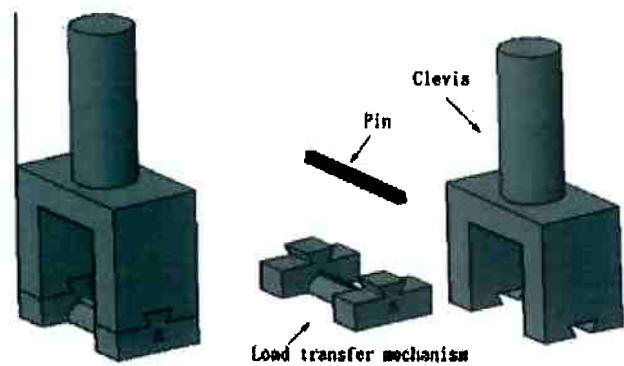


Figura 11 - Modelo do sistema de preensão da peça do Bao

Tivemos que adaptar como a peça seria presa na máquina devido a dificuldade na réplica do ensaio do artigo (Bao, 2015). Como visto na figura 11, ele criou um sistema onde a peça a ser testada é acoplada num pino e posteriormente encaixada num gancho.

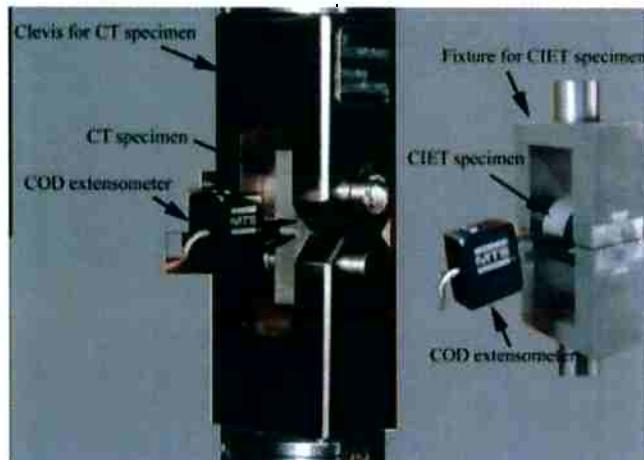


Figura 12 - Foto do experimento conduzido pelo Bao do CCT



Figura 13 - Foto de como a peça foi presa no experimento

Como pode ser visto na figura 13, no experimento, a peça foi presa em cada um dos ganhos diretamente na máquina.

4. Resultados e Discussão

4.1 Cálculo teórico do carregamento

Primeiramente, tivemos que calcular os parâmetros σ_{\max} e σ_{\min} que seriam inseridos para começar o ensaio na máquina de fadiga. Para isso, precisamos usar a variação do fator de intensidade de tensão $\Delta K \equiv Y \Delta \sigma \sqrt{\pi a}$.

Segundo o artigo,

$$Y = \frac{f\left(\frac{a}{W}\right)}{\sqrt{\frac{\pi a}{W}}} \quad (E6)$$

Sendo que,

$$f(a/W) = c_1 (a/W)^{c_2} + c_3 (a/W)^{c_4} + c_5 \quad (E7)$$

Onde os coeficientes c_1 a c_5 são obtidos através da tabela 2. Considerando $\alpha = 0,6$

Coeficiente	$\alpha = 0,6$	$\alpha = 0,5$	$\alpha = 0,4$	$\alpha = 0,3$	$\alpha = 0,2$
c_1	120.3243	827.0858	81.2623	592.2529	519.8693
c_2	2.9995	15.3401	3.0721	15.4641	15.5416
c_3	1032.8602	96.8041	689.9915	70.3016	62.2053
c_4	15.2898	3.0332	15.3975	3.1160	3.1644
c_5	11.4109	9.0479	7.4698	6.3430	5.4997

Tabela 2 - Coeficientes c_1 a c_5 com base em α

Obtemos assim o valor de $f(a/W) = 37,82$ e consequentemente $Y = 27,54$.

Por último, precisamos obter ΔK . Arbitrariamente escolhemos um valor para $\Delta K = 300 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$ e depois comparamos com o número de ciclos ou o tamanho da trinca calculada pela relação de Paris, $da/dN = C (\Delta K)^n$ para verificarmos se os valores calculados estão corretos.

Assim, obtivemos $\sigma_{\max} = 6,4 \text{ MPa}$ e $\sigma_{\min} = 3,2 \text{ MPa}$ já que assumimos que $R=0,5$.

Porém, os parâmetros que introduzimos na máquina não são as σ_{\max} e σ_{\min} . E sim os valores T_{\max} e T_{\min} , para obtermos esses dados, seguem as fórmulas abaixo:

$$T_{\max} = \sigma_{\max} * A_c \quad (E8)$$

$$T_{\min} = \sigma_{\min} * A_c \quad (E9)$$

Aproximando A_c para uma área de contato 2D ao invés de 3D, temos que

$$A_c \approx a * B * 5 \quad (E10)$$

Isso acontece porque a área de contato porque multiplicamos o valor das duas áreas retangulares que sofrem maior pressão pelo comprimento da peça conforme visto na figura 13.

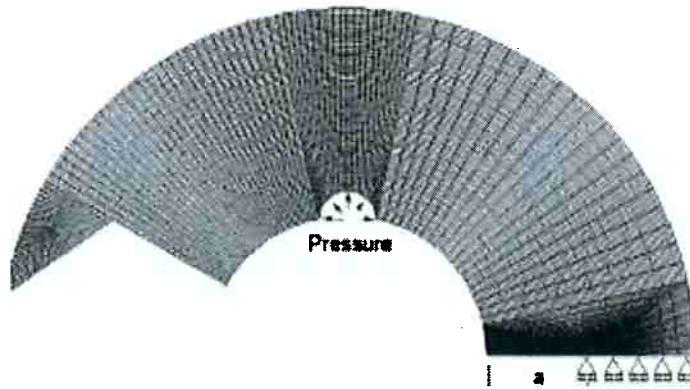


Figura 14 - Área onde ocorre a maior pressão na peça

Com as equações 8, 9 e 10, obtemos os valores de T_{\max} e T_{\min} :

$$T_{\max} = 700N$$

$$T_{\min} = 350N$$

Assim, podemos montar o gráfico de carregamento com esses dois parâmetros:

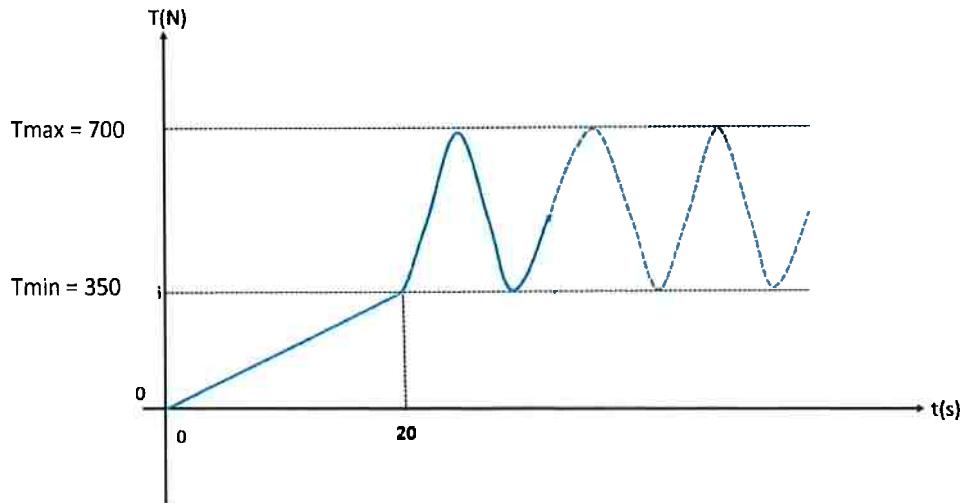


Figura 15 - Gráfico teórico de tensão sobre o tempo exercido sobre a peça

E conseguimos também calcular o número de ciclos necessários para o rompimento da peça por fadiga. Pela relação de Paris,

$$da/dN = C (\Delta K)^n \quad (E11)$$

Porém, no artigo do Bao, há um gráfico no qual ele relaciona o da/dN com o valor do ΔK utilizado. Como no nosso caso usamos $\Delta K = 300 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$,

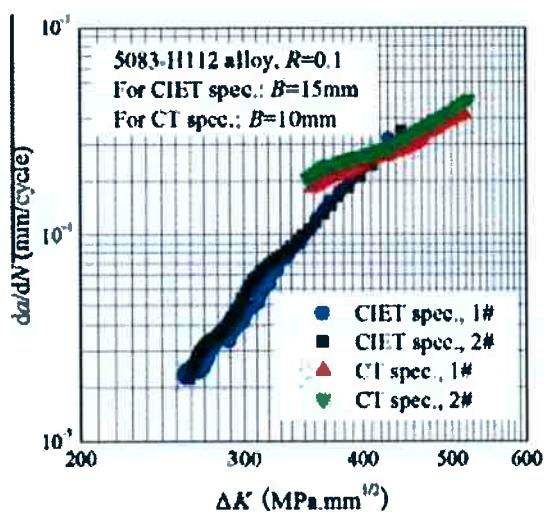


Figura 16 - Gráfico que relaciona o da/dN com o ΔK

Então, pela figura 16, temos que se

$$\Delta K = 300 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2} \leftrightarrow \frac{da}{dN} \approx 3 \cdot 10^{-5} \text{ (mm/ciclo)}$$

Como a distância para que se tenha o rompimento da trinca é 3,6mm, temos como da crítico como 3,6mm.

Assim $N = 120000$ ciclos para rompimentos.

4.2 Ensaio e resultados práticos

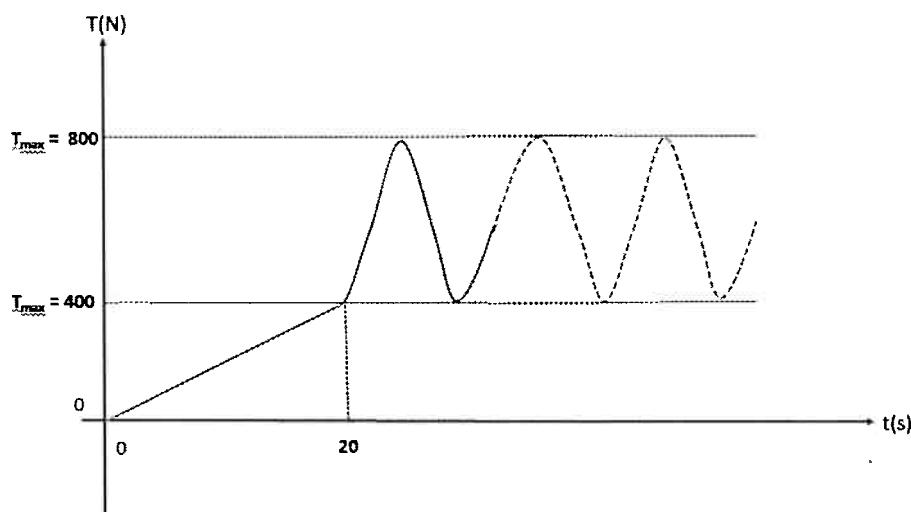


Figura 17 - Gráfico prático de tensão sobre o tempo exercido sobre a peça

$$T_{\max} = 800 \text{ N}$$

$$T_{\min} = 400 \text{ N}$$

E o número de ciclos é obtido pelo tempo até o rompimento, considerando a frequência de 5Hz e um tempo de aproximadamente 3 horas. Temos que

$$1 \text{ hora} = 3600 \text{ s}$$

$$3 \text{ horas} = 10800 \text{ s}$$

$$\text{Número de ciclos} = 54000 \text{ ciclos}$$

4.3 Discussão entre a diferença do teórico com o prático

Apesar da ordem de grandeza estar correta, percebemos claramente que há uma diferença entre o valor calculado e aquele obtido na prática.

	Teórico	Prática
Tmax (N)	145	800
Tmin (N)	72,5	400
Número de ciclos	120000	54000
frequência (Hz)	3	5

Tabela 3 - Comparação entre os parâmetros teóricos com os práticos

Isso deveu-se a 2 principais motivos,

4.3.1 Modo de como a peça foi presa na máquina

Como tivemos que prender a peça de uma maneira diferente daquela prevista inicialmente (enquanto prendemos diretamente a peça na máquina, no artigo do Bao, eles criam um sistema usando um pino acoplado num gancho), alterando o valor previsto de transmissão da tensão exercida sobre a peça e consequentemente como a concentração de tensão agirá sobre a mesma, resultando num diferente esquema de propagação da trinca.

4.3.2 Diferentes ligas usadas

Usamos uma liga de alumínio AA 2011 e no artigo do Bao eles usam uma liga de alumínio 5083-H112. Apesar das duas serem ligas de alumínio, elas possuem propriedades mecânicas diferentes o que acabou por afetar nossa previsão das tensões e número de ciclos até o rompimento.

4.4 Microscopia da peça quebrada

A seguir duas figuras uma em 30x e outra em 500x de microscopia eletrônica da região fraturada por fadiga. Note que dá para perceber nitidamente das regiões com estrias causadas pelo carregamento cíclico.

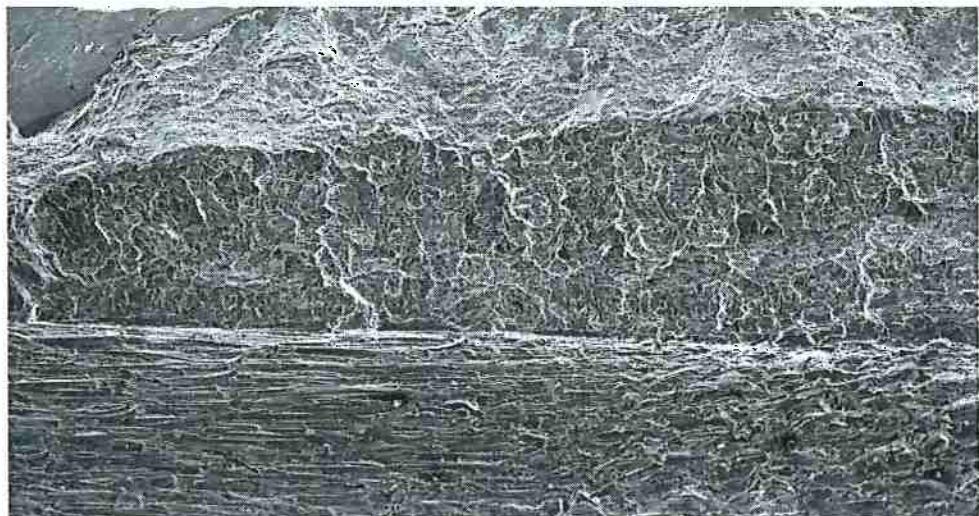


Figura 18 - Microscopia da região fraturada em 30x no MeV

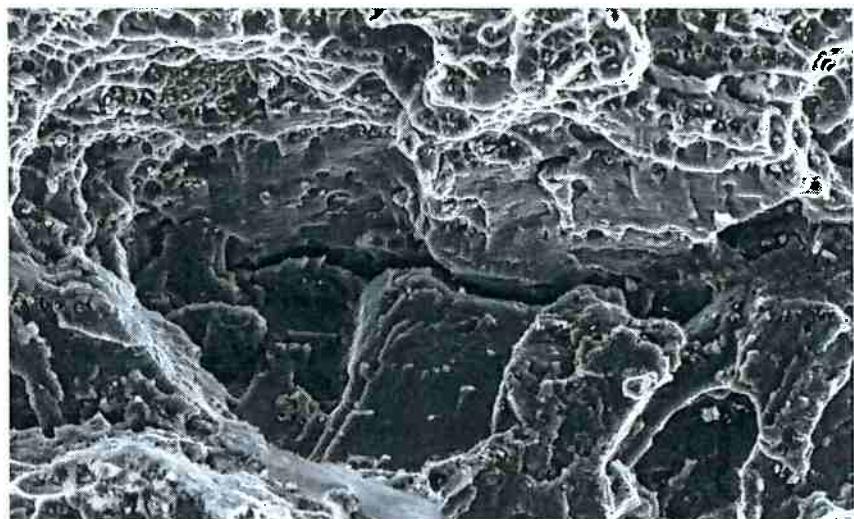


Figura 19 - Microscopia da região fraturada em 500x no MeV

5. Conclusão

Propagação de trinca por fadiga é um fenômeno que não é tão estudado quanto a sua real importância no desenvolvimento da engenharia metalúrgica. Mais ensaios deveriam ser conduzidos devido à complexidade no processo e o grande número de variáveis que podem atrapalhar no andamento do ensaio.

Por isso a importância desse estudo no avanço da engenharia e sua aplicação prática, o estudo e consequente previsão do ensaio a ser realizado mostrou que podemos evitar que a falha por fadiga aconteça conhecendo como a trinca se forma e como ela se propaga.

Apesar de algumas diferenças de valores entre o que foi previsto (teórico) e o prático, percebemos que a curva dos gráficos é semelhante e mostra que o cálculo feito está correto.

6. Referências Bibliográficas

- [1] C. Bao; L.X. Cai; C. Dan “Estimation of fatigue crack growth behaviour for small-sized C-shaped inside edge-notched tension (CIET) specimen using compliance technique” International Journal of Fatigue, 2015.
- [2] J. Sheng; S. Huang; J.Z. Zhou; J.Z. Lu; S.Q. Xu; H.F. Zhang “Effect of laser peening with different energies on fatigue fracture evolution of 6061-T6 aluminum alloy” Optics & Laser Technology, 2015.
- [3] Schon, Claudio Geraldo “Mecânica dos Materiais”, Apostila, 2011
- [4]https://www.alcoa.com/brasil/pt/resources/pdf/industria/catalogo_ligas_temperas_2010.pdf - acessado em 24/06/2016
- [5]<http://www.instron.com.br/pt-br/products/testing-systems/dynamic-and-fatigue-systems/electropuls-systems?region=Brasil> - acessado em 28/06/2016
- [6] S. Zheng; Qin Yu; Y. Jiang “An experimental study of fatigue crack propagation in extruded AZ31B magnesium alloy” International Journal of Fatigue, 2012.
- [7] V. L. Neelakantha; T. Jayaraju; P. Naik; Dilip Kumar; C.R. Rajashekhar; Mohankumar “Determination of fracture toughness and fatigue crack growth rate using circumferentially cracked round bar specimens of Al2014T651” Aerospace Science and Technology, 2013.