

**MARIA CECÍLIA PONTES SILVA**

**CONTRIBUIÇÃO PARA A ELABORAÇÃO DE  
PRÁTICAS LABORATORIAIS PARA O ENSINO-  
APRENDIZAGEM DE FADIGA E MECÂNICA DA  
FRATURA**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AERONÁUTICA  
2019**

**MARIA CECÍLIA PONTES SILVA**

**CONTRIBUIÇÃO PARA A ELABORAÇÃO DE  
PRÁTICAS LABORATORIAIS PARA O ENSINO-  
APRENDIZAGEM DE FADIGA E MECÂNICA DA  
FRATURA**

**Projeto de Conclusão de Curso**  
apresentado ao corpo docente do Curso  
de Graduação em Engenharia  
Aeronáutica da Universidade Federal de  
Uberlândia, como parte dos requisitos  
para obtenção do título de **BACHAREL  
EM ENGENHARIA AERONÁUTICA.**

Orientadora: Profa. Dra. Núbia dos Santos  
Saad

**UBERLÂNDIA – MG**

**2019**

## MARIA CECILIA PONTES SILVA

Projeto de Conclusão de Curso  
**APROVADO** pelo corpo docente do  
Curso de Graduação em Engenharia  
Aeronáutica da Universidade Federal de  
Uberlândia.

Banca Examinadora:

---

Profa. Dra. Núbia dos Santos Saad – FEMEC/UFU – Orientadora

---

Prof. Dr. Tobias Souza Morais – FEMEC/UFU

---

Eng. MSc. Jefferson Gomes do Nascimento – FEMEC/UFU (doutorando)

**Uberlândia, 13 de julho de 2019.**

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus pais, Marco Antônio e Nilce Pontes, e minha irmã Ana Bárbara, que com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa da minha vida. Dedico também aos meus colegas de graduação, que hoje são meus grandes amigos e também a todos os professores que me acompanharam durante a graduação.

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar o curso de Graduação em Engenharia Aeronáutica.

À minha orientadora Núbia dos Santos Saad pelo empenho dedicado à elaboração deste trabalho.

Aos amigos e familiares que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação.

PONTES, M.C. **Contribuição para a elaboração de práticas laboratoriais para o ensino-aprendizagem de fadiga e mecânica da fratura**. 2019. 56 f. Projeto de Conclusão de Curso – Curso de Graduação em Engenharia Aeronáutica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

## RESUMO

Sabe-se, há muitos anos, que os materiais falham sob cargas flutuantes com valores muito mais baixos de tensão do que a tensão máxima de resistência de um determinado material. Este processo de falha devido ao carregamento cíclico é denominado fadiga, um fenômeno dinâmico que inicia pequenas trincas em um componente estrutural e faz com que elas cresçam até a deterioração progressiva da resistência deste. Se essas trincas não forem detectadas, podem resultar em falha catastrófica. Porém, o perigo de uma falha catastrófica por fadiga na estrutura de uma aeronave pode ser eliminado completamente ou pode se tornar extremamente remoto se a estrutura for projetada para inspeções regulares e testes de materiais. O aprendizado sobre fadiga e mecânica da fratura é um diferencial na formação do engenheiro aeronáutico, já que é de extrema importância para essa área. Este trabalho trata de uma contribuição para a elaboração de aplicações práticas laboratoriais de fadiga e mecânica da fratura para o curso de graduação em engenharia aeronáutica. Foram propostos roteiros de três práticas: flexão rotativa, força axial (tração) e flexão em três pontos, segundo as normas ASTM.

**Palavras chaves:** *Fadiga de materiais metálicos, testes de fadiga*

PONTES, M.C. **Contribution to the development of practical applications for the teaching-learning of fatigue and fracture mechanics.** 2019. 56 f. Term Paper – Bachelor of Aeronautical Engineering, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, MG.

## **ABSTRACT**

It has been known for many years that materials fail under repeated loads at stresses below the material's yield strength. This process of damage and failure due to cyclic loading is called fatigue, a process that initiates cracks in a structural component and this damage can accumulate until it causes a progressive deterioration of the material strength. If these cracks are not detected, they can result in catastrophic failure. The danger of a catastrophic failure due to fatigue in the structure of an aircraft can be completely eliminated or become exceedingly rare if the structure is design for regular inspections and testing of materials. The knowledge about fatigue and fracture mechanics is essential for the aeronautical engineer since it is of extreme importance for this area. This paper is a contribution for the development of practical laboratory applications of fatigue and fracture mechanics for the Undergraduate Course in Aeronautical Engineering. Three practices were proposed: rotating bending, axial fatigue test, and three points bending, according to ASTM standards.

**Keywords:** *Fatigue of metals, fatigue test*

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b>	Característica de uma estrutura sob falha por fadiga.	<b>5</b>
<b>Figura 2.2</b>	Modos de deslocamento.	<b>7</b>
<b>Figura 2.3</b>	Sistema de coordenadas em três dimensões para a região da ponta de uma trinca.	<b>7</b>
<b>Figura 2.4</b>	Fator de intensidade de tensão para três casos.	<b>9</b>
<b>Figura 2.5</b>	Energia potencial.	<b>10</b>
<b>Figura 2.6</b>	Amplitude de tensão constante.	<b>12</b>
<b>Figura 2.7</b>	Curvas S-N para uma liga de alumínio. O número de ciclos é plotado em escala linear no gráfico da esquerda e em escala logarítmica no gráfico da direita	<b>14</b>
<b>Figura 2.8</b>	Curva S-N para um aço A517	<b>14</b>
<b>Figura 2.9</b>	Variação do comprimento de trinca e tensão em relação ao número de ciclos em que inspeções são necessárias	<b>18</b>
<b>Figura 2.10</b>	Comportamento típico de crescimento de trincas por fadiga em metais	<b>19</b>
<b>Figura 2.11</b>	Efeito do valor da razão de tensão R	<b>20</b>
<b>Figura 2.12</b>	Passos para obtenção da curva da $\log dN$ versus $\Delta K$ .	<b>21</b>
<b>Figura 2.13</b>	Comprimento de trinca em função do número de ciclos.	<b>22</b>
<b>Figura 3.1</b>	Orientação do plano e direção de uma trinca para seções retangulares.	<b>26</b>
<b>Figura 3.2</b>	Principais tipos de forças e deslocamentos	<b>27</b>
<b>Figura 3.3</b>	Corpo de prova para flexão em três pontos ( <i>Bend Specimen SE</i> ).	<b>28</b>
<b>Figura 3.4</b>	Detalhes da pré trinca	<b>29</b>
<b>Figura 3.5</b>	Modelo esquemático do suporte do ensaio de flexão em três pontos	<b>30</b>
<b>Figura 4.1</b>	Amplitude de tensão constante	<b>33</b>
<b>Figura 4.2</b>	Diagrama S-N para o aço A517	<b>34</b>
<b>Figura 4.3</b>	Corpo de prova	<b>35</b>
<b>Figura 5.1</b>	Aspecto do corpo de prova.	<b>39</b>
<b>Figura 5.2</b>	Esquema da máquina de testes	<b>39</b>
<b>Figura 5.3</b>	Diagrama S x N (Aços e Materiais Ferrosos)	<b>40</b>
<b>Figura 5.4</b>	Diagrama S x N (Alumínio e suas ligas)	<b>41</b>
<b>Figura 5.5</b>	Esquema do cálculo dos pesos.	<b>42</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1</b>	Constantes da curva S-N para vários materiais de engenharia	<b>15</b>
<b>Tabela 2.2</b>	Constantes de Barsom (1999) para curva da/dN versus $\Delta K$	<b>19</b>

## SUMÁRIO

<b>C A P Í T U L O I – INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>C A P Í T U L O II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	3
<b>2.1</b> Introdução .....	3
<b>2.2</b> Contexto historico .....	3
<b>2.3</b> Fundamentacao teorica. ....	4
<b>2.3.1</b> Características de uma falha por fadiga .....	4
<b>2.3.2</b> Comportamentos estruturais: <i>Safe life e Fail safe</i> .....	5
<b>2.3.3</b> Métodos de fadiga-vida .....	6
<b>2.3.4</b> Conceitos matemáticos .....	6
<b>2.3.5</b> Método tensão-vida .....	11
<b>2.3.5</b> Mecânica da fratura .....	16
<b>C A P Í T U L O III – ROTEIROS</b> .....	24
<b>C A P Í T U L O IV – CONCLUSÕES</b> .....	44
<b>C A P Í T U L O V – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	46

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

A fratura é um problema secular, que a sociedade tem enfrentado desde que existem estruturas feitas pelo homem, logo, o objetivo é reduzir danos e falhas para diminuir custos, desperdícios de materiais, evitar acidentes e catástrofes. As indústrias então possuem uma crescente demanda por durabilidade, segurança, confiabilidade, o que gera um grande interesse em estudos para melhorar a resistência, a qualidade, a produtividade e a longevidade dos componentes estruturais de engenharia.

O papel do engenheiro é então escolher e desenvolver os materiais ideais para a indústria baseando-se em diversos ensaios mecânicos e analisando as condições a que será submetido. Um tipo de falha comum dos componentes de engenharia, é a fadiga, que ao contrário das falhas ocorridas em regime estático onde há um aviso prévio, as falhas por fadiga são caracterizadas por propagação de trincas seguida por uma fratura súbita, o que as tornam perigosas, principalmente na indústria aeronáutica.

Em situações mais comuns, uma pequena falha que estava inicialmente presente se desenvolve como uma trinca e depois cresce até atingir o tamanho crítico culminando em fratura frágil. O crescimento de uma trinca pode ser causado, por exemplo, por carregamentos cíclicos, um comportamento denominado crescimento de trinca por fadiga, e as tensões cíclicas resultantes podem levar a danos físicos microscópicos aos materiais envolvidos. Mesmo com tensões muito abaixo das tensões máximas de resistência de um determinado material, esse dano microscópico pode se acumular com o ciclo contínuo até que se desenvolva em uma trinca ou outro dano macroscópico que leve à falha do componente estrutural. Onde as trincas são difíceis de evitar, uma metodologia especial chamada mecânica de fratura pode ser usada para auxiliar na seleção de materiais e no projeto de componentes para minimizar a possibilidade de fraturas.

Logo, o entendimento de fadiga por parte dos engenheiros e os testes de análise de fadiga são importantes para uma avaliação da qualidade do material e para projetar e construir estruturas que sejam confiáveis e que possuem resistência suficiente à fadiga.

O presente trabalho tem por objetivo oferecer uma contribuição para a realização de práticas laboratoriais para o ensino aprendizagem de fadiga e mecânica da fratura, primordialmente, para alunos do Curso de Graduação em Engenharia Aeronáutica da Universidade Federal de Uberlândia, através de proposições de roteiros de ensaios de fadiga.

## CAPÍTULO II

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 Introdução

Neste capítulo, é apresentado breve contexto histórico sobre a mecânica da fratura e uma fundamentação teórica.

#### 2.2 Contexto histórico

Projetar estruturas para evitar fraturas não é uma ideia nova. Experimentos realizados por *Leonardo da Vinci* há alguns séculos, forneceram algumas pistas para o diagnóstico da causa da fratura. O trabalho realizado na Alemanha por August Wöhler, iniciado na década de 1850 e motivado por falhas em eixos ferroviários, iniciou o desenvolvimento de estratégias de projeto para evitar falhas por fadiga e testou ferro, aço e outros metais sob cargas de flexão, torção e axiais.

Uma relação quantitativa entre a tensão da fratura e o tamanho da falha tem como fonte o trabalho de Griffith, publicado em 1920. Griffith formulou uma teoria de fratura baseada em um balanço de energia simples onde uma falha se torna instável, e assim ocorre a fratura, quando a mudança de tensão-energia que resulta a partir de um incremento de crescimento de trincas é suficiente para superar a energia superficial do material. Porém, uma vez que este modelo assume que o trabalho de fratura vem exclusivamente da energia superficial do material, a abordagem Griffith se aplica apenas a sólidos idealmente frágeis.

Passados alguns anos, ocorreu a primeira grande contribuição realizada pelo Dr. G.R. Irwin ao estender a abordagem Griffith para metais, incluindo a energia dissipada pela fase plástica local. Em 1956, Irwin desenvolveu o conceito de taxa de liberação de energia, que foi derivado da teoria de Griffith, mas, de maneira mais aplicada à resolução de problemas de Engenharia.

Várias aplicações iniciais bem-sucedidas sobre mecânica de fratura reforçaram a posição desse novo campo de investigação na comunidade de engenharia. Em 1956, Wells usou a mecânica da fratura para mostrar que as falhas ocorridas na fuselagem de vários jatos *Comet* resultaram de trincas por fadiga que atingiram dimensões críticas. Essas trincas iniciadas nas janelas foram causadas por reforço insuficiente nesses locais, combinado com concentrações de tensões severas, ocasionado pelos cantos quadrados.

O campo da mecânica da fratura amadureceu nas duas últimas décadas do século XX, e requer inspeção dos componentes, para que haja definição de quais tamanhos e geometrias de trincas estão presentes ou podem estar presentes nas diversas situações estruturais. Por exemplo, inspeções periódicas são comumente realizadas em grandes aeronaves e pontes, de modo que uma trinca não possa crescer até um tamanho perigoso antes de ser detectada e reparada.

## **2.3 Fundamentação teórica**

### **2.3.1 Características de uma falha por fadiga**

Para caracterizar a aparência de uma falha por fadiga são necessários três estágios, ilustrados na Figura 2.1. O primeiro estágio é a iniciação de uma ou mais microtrincas. Em seguida, no segundo estágio essas microtrincas se propagam até macrotrincas, formando superfícies de fratura, que podem ter bandas ondulares, conhecidas como marcas de praia, decorrentes das mudanças no nível e na frequência do carregamento. No último estágio, uma fratura repentina do material ocorre quando a seção transversal restante do material é muito pequena para suportar a carga aplicada.

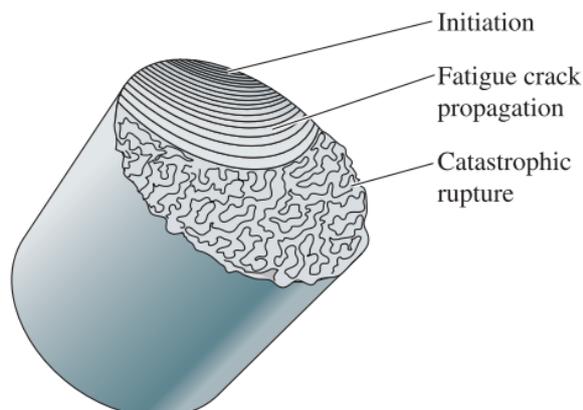


Figura 2.1 - Característica de uma estrutura sob falha por fadiga.  
Fonte: (ASKELAND e WRIGHT, 2010).

### 2.3.2 Comportamentos estruturais: *Safe life* e *Fail safe*

Segundo Megson (2013), as estruturas são projetadas para dois tipos de comportamento: *safe life* (vida segura) ou *fail-safe* (à prova de falhas). No primeiro, a estrutura é projetada para ter uma vida útil mínima durante a qual se sabe que nenhum dano catastrófico ocorrerá. No final desta vida, a estrutura deve ser substituída mesmo que não haja sinais detectáveis de fadiga. Alternativamente, é possível que componentes tenham uma vida útil inferior à do conjunto completo, já que provavelmente seja mais econômico usar dois sistemas de material mais leve durante a vida útil do conjunto, do que um material mais pesado que tenha a mesma vida segura do sistema como um todo.

Por outro lado, o comportamento *fail-safe* baseia-se no fato de que a falha de um componente em uma estrutura não leva necessariamente ao colapso da estrutura completa, desde que os componentes restantes sejam capazes de suportar, distribuindo entre si, a carga perdida pelo componente com falha e conseguem suportar cargas cíclicas até a reposição do elemento com falha. No entanto, a estrutura deve ser reavaliada e os intervalos de inspeção organizados de tal forma que uma trinca não atinja um tamanho catastrófico antes da próxima inspeção.

### 2.3.3 Métodos de fadiga-vida

Segundo Budynas e Nisbett (2011), os três métodos principais de vida sob fadiga utilizados em projeto e análise são os métodos tensão-vida, deformação-vida e o da mecânica

da fratura linear elástica. Eles possuem o objetivo de prever a vida, em número de ciclos para um carregamento especificado. Para ciclos de até  $10^3$  é classificada como fadiga de baixo ciclo, e a partir desse número, é classificada como fadiga de alto ciclo.

O método de tensão-vida, desenvolvido em 1955, baseia-se no estado de tensão dos materiais. A tensão nominal que pode resistir a cargas cíclicas é determinada considerando as tensões médias e ajustando efeitos de fatores intensificadores de tensão, como furos e filetes.

O método baseado em deformação-vida considera a deformação plástica que pode ocorrer em regiões localizadas onde trincas por fadiga se iniciam. Tensões e deformações são analisadas e usadas como base para estimativas de vida.

O método da mecânica da fratura considera que uma trinca já esteja presente e tenha sido detectada, e é empregado para prever o crescimento da trinca em relação a intensidade de tensão.

Neste presente trabalho serão apresentados os métodos tensão-vida e mecânica da fratura.

### 2.3.4 Conceitos matemáticos

Um corpo trincado pode ser carregado em qualquer um ou em uma combinação dos três modos de deslocamento apresentados na Figura 2.2 O modo I é chamado de modo de abertura e consiste simplesmente na separação das faces da trinca.

Para o Modo II, o modo deslizante, as faces de trinca deslizam em relação uma à outra na direção normal à borda principal da trinca. O modo III, o modo de cisalhamento, também envolve o deslizamento relativo das faces da trinca, sendo a direção, nesse caso, paralela à borda principal. O modo I é causado pelo carregamento de tensão, enquanto os outros dois são causados por carga de cisalhamento em direções diferentes. A maioria dos problemas do interesse de engenharia envolve principalmente o Modo I (DOWNLING, 2012).

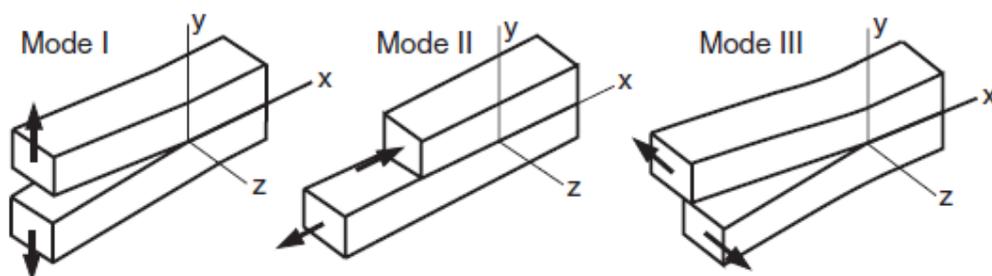


Figura 2.2 - Modos de deslocamento. Fonte: (DOWNLING, 2012)

A Figura 2.3 mostra esquematicamente um elemento próximo à ponta de uma trinca no Modo I, junto com as tensões contidas no plano nesse elemento. As coordenadas polares  $r$  e  $\theta$  estão no plano  $xy$ , que é normal ao plano da trinca, e a direção  $z$  é paralela à extremidade da trinca. Para qualquer caso de carregamento do Modo I, as tensões próximas à ponta da trinca dependem de  $r$  e  $\theta$ , como revelam a Figura 2.3 e as Equações (1) a (6).

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] + \dots \quad (1)$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] + \dots \quad (2)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} + \dots \quad (3)$$

$$\sigma_z = 0 \quad (\text{plano de tensão}) \quad (4)$$

$$\sigma_z = \nu (\sigma_x + \sigma_y) \quad (\text{plano de tensão } \varepsilon_z = 0) \quad (5)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zx} = 0 \quad (6)$$

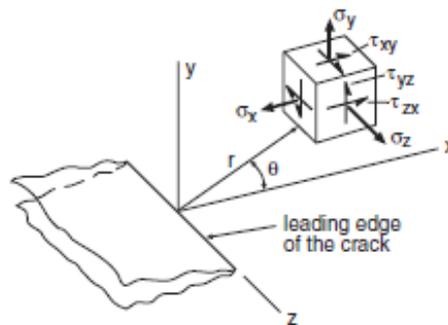


Figura 2.3 - Sistema de coordenadas em três dimensões para a região da ponta de uma trinca. Fonte: (DOWNLING, 2012).

Observa-se que cada componente de tensão é proporcional a uma única constante  $K_I$  (devido ao Modo I). Se esta constante for conhecida, toda a distribuição de tensão na ponta da trinca pode ser calculada com as Equações (1) a (6). Essa constante, que é denominada *fator de intensidade de tensão*, caracteriza completamente as condições da ponta da trinca em um material linear elástico e isotrópico.

Especificamente,  $K_I$  é uma medida da gravidade de uma situação de trinca, afetada pelo tamanho desta, da tensão e da geometria. Um determinado material pode resistir a uma trinca

sem que ocorra fratura frágil, desde que este  $K_I$  esteja abaixo de um valor crítico  $K_{IC}$ , denominado *tenacidade à fratura*. Assim, o  $K_{IC}$  é uma medida da capacidade de um dado material resistir à fratura na presença de uma trinca.

Com o exposto, a magnitude do campo de tensão perto da ponta da trinca pode ser caracterizada atribuindo-se valor do fator  $K_I$ . Sua definição em um sentido matemático formal é:

$$K_I = \lim_{r, \theta \rightarrow \infty} (\sigma_y \sqrt{2\pi r}), \quad (7)$$

mas geralmente é conveniente expressar  $K_I$  como:

$$K_I = F\sigma \sqrt{\pi a} \quad (8)$$

Onde:

- $a$  - é o comprimento da trinca,
- $\sigma$  - é a tensão nominal, e
- $F$  - é o fator necessário para considerar diferentes geometrias.

A taxa de crescimento de trinca por fadiga é controlada por  $K$ . Assim, a dependência de  $K$  em relação ao comprimento da trinca e ao fator  $F$  faz com que as trincas acelerem na medida em que crescem. Assim, trincas mais longas têm um efeito mais severo na resistência do que as mais curtas.

A quantidade  $F$  é uma função adimensional que depende da configuração de geometria e carregamento, e da relação entre o comprimento da trinca e outra dimensão geométrica, como largura ou meia largura, conforme definido para três casos na Figura 2.4. Nestes exemplos, o comprimento de trinca é medido a partir da superfície ou da linha central de carregamento, e a dimensão de largura  $b$  é consistentemente definida como o máximo comprimento de trinca possível, de modo que para  $a/b = 1$ , o material é completamente trincado. Para cada caso, polinômios ou outras expressões matemáticas são tomados para o cálculo de  $F$ .

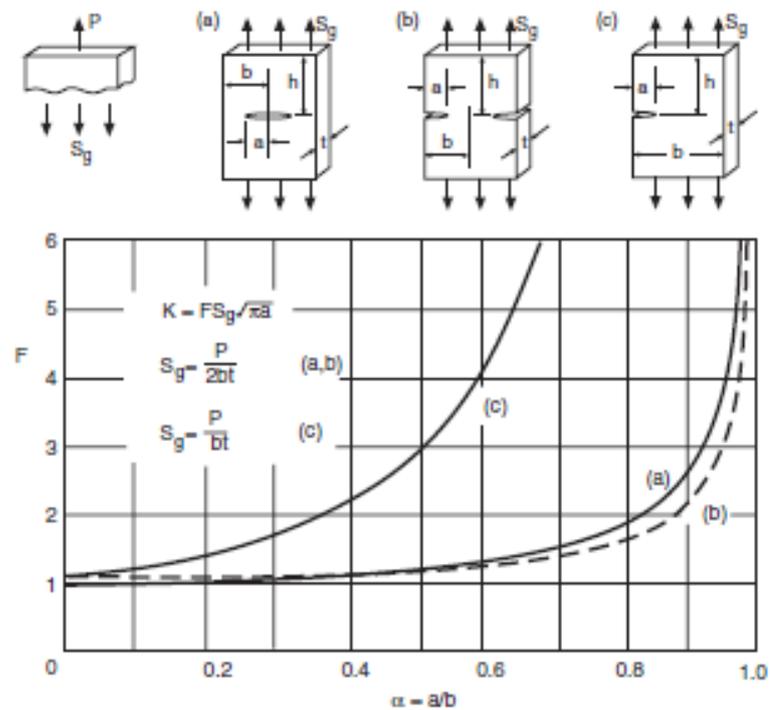


Figura 2.4 - Fator de intensidade de tensão para três casos. Fonte: (DOWNLING, 2012)

Para carregamento no Modo II ou III, existem equações de campo de tensão análogas, mas distintas, e as intensidades de tensão  $K_{II}$  e  $K_{III}$  podem ser definidas de uma maneira análoga a  $K_I$ . No entanto, a maioria das aplicações práticas envolvem o Modo I.

Considere-se um membro trincado sob um Modo I e força  $P$ , onde a fenda tem comprimento  $a$ , como mostrado na Figura 2.5. Suponha-se que o comportamento do material seja linear-elástico, o que requer que o comportamento de força *versus* deslocamento também seja linear. De maneira similar a uma mola linear, a energia potencial  $U$  é armazenada como resultado das deformações elásticas ao longo do seu volume, como apresentado na Figura 2.5 (a). Destaca-se que  $v$  é o deslocamento no ponto de carregamento e  $U = Pv/2$  é a área triangular sob a curva  $P$  versus  $v$ .

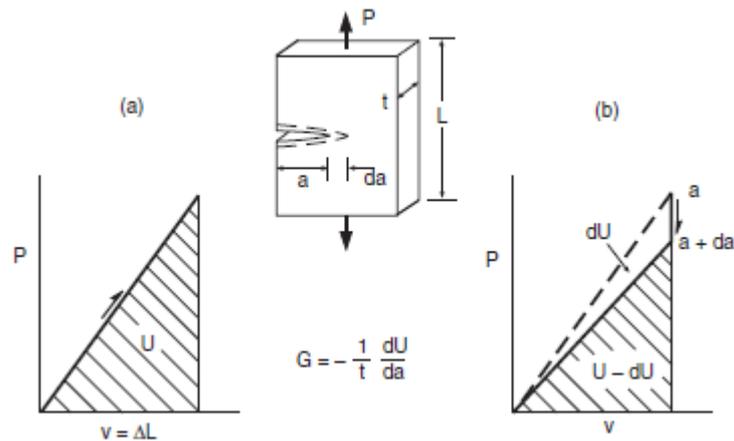


Figura 2.5 - Energia potencial. Fonte: (DOWLING, 2012).

Se a trinca se move à frente por uma pequena quantidade enquanto o deslocamento é mantido constante, Figura 2.5(b), a rigidez do elemento diminui. Isso resulta na diminuição da energia potencial em uma quantidade  $dU$  isto é,  $U$  diminui devido a uma liberação dessa quantidade de energia. A taxa de mudança de energia potencial com aumento na área de trinca é definida como a taxa de liberação de energia de deformação:

$$G = - \frac{1}{t} \frac{dU}{da} . \quad (9)$$

Percebe-se que  $G$  tem valor positivo e caracteriza a energia por unidade de área de trincas necessária para estender a trinca e, como tal, correspondendo à grandeza física fundamental que controla o comportamento da trinca. No conceito original de Griffith, toda a energia potencial liberada foi pensada para ser usada na criação da nova superfície livre nas faces da trinca. Isto é aproximadamente verdade para materiais que trincam com essencialmente nenhuma deformação plástica. No entanto, em materiais dúcteis, a maior parte da energia pode ser usada para deformar o material na zona plástica na ponta da trinca. Ao aplicar  $G$  aos metais na década de 1950, G. R. Irwin mostrou que o conceito era aplicável mesmo sob essas circunstâncias, se a zona plástica fosse pequena.

As quantidades  $G$  e  $K$  podem ser relacionadas como se segue:

$$G = \frac{K^2}{E'} , \quad (10)$$

onde  $E'$  é obtido do módulo de elasticidade do material  $E$ , e seu coeficiente de Poisson para as duas situações:

$$E' = E \quad (\text{plano de tensões; } \sigma_z = 0); \quad (11)$$

$$E' = \frac{E}{1 - \nu^2} \quad (\text{plano de deformação; } \varepsilon_z = 0).$$

Onde trincas podem estar presentes, fatores de segurança precisam ser avaliados. Como a tensão  $\sigma$  e  $K$  são proporcionais de acordo com a Equação (8), um fator de segurança  $X$  pode ser considerado aplicando o mesmo fator a  $K$ . Portanto, se  $\sigma$  e  $a$  são respectivamente, a tensão e o comprimento da trinca esperados ocorrer em serviço real, o fator de segurança em  $K$ , e assim em  $\sigma$ , é definido por:

$$X_k = \frac{K_{IC}}{K} = \frac{K_{IC}}{F\sigma\sqrt{\pi a}}. \quad (12)$$

Também é importante comparar o comprimento de trinca  $a$  com o comprimento de trinca  $a_c$  que se espera que cause falha na tensão de serviço  $\sigma$ , relacionadas pela expressão:

$$K_{IC} = F_c\sigma\sqrt{\pi a_c}, \quad (13)$$

onde  $F_c$  é avaliado em  $a_c$ . A combinação das duas equações anteriores leva ao seguinte fator de segurança no comprimento da trinca:

$$X_a = \frac{a_c}{a} = \left(\frac{F}{F_c} X_k\right)^2. \quad (14)$$

Como o  $X_k$  tem potência quadrada, os fatores de segurança no comprimento das trincas devem ser grandes o suficiente para atingir fatores de segurança razoáveis em  $K$  e tensão.

### 2.3.5 Método tensão-vida

Algumas aplicações práticas e também muitos testes de fadiga em materiais envolvem ciclos entre os níveis mínimo e máximo de tensão que são constantes, denominados *amplitude de tensão constante*, como é ilustrado na Figura 2.6.

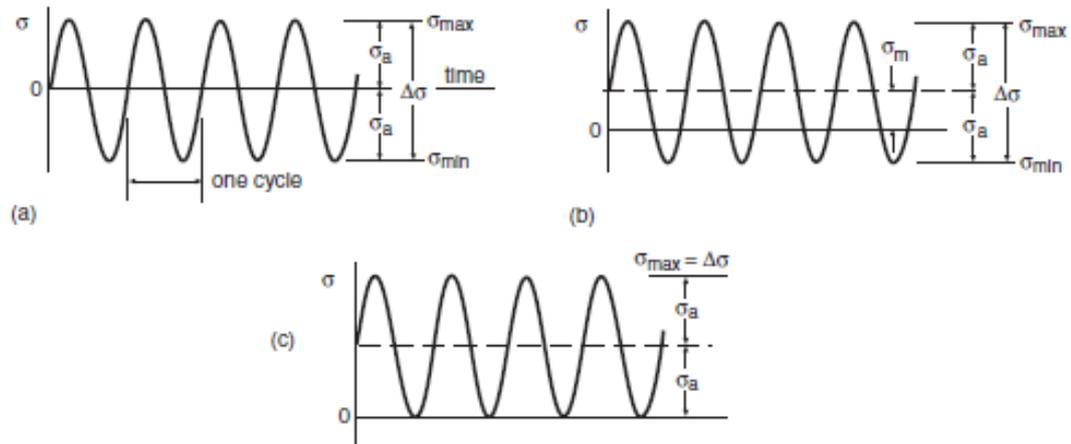


Figura 2.6 - Amplitude de tensão constante. Fonte: (DOWNLING, 2012).

A faixa de tensão é a diferença entre os valores máximo e mínimo. Fazendo uma média entre os valores máximo e mínimo, define-se a tensão média  $\sigma_m$  que pode ser nula, como apresentado pela Figura 2.6(a), mas muitas vezes não é, como em (b). Metade do intervalo é denominado amplitude de tensão  $\sigma_a$  correspondente à variação da média. As expressões correspondentes são:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_a}{2} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}, \quad (15)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}, \quad (16)$$

$$\sigma_{max} = \sigma_m + \sigma_a, \quad (17)$$

$$\sigma_{min} = \sigma_m - \sigma_a. \quad (18)$$

As grandezas  $\sigma_{max}$ ,  $\sigma_{min}$  e  $\sigma_m$  podem ser positivas ou negativas. As seguintes proporções de duas dessas variáveis podem ser usadas:

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = \frac{K_{min}}{K_{max}}, \quad (19)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max}}{2} (1 + R), \quad (21)$$

$$R = \frac{1-A}{1+A}, \quad (22)$$

$$A = \frac{1-R}{1+R}. \quad (23)$$

O termo *ciclo completamente invertido* é usado para descrever uma situação de  $\sigma_m = 0$  ou  $R = -1$ , como mostra a Figura 2.6(a). Além disso, o *ciclo de zero tensão* se refere a casos de  $\sigma_{min} = 0$ , ou  $R = 0$ , como na Figura 2.6(c).

Se uma amostra de teste de um material ou componente de engenharia for submetida a uma tensão cíclica suficientemente severa, uma trinca por fadiga ou outro dano se desenvolverá, levando à completa falha do membro. Se o teste for repetido em um nível de tensão mais alto, o número de ciclos até a falha será menor.

Os resultados de tais testes de vários níveis diferentes de tensão podem ser plotados para se obter uma curva de tensão-vida, também denominada curva *S-N*. A amplitude de tensão ou tensão nominal  $\sigma_a$  ou  $s_a$ , é geralmente representada em função do número de ciclos até a falha  $N_f$ , como apresentado nas Figura 2.7 e Figura 2.8.

O número de ciclos até a falha altera rapidamente com o nível de tensão e pode variar em várias ordens de grandeza. Por esse motivo, os números dos ciclos são geralmente plotados em uma escala logarítmica.

A dificuldade com um gráfico linear é ilustrada na Figura 2.7, onde os mesmos dados *S-N* são plotados nas escalas linear e logarítmica de  $N_f$ . Na plotagem linear, os números dos ciclos das vidas mais curtas não podem ser lidos com precisão.

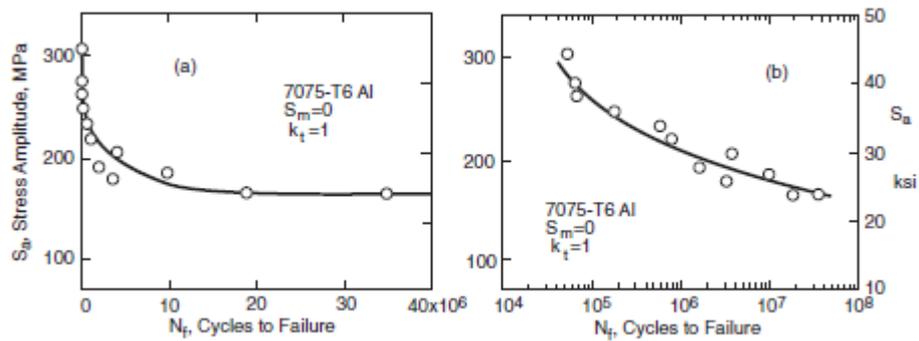


Figura 2.7 - Curvas S-N para uma liga de alumínio. O número de ciclos é plotado em escala linear no gráfico da esquerda e em escala logarítmica no gráfico da direita. Fonte: (ANDERSON, 2005).

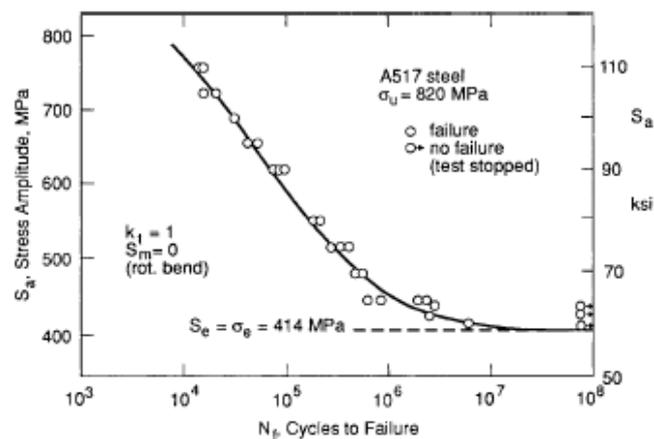


Figura 2.8 - Curva S-N para um aço A517. Fonte: (ANDERSON, 2005).

Se os dados S-N se aproximarem de uma linha reta em um gráfico do tipo log-linear, a seguinte equação pode ser ajustada para se obter uma representação matemática da curva:

$$\sigma_a = C + D \log N_f, \quad (24)$$

onde  $C$  e  $D$  são constantes. A equação para a parte linear do gráfico em log-log é:

$$\sigma_a = AN_f^B. \quad (25)$$

Também pode ser utilizada uma redação diferente da Equação (25):

$$\sigma_a = \sigma_f' (2N_f)^b, \quad (26)$$

Onde

$$A = 2^b \sigma_f', \quad B = b. \quad (27)$$

Ressalta-se que as constantes referentes às Equações (25) e (26) são dadas na Tabela 2.1 para vários metais utilizados em projetos de engenharia.

Tabela 2.1 - Constantes da curva S-N para vários materiais de engenharia. Fonte: (DOWNLING, 2012).

Material	Yield strength $\sigma_0$ MPa (ksi)	Ultimate Strength $\sigma_a$ MPa (ksi)	True Fracture Strength $\sigma_{fB}$ MPa (ksi)	$\sigma_a = \sigma_f' (2N_f)^b = A(N_f)^b$		
				$\sigma_f'$ MPa (ksi)	A MPa (ksi)	b = B
Steels SAE 1015 (normalized)	224 (33)	415 (60.2)	726 (105)	1020 (148)	927 (134)	-0.138
Man-Ten (rot rolled)	322 (46.7)	557 (80.8)	990 (144)	1089 (158)	1006 (146)	-0.115
SAE 4142 (Q & T, 450HB)	1584 (230)	1757 (255)	1998 (290)	1937 (281)	1837 (266)	-0.0762
AISI 4340 (aircraft quality)	1103 (160)	1172 (170)	1634 (237)	1758 (255)	1643 (238)	-0.0977
Ti-6Al-4V (solution treated and aged)	1185 (172)	1233 (179)	1717 (249)	2030 (295)	1889 (274)	-0.104

Onde a curva S-N se torna uma reta horizontal, pode-se dizer que o material tem vida infinita por fadiga, onde independentemente do número de ciclos aplicado, a uma certa tensão o material não vai romper por fadiga. Segundo Busdynas e Nisbett (2011), esse fenômeno é percebido principalmente para os aços e não é presente para alguns materiais, como algumas ligas de alumínio, então, esse conceito de vida infinita é reportada a um número específico de ciclos, normalmente  $5 \cdot 10^8$ .

As curvas S-N variam amplamente para diferentes classes de materiais, e são afetadas por uma variedade de fatores. Qualquer processamento que altere as propriedades mecânicas estáticas ou a microestrutura provavelmente também afetará a curva S-N.

O teste de materiais para se fazer o traçado das curvas S-N é uma prática generalizada. Vários padrões ASTM abordam o teste de fadiga baseado em tensão para metais. Os dados e curvas resultantes estão amplamente disponíveis na literatura publicada, incluindo vários manuais. Uma compreensão da base desses testes é útil para empregar efetivamente seus resultados para fins de engenharia, notadamente quando se compõem materiais novos, como os compósitos para fins estruturais

### Fatores modificadores das curvas S-N

Os ensaios são realizados em laboratório em condições controladas de temperatura, umidade e pressão e, na prática ao se utilizarem corpos submetidos a outras condições de operação, devido à natureza da fadiga, é de se esperar que não se tenham resultados iguais de limite de resistência à fadiga. Logo, existe a expressão de Marin para corrigir esse valor nas curvas S-N por meio de fatores modificadores, que são coeficientes aplicados diretamente ao valor extraído da curva:

$$S_e = K_a K_b K_c K_d K_e K_f S'_e, \quad (28)$$

onde:

$k_a$  - Fator de superfície: depende do tipo de acabamento superficial ao qual a peça foi submetida. Os fatores para estimativa desse parâmetro são obtidos em tabelas da literatura;

$k_b$  - Fator de tamanho: usado para corrigir as dimensões da estrutura utilizada. Possui valores tabelados em função de um diâmetro equivalente;

$k_c$  - Fator de carregamento: é diferente para cada tipo de carregamento. Os valores típicos são 1 para flexão, 0,85 para esforço axial e 0,59 para torção;

$k_d$  - Fator de temperatura: utilizado para correção da diferença de temperatura entre o ensaio e a aplicação real da peça. Para temperaturas de até 450°C o fator vale 1, e para temperaturas entre 450°C e 550°C é definido por  $1 - 0,0058(T - 450)$ ;

$k_e$  - Fator de confiabilidade: esse fator está associado com a confiança no limite de resistência à fadiga do material. Os valores são tabelados, por exemplo, para 50% de confiança seu valor é 1 e para 90% passa a ser 0,897;

$k_f$  - Fator de efeitos diversos: leva em consideração efeitos não considerados nos demais fatores para redução ou aumento da resistência à fadiga do material.

### 3.2.5 Método da mecânica da fratura

Como visto anteriormente, a presença de uma trinca em um componente estrutural pode diminuir sua resistência. Porém, na maioria dos casos, é incomum que uma trinca de um tamanho considerável possa ocorrer repentinamente. Normalmente, uma pequena falha que estava inicialmente presente se desenvolve em uma trinca e depois cresce até atingir o tamanho crítico para uma fratura frágil.

Segundo Dowling (2012), a análise e predição da propagação de trincas assume maior importância em componentes estruturais grandes, especialmente onde a segurança é um fator importante, como em aeronaves e plantas nucleares. Inspeções cuidadosas nessa classe de componentes geralmente revelam trincas, o que justifica a utilização da mecânica da fratura, já que ela prediz o crescimento da trinca em relação a intensidade de tensão.

A trinca cresce de um valor  $a$  até atingir um comprimento crítico  $a_c$ , onde a fratura frágil ocorre após ciclos de carregamento de  $N_{if}$ . Se o número esperado de ciclos no serviço real for  $\hat{N}$ , então o fator de segurança na vida útil é:

$$X_N = \frac{N_{if}}{\hat{N}}. \quad (29)$$

Esse fator de segurança é necessário porque existem incertezas quanto à definição da tensão real que ocorrerá em serviço; assim, o valor de  $a$  e as taxas de crescimento de trinca no material podem ser obtidos com segurança.

O fator de segurança de tensão contra fratura frágil repentina devido à carga cíclica aplicada é:

$$X_C = \frac{\sigma_c}{\sigma_{max}}. \quad (30)$$

Tal fator de segurança é geralmente necessário em adição ao  $X_N$  devido à possibilidade de se atingir em serviço um valor elevado inesperado de carga que exceda a carga cíclica normal. Dentro da vida útil real esperada,  $X_C$  diminui e tem seu valor mínimo no final desta vida útil.

Ocasionalmente a combinação de comprimento mínimo de trinca detectável  $a$  e a tensão cíclica é tal que a margem de segurança, expressa por  $X_N$  e  $X_C$ , é insuficiente, podendo ocorrer falhas imprevisíveis antes de se atingir a vida útil. Inspeções periódicas de trincas são então necessárias, após as quais, quaisquer trincas excedendo o valor de  $a$  devam ser reparadas,

ou a peça deverá ser substituída. Isso garante que, após cada inspeção, não haja trincas que superem o parâmetro  $a$ .

Assumindo que as inspeções sejam feitas em intervalos de ciclos de  $N_p$ , o comprimento da trinca do pior caso aumenta devido ao crescimento entre as inspeções, variando conforme ilustrado na Figura 2.9. O fator de segurança na vida útil é, então, determinado pelo período de inspeção:

$$X_N = \frac{N_{if}}{N_p}. \quad (31)$$

Após cada inspeção, a tensão do pior caso aumenta temporariamente, conforme apresentado pela Figura 2.9 - Variação do comprimento de trinca e tensão em relação ao número de ciclos em que inspeções são necessárias. Fonte: (DOWNLING, 2012) Figura 2.. O fator de segurança de tensão é menor antes de cada inspeção.

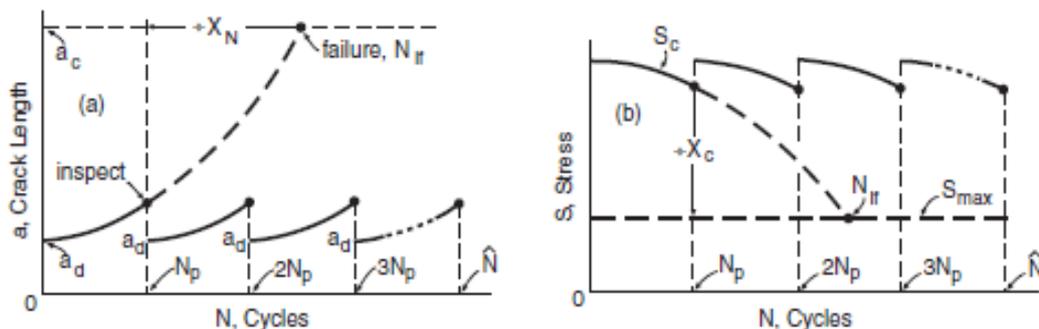


Figura 2.9 - Variação do comprimento de trinca e tensão em relação ao número de ciclos em que inspeções são necessárias. Fonte: (DOWNLING, 2012).

Onde inspeções periódicas são necessárias, a análise mecânica da fratura permite que um intervalo de inspeção seguro seja definido. Por exemplo, para grandes aeronaves militares e civis, as trincas são tão comumente encontradas durante as inspeções periódicas, e sua operação segura e a manutenção econômica são criticamente dependentes da análise mecânica da fratura.

O comportamento de um determinado material com respeito à propagação de trincas pode ser descrito pela relação entre a taxa de crescimento devida ao carregamento cíclico e o fator de intensidade de tensão (curva  $da/dN$  versus  $\Delta K$ ).

A Figura 2. é um gráfico de log-log esquemático da curva  $da/dN$  versus  $\Delta K$ , que ilustra o comportamento típico de crescimento de trincas por fadiga em metais. A curva contém três regiões distintas. Nos valores  $\Delta K$  intermediários, a curva é linear, mas a taxa de crescimento

de trinca se desvia da tendência linear em níveis altos e baixos de  $\Delta K$ . Na extremidade inferior,  $da/dN$  se aproxima de zero em um limiar  $\Delta K$ , abaixo do qual a trinca não crescerá. Em alguns materiais, a taxa de crescimento observada aumenta rapidamente com altos valores de  $\Delta K$ . Existem duas explicações possíveis para o comportamento da Região III. Alguns pesquisadores levantaram a hipótese de que a taxa de crescimento de trinca acelera quando  $K_{max}$  se aproxima de  $K_c$ , correspondente à resistência à fratura do material. Sob altos valores de  $K_{max}$ , a mecânica linear de fratura elástica não é mais válida, e outros parâmetros são mais apropriados para caracterizar a fadiga.

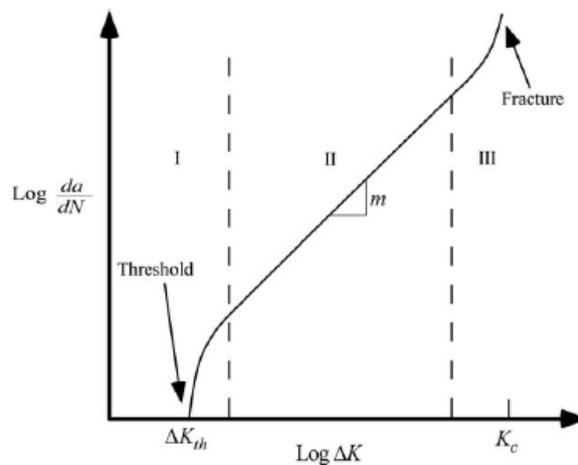


Figura 2.10 - Comportamento típico de crescimento de trincas por fadiga em metais. Fonte: (ANDERSON, 2005).

Para valores intermediários de  $\Delta K$ , normalmente há uma linha reta no gráfico log-log, e uma relação que representa esta linha é:

$$\frac{dA}{dN} = C(\Delta K)^m. \quad (32)$$

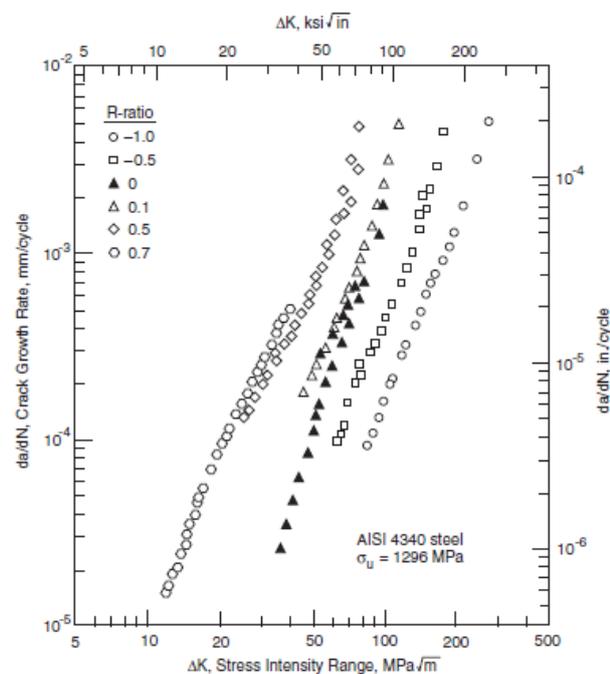
As constantes  $C$  e  $m$  para a região intermediária onde a Equação (32) aplica foram sugeridas por Barsom (1999) para várias classes de aço. Estes se aplicam para  $R \approx 0$  e são apresentados na Tabela 2.2.

O valor de  $m$  é importante, pois indica o grau de sensibilidade da taxa de crescimento a tensão. Por exemplo, se  $m = 3$ , ao se dobrar a faixa de tensão  $\Delta\sigma$  duplica-se a faixa de intensidade de tensão  $\Delta K$ , aumentando-se assim a taxa de crescimento por um fator de  $2^m = 8$ .

Tabela 2.2 - Constantes de Barsom (1999) para curva  $da/dN$  versus  $\Delta K$ . Fonte: (DOWLING, 2012).

	<i>Constants for <math>da/dN = C(\Delta K)^m</math></i>	
	$C, \frac{mm/cycle}{(MPa\sqrt{m})^m}$	m
<i>Classes of Steel</i>	$6,89 \times 10^{-9}$	3,0
<i>Ferritic-pearlitic</i>	$1,36 \times 10^{-9}$	2,25
<i>Austenitic</i>	$5,61 \times 10^{-9}$	3,25

O valor da razão de tensão  $R$  afeta a taxa de crescimento de trincas. Para um dado  $K$ , o aumento de  $R$  aumenta a taxa de crescimento e vice-versa. Alguns dados ilustrando este efeito para um aço são apresentados na Figura 2..

Figura 2.11 - Efeito do valor da razão de tensão  $R$ . Fonte: (DOWLING, 2012).

O caminho lógico envolvido na avaliação do comportamento do crescimento de trinca de um material e o uso da informação é resumido na Figura 2.. Primeiramente, uma geometria de amostra de teste é submetida a testes em cada um dos vários níveis de carga diferentes, de modo que uma ampla gama de taxas de crescimento de trinca por fadiga é obtida.

As taxas de crescimento de trinca são avaliadas e plotadas em comparação com valores de  $\Delta K$  para obter a curva de  $da/dN$  versus  $\Delta K$ . Essa curva pode ser usada posteriormente em uma aplicação de engenharia, com valores de  $\Delta K$  sendo calculados conforme apropriado

para a geometria específica de interesse. Comprimento de trinca *versus* ciclos para um comprimento de trinca inicial específico pode então ser previsto para o componente, levando a estimativas de vida e à determinação de fatores de segurança e intervalos necessário às inspeções periódicas.

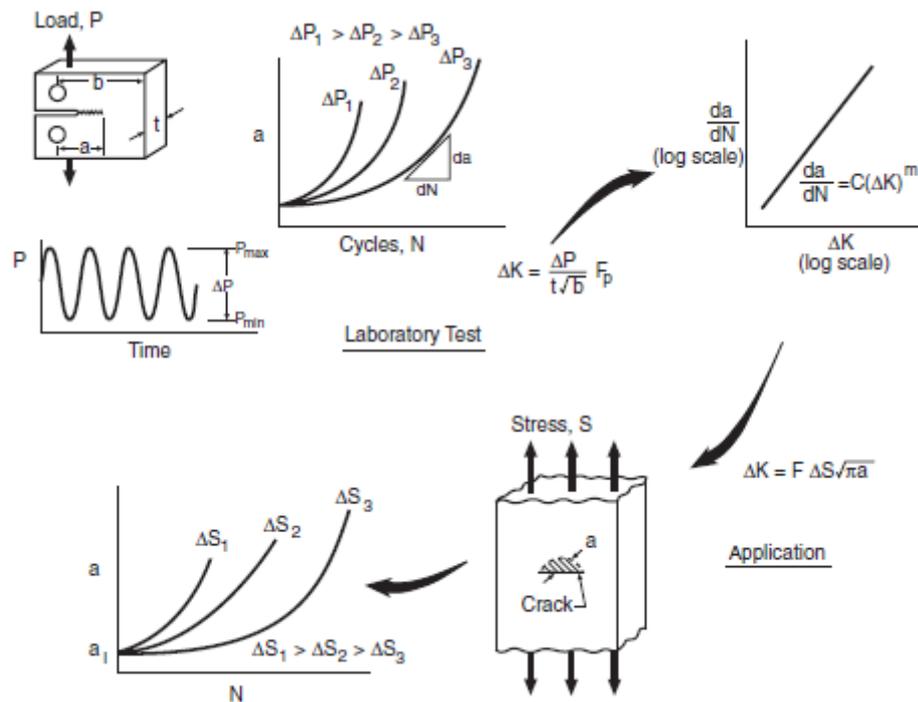


Figura 2.12 - Passos para obtenção da curva  $da/dN$  versus  $\Delta K$ . Fonte: (DOWLING, 2012).

Para medir os comprimentos de trinca, uma abordagem é simplesmente realizada por observação visual, através de um microscópio de baixa potência (20 a 50X), quando a trinca alcança vários comprimentos previamente marcados em uma amostra.

Outros meios podem ser usados para medir comprimentos de trinca. Por exemplo, na medida em que a trinca cresce, a deflexão da amostra aumenta, resultando em diminuição da rigidez. Esta mudança de rigidez pode ser medida e usada para calcular o comprimento da trinca.

Outra abordagem é passar uma corrente elétrica através da amostra e medir mudanças no campo de tensão devido ao crescimento da trinca, a partir do qual podemos obter o seu comprimento.

Para obter taxas de crescimento a partir dos dados de comprimento de trinca *versus* ciclos, uma abordagem simples e geralmente adequada é calcular os declives em linha reta entre os pontos de dados, como ilustra a Figura 2.13.

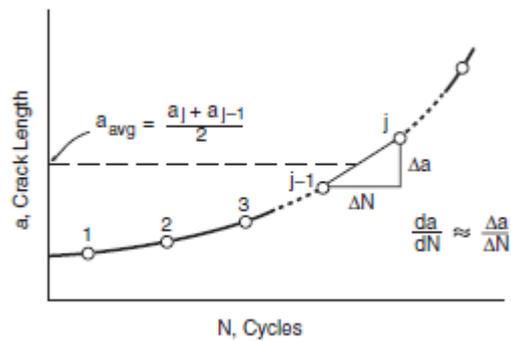


Figura 2.13 - Comprimento de trinca em função do número de ciclos. Fonte: (ANDERSON, 2005).

Se os pontos de dados são numerados com  $1, 2, 3, \dots, j$ , então a taxa de crescimento para o segmento terminando no ponto de número  $j$  é:

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_j = \left(\frac{\Delta a}{\Delta N}\right)_j = \frac{a_j - a_{j-1}}{N_j - N_{j-1}} \quad (33)$$

O  $\Delta K$  correspondente é calculado a partir do comprimento médio da fenda durante o intervalo com a seguinte equação:

$$\Delta K_j = F\sigma\sqrt{\pi a_{med}}, \quad (34)$$

onde

$$a_{med} = \frac{a_j + a_{j-1}}{2}. \quad (35)$$

Esse procedimento é válido somente se o comprimento da trinca for medido em intervalos razoavelmente curtos. Caso contrário, a taxa de crescimento e  $K$  podem diferir muito entre observações adjacentes. Além disso, os métodos de ajuste de curva de avaliação de  $da/dN$ , que são mais sofisticados do que simples declives ponto a ponto, às vezes são usados para suavizar a dispersão nos dados  $a$  versus  $N$ .

Os testes de crescimento de trincas são mais comumente conduzidos sob *carga de zero tensão*,  $R = 0$ , ou com um pequeno valor de  $R$ , como  $R = 0,1$ . Variações de  $R$  na faixa de 0 a 0,2 têm pouco efeito na maioria dos materiais, e testes nessa faixa são aceitos convencionalmente como a base padrão para comparar os efeitos de vários materiais.

Geralmente, é necessário testar vários corpos de prova em diferentes níveis de carga para se obterem dados em uma ampla faixa de taxas de crescimento.

Uma ampla gama de variáveis pode afetar as taxas de crescimento de trincas por fadiga de um dado material, de modo que as condições de teste possam ser selecionadas para incluir situações que se assemelham ao uso de serviço antecipado do material. Algumas dessas variáveis são temperatura, frequência da carga cíclica e ambientes químicos hostis. Pequenas variações no processamento ou composição de materiais podem afetar as taxas de crescimento de trincas por fadiga devido às diferentes microestruturas resultantes. Portanto, testes em diferentes variações de um material podem ser realizados para auxiliar na análise de materiais que possam resistir melhor ao crescimento de trincas por fadiga.

## CAPÍTULO III

### ROTEIROS

A partir da investigação bibliográfica realizada, foram elaborados três roteiros didático-instrucionais destinados ao ensino-aprendizagem de parte deste conteúdo para utilização em aulas práticas de Fadiga e Mecânica da Fratura, primordialmente destinadas aos alunos do curso de Graduação de Engenharia Aeronáutica da UFU.

Além dos roteiros, a autora deste Projeto de Conclusão de Curso investigou o que se tem disponível a domínio público pela internet sobre testes tanto de Fadiga como em Mecânica da Fratura. Portanto para ilustrar e enriquecer cada roteiro trabalhado, dando visibilidade prática real aos discentes, esta aluna, incorpora os links de acesso a cada vídeo em cada roteiro.



## DISCIPLINA: FADIGA E MECÂNICA DA FRATURA (FEMEC43084)

### FLEXÃO EM TRÊS PONTOS

#### 1 - Objetivo

A realização dessa prática visa determinar experimentalmente o Fator de Intensidade de Tensão ( $K_{Ic}$ ) de materiais metálicos através do teste de flexão em três pontos, utilizando corpos de prova pré-trincados.

#### 2 - Equipamentos necessários

Sistema para ensaio de fadiga MTS® 647 Hydraulic Wedge Grips com dispositivo para ensaio de flexão em três pontos e medidor de deslocamento (*clip gage*). Registra-se que estes equipamentos estão disponíveis no LMEst (Laboratório de Mecânica de Estruturas "Prof. José Eduardo Tannús Reis", da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, FEMEC-UFU).

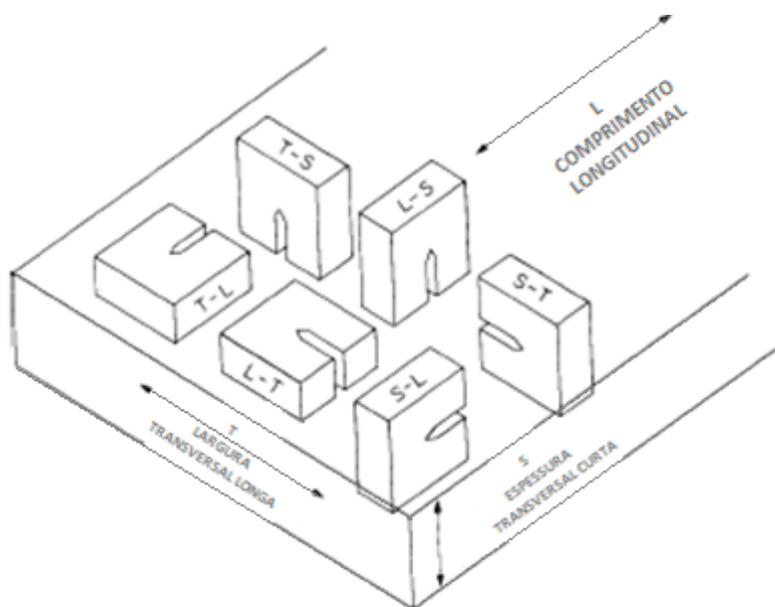
#### 3 - Resumo teórico

Segundo Downing (2012), a propagação de trincas pode ocorrer em decorrência de carregamentos cíclicos e as tensões cíclicas resultantes podem levar a danos físicos microscópicos aos materiais constituintes dos elementos estruturais solicitados. Este processo de dano e falha devido ao carregamento cíclico é denominado fadiga. Mesmo com tensões muito abaixo das tensões máximas de resistência de um determinado material, esse dano microscópico pode se acumular com o ciclo contínuo até que se evolua a uma trinca ou outro dano macroscópico que leve à falha do componente estrutural.

A tenacidade à fratura de um material geralmente depende da orientação e direção de propagação da trinca em relação à anisotropia deste material. E, portanto, a forma do produto deve ser identificada (por exemplo, placa laminada, chapa laminada, forjamento etc.) assim como a identificação do plano e direção de uma trinca, que é definida em relação à geometria do produto. Essa identificação é designada por um código hifenizado com a primeira letra representando a direção normal ao plano de trinca e a segunda letra designando a direção esperada para a propagação da trinca (ASTM E399, 2017).

Para seções retangulares, as direções de referência são identificadas como ilustra a Figura 3.1, onde:

- L: direção longitudinal;
- T: direção transversal;
- S: terceira direção ortogonal.



**Figura 3.1** – Orientação do plano e direção de uma trinca para seções retangulares. Fonte: adaptada de ASTM E399.

Um procedimento utilizado para avaliar a gravidade de uma situação de trinca, afetada pelo seu tamanho, pela tensão normal e geometria, respectivas, é realizado pela obtenção do Fator de Intensidade de Tensão,  $K_I$ , que avalia a magnitude do campo de tensão que um material pode suportar. Sua definição em um sentido matemático formal é uma função do comprimento da trinca  $a$  e da tensão aplicada  $\sigma$ :

$$K_I = f(\sigma, a) . \quad (1)$$

Segundo Downing (2012), um determinado material pode resistir a uma trinca sem que ocorra fratura frágil, desde que este  $K_I$  esteja abaixo de um valor crítico  $K_{Ic}$  denominado Tenacidade à Fratura que corresponde ao máximo valor de intensidade de tensão que causaria falha do material ou o máximo comprimento de uma trinca produzida sob determinada tensão.

A determinação experimental da tenacidade à fratura  $K_{Ic}$  deve seguir algumas condições estabelecidas pela norma ASTM E399 para se obterem uma espessura mínima do corpo de prova e um comprimento mínimo da trinca, dados pela Equação (2):

$$B, a \geq 2,5 \left( \frac{K_{Ic}}{\sigma_e} \right)^2, \quad (2)$$

sendo a espessura  $B$  e o comprimento da trinca  $a$  em mm, a tenacidade à fratura  $K_{Ic}$  em  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  e o limite de escoamento ( $\sigma_e$ ) do material constituinte do corpo de prova, em MPa.

Para assegurar que o valor de  $K_{Ic}$  determinado em um ensaio seja válido, é preciso, primeiramente, calcular um resultado condicional  $K_Q$  e, em seguida, verificar se esse resultado tem relação com a largura do corpo de prova e o comprimento da trinca, que para o ensaio de flexão em três pontos seja dada pela Equação (2). Se esta relação for válida, traça-se uma reta secante na origem da curva obtida pelo ensaio, defasada 5% de inclinação com o trecho linear-elástico da curva obtida a partir do ensaio, conforme esquematizado na Figura 3.2. A carga  $P_Q$  é, então, válida se a carga presente em todos os pontos da curva que precede  $P_5$  for menor que  $P_5$ . Nesta ocasião,  $P_Q$  é igual a  $P_5$  (Tipo I). Porém, se houver uma carga maior que preceda  $P_5$ , então a carga máxima é  $P_Q$  (Tipos II e III).

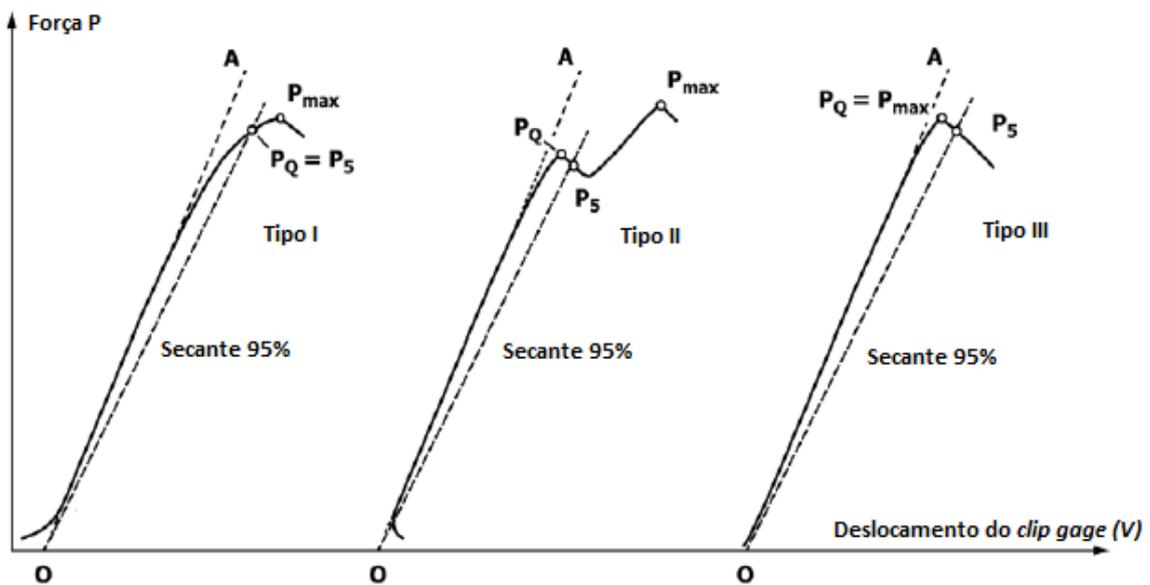


Figura 3.2 – Principais tipos de forças e deslocamentos. Fonte: adaptada de ASTM E399.

A carga, então, definida será usada para determinar  $K_{Ic}$  em espécimes de flexão em três pontos, com auxílio da expressão apresentada pela Equação (3):

$$K_Q = \frac{P_Q S}{BW^{\frac{3}{2}}} f(a/w), \quad (3)$$

com as dimensões já enunciadas  $B$  e  $a$ , dadas em cm,  $K_Q$  é a tenacidade à fratura em deformação-plana  $K_{Ic}$ ,  $P_Q$  é a carga determinada (kN),  $S$  é a distância entre os dispositivos (em cm),  $W$  é a altura do espécime (em cm)

A Equação (4) mostra a relação de  $f\left(\frac{a}{w}\right)$  para corpos-de-prova de flexão em três pontos.

$$f(a/W) = \frac{3(a/W)^{1/2}[1,99 - (a/W)(1 - a/W)(2,15 - 3,93a/W + 2,7a^2/W^2)]}{2(1 + 2a/W)(1 - a/W)^{3/2}} \quad (4)$$

Para facilitar os cálculos de  $K_Q$ , os valores de  $f(a/w)$  são fornecidos pela norma E399 para valores específicos de  $a/w$  em espécimes de flexão em três pontos, como apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1- Valores de  $f(a/w)$  para corpos-de-prova de flexão em três pontos.  
Fonte: (ASTM E399).

$a/w$	$f(a/w)$	$a/w$	$f(a/w)$	$a/w$	$f(a/w)$
0,450	2,29	0,485	2,54	0,520	2,84
0,455	2,32	0,490	2,58	0,525	2,89
0,460	2,35	0,495	2,62	0,530	2,94
0,465	2,39	0,500	2,66	0,535	2,99
0,470	2,43	0,505	2,70	0,540	3,04
0,475	2,46	0,510	2,75	0,545	3,09
0,480	2,50	0,515	2,79	0,550	3,14

### 3.1 Características do corpo de prova

Para realizar o teste, conforme prescrito pela ASTM E399 é necessário confeccionar um corpo de prova pré-trincado com entalhe, e as dimensões obedecendo às proporções apresentadas pelas Figura 3.3 e 3.4.

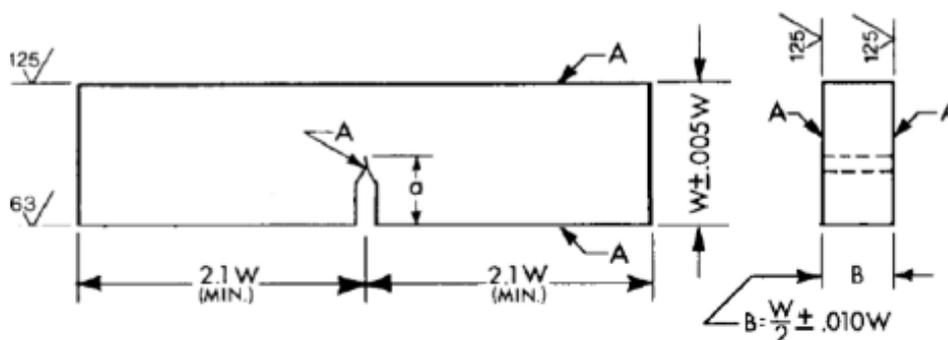
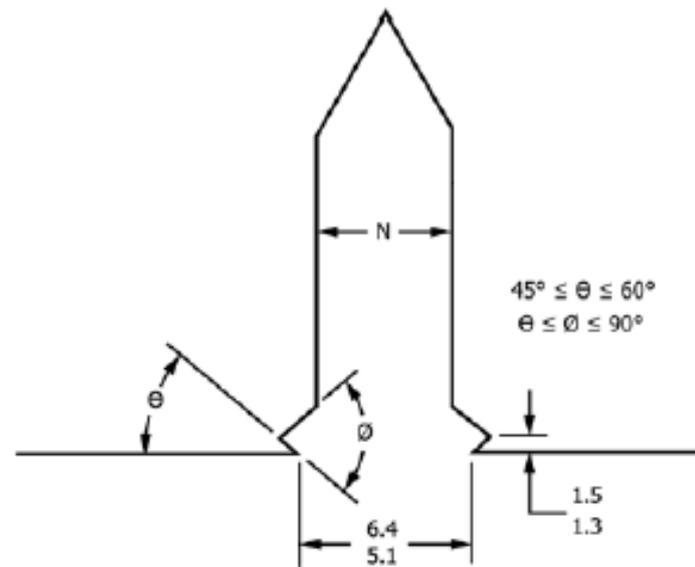


Figura 3.3 - Corpo de prova para flexão em três pontos (*Bend Specimen SE*). Fonte: adaptada de ASTM E399.

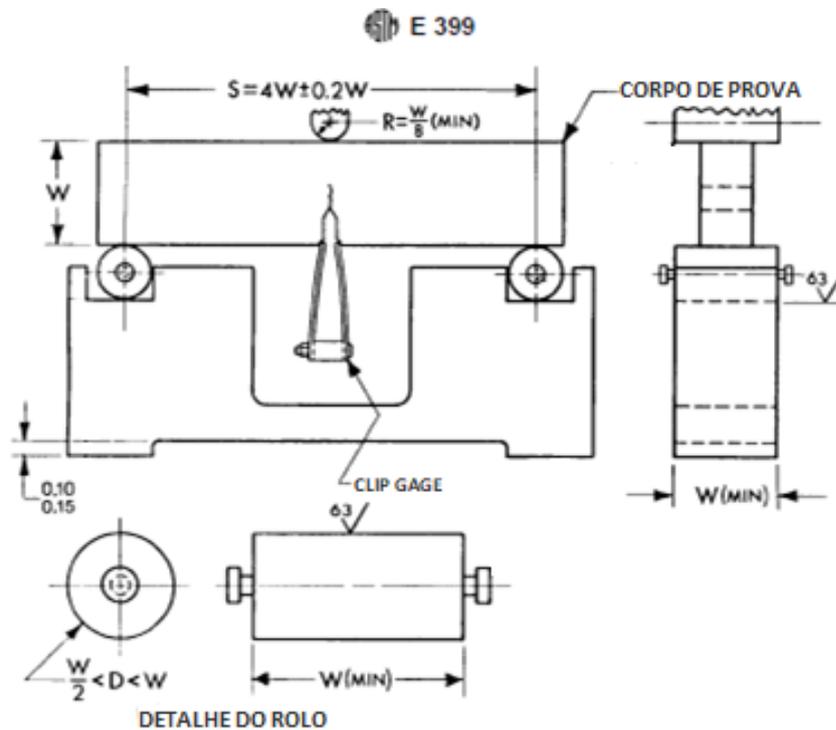


Nota- Dimensões em mm

**Figura 3.4** - Detalhes da pré-trinca. Fonte: adaptada de ASTM E399.

### 3.1 Condições para realização do ensaio

O texto normativo E399 da ASTM apresenta as condições e nomenclaturas para a realização deste teste (Figura 3.5). A amostra é posicionada lateralmente, apoiada em sobre dois rolos, os quais permitem um descolamento longitudinal limitado para o corpo de prova. Uma carga é aplicada ao meio do comprimento do corpo de prova, na face oposta à do entalhe. Um medidor de deslocamento (*clip gage*) é posicionado no entalhe para a medição dos deslocamentos ocorridos nesta abertura.



**Figura 3.5** - Modelo esquemático do suporte do ensaio de flexão em três pontos. Fonte: adaptada de ASTM E399.

#### 4 – Descrição do experimento

É importante que o aluno assista a um ensaio realizado por profissionais responsáveis pela análise tratada nesse roteiro. Assim, sugere-se o seguinte vídeo: <https://www.youtube.com/watch?v=TdYutYMnxDw&t=13s>.

Antes de posicionar o corpo de prova na máquina de ensaios, deve-se obter as medidas de suas dimensões necessárias para calcular o valor de  $K_{IC}$ :

- a espessura do corpo de prova ( $B$ );
- o comprimento da trinca ( $a$ ); e
- a altura do corpo de prova ( $W$ ).

Em seguida, é posicionado o corpo de prova, após conferir a distância entre os apoios, conforme a expressão normatizada (vide Figura 5).

$$S = 4W \pm 0,2W \quad (5)$$

Ao final da montagem, é fixado o clip gage nas bordas da pré-trinca existente.

Procede-se, então, ao carregamento do corpo de prova com uma tensão nominal de  $2 \frac{MPa \cdot \sqrt{m}}{s}$ . A máquina opera com controle de força, então deve-se passar essa taxa em termos de carga por segundo. Continue até que a força aplicada na amostra atinja a força máxima que ela pode suportar. Registre a força máxima.

Após o término do teste, recomenda-se primeiro examinar a superfície de fratura do corpo de prova, para depois proceder a medição do comprimento inicial da trinca ( $a_0$ ) e a eventual propagação estável. A norma ASTM E399 recomenda medir o comprimento da trinca,  $a$ , após a ruptura, na espessura média e nos dois pontos do quarto da espessura. Para calcular  $K_Q$  deve-se usar a média dessas três medições como o comprimento da trinca.

Logo, deve-se fazer os cálculos necessários para encontrar o valor de  $K_{Ic}$ , demonstrados anteriormente, pelas Equações (2) a (4).

## 5 – Anotações

- a espessura do corpo de prova ( $B$ ) \_\_\_\_\_ mm
- o comprimento da trinca ( $a$ ) \_\_\_\_\_ mm
- a altura do corpo de prova ( $W$ ) \_\_\_\_\_ mm

## 6 – Apresentação de dados e cálculos

6.1 Apresente todos os cálculos utilizados para a realização do experimento.

6.2 Encontre o valor da tenacidade à fratura.

## 7 - Conclusões

Estabelecer as principais conclusões relativas à prática realizada e a sua importância para a formação do aluno que se gradua em Engenharia Aeronáutica.

## 8 – Bibliografia

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. E399-17. West Conshohocken, 2017. 34p. Norma técnica.
- ANDERSON, T. L. Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications 3ª.ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2005.
- DOWNLING, N. E. Mechanical Behavior of Materials. 4ª.ed. England: Pearson Education Limited., 2012.
- SHIGLEY, J. E.; MISHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G. Projeto de Engenharia Mecânica. 7ª.ed. São Paulo: Artmed Editora S.A., 2005.



## DISCIPLINA: FADIGA E MECÂNICA DA FRATURA (FEMEC43084)

### FADIGA AXIAL

#### 1 - Objetivos

Esta prática contempla o procedimento para o desempenho de testes de fadiga controlados por força axial para obter a resistência à fadiga de materiais metálicos.

#### 2 - Equipamentos necessários

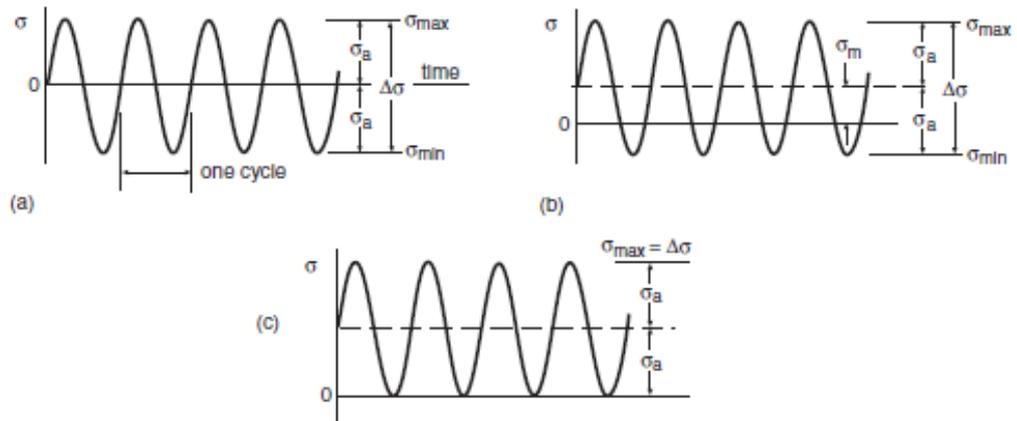
Aparelho para ensaio de fadiga *MTS 647 Hydraulic Wedge Grips*. Registra-se que estes equipamentos estão disponíveis no LMEst (Laboratório de Mecânica de Estruturas "Prof. José Eduardo Tannús Reis", da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, FEMEC-UFU).

#### 3 - Resumo teórico

A maioria das falhas em componentes e equipamentos mecânicos acontece devido a cargas cíclicas ou variáveis e não a cargas estáticas. Essas falhas ocorrem, tipicamente, em níveis de tensão inferiores aos valores da resistência dos materiais. A característica mais distinguível dessas falhas é que os valores de tensões repetem muitas vezes, sendo denominado de falha por fadiga.

##### 3.1 Tensões cíclicas

Algumas aplicações práticas e também muitos testes de fadiga em materiais, envolvem ciclos entre os níveis mínimo e máximo de tensão que são constantes, denominado amplitude de tensão constante, como é ilustrado na Figura 4.1.



**Figura 4.1** - Amplitude de tensão constante. Fonte: (DOWNLING, 2012).

A faixa de tensão é a diferença entre os valores máximo e mínimo. Fazendo uma média entre os valores máximo e mínimo, define-se a tensão média,  $\sigma_m$ , que pode ser nula, como mostra a Figura 1(a) mas muitas vezes não é, como em (b). Metade do intervalo é denominado amplitude de tensão,  $\sigma_a$ , correspondente a variação da média. As expressões correspondentes são:

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{(\sigma_{max} - \sigma_{min})}{2},$$

$$\sigma_m = \frac{(\sigma_{max} + \sigma_{min})}{2},$$

$$\sigma_{max} = \sigma_m + \sigma_a ,$$

$$\sigma_{min} = \sigma_m - \sigma_a .$$

As grandezas  $\sigma_{max}$ ,  $\sigma_{min}$  e  $\sigma_m$  podem ser positivas ou negativas. A seguinte proporção pode ser usada:

$$R = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}}.$$

O termo ciclo completamente invertido é usado para descrever uma situação de  $\sigma_m = 0$  ou  $R = -1$ , como mostra a Figura 4.1(a). Além disso, o ciclo de zero tensão se refere a casos de  $\sigma_{min} = 0$ , ou  $R = 0$ , como na Figura 4.1(c).

Se uma amostra de teste de um material ou componente de engenharia for submetida a uma tensão cíclica suficientemente severa, uma trinca por fadiga ou outro dano se



### 3.3 Significado e uso

O teste de fadiga de força axial é usado para determinar o efeito de variações no material, geometria, condição da superfície, tensão e assim por diante, na resistência à fadiga de materiais metálicos sujeitos a tensão direta para números relativamente grandes de ciclos. Os resultados também podem ser usados como um guia para a seleção de materiais metálicos para serviço sob condições de tensão repetitiva.

Os resultados do teste de fadiga da força axial são adequados para aplicação no projeto somente quando as condições de teste da amostra simularem realisticamente condições de serviço ou se alguma metodologia de contabilidade para condições de serviço estiver disponível e claramente definida.

### 3.4 Características do corpo de prova

Para realizar o teste, conforme descrito em ASTM E466 é necessário um corpo de prova de geometria apresentada pela Figura 4.3.

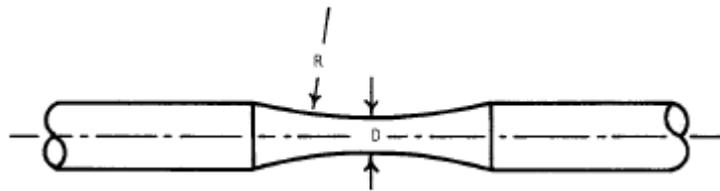


Figura 4.3 - Corpo de prova. Fonte: adaptada de ASTM E466.

### 3.5 Características da máquina de teste

As forças de teste devem ser monitoradas continuamente desde o estágio inicial do teste e, depois, periodicamente, para garantir que o ciclo de força desejado seja mantido. O equipamento utilizado possui contador de ciclos do ensaio, quando ocorre a ruptura do corpo de prova, a contagem de ciclos é interrompida automaticamente e o registro é armazenado

## 4- Procedimento experimental

É importante que o aluno assista a um ensaio realizado por profissionais responsáveis pela análise tratada nesse roteiro. Assim, sugere-se o seguinte vídeo: [https://www.youtube.com/watch?v=LhUclxBUV\\_E](https://www.youtube.com/watch?v=LhUclxBUV_E).

O material utilizado é o aço SAE 1020. Antes de inserir os corpos de prova na máquina de teste, deve-se medir suas dimensões. Insere o mesmo na máquina, com uma pressão de 2000psi. Logo depois, configure na máquina na frequência de excitação de 15 Hz e na tensão

de 11000N, e  $R = -1$ . Os outros níveis de tensão foram obtidos através de ensaios anteriores por questões de duração do teste e serão disponíveis pelo professor.

Basta ligar a máquina até que o critério de falha da amostra seja atingido ou até que um número predeterminado de ciclos tenha sido aplicado à amostra.

O uso dessa prática está limitada para metais testados em temperatura ambiente, portanto o ambiente influencia nos resultados dos testes logo, deve-se reportar as condições de temperatura e umidade.

## 5 – Anotações

- Tensão aplicada:
- Número de ciclos:

Aço 1045			
Diâmetro 1 <i>meio do CP</i> (mm)	Diâmetro 2 <i>extremo do CP</i> (mm)	Comprimento Total (mm)	Comprimento da área reduzida (mm)

## 6 – Apresentação de dados e cálculos

6.1 Esboce a curva S x N experimental.

6.2 O ensaio correspondeu às expectativas teóricas? Por quê?

6.3 O que é fadiga de alto ciclo?

6.4 Avaliar o aspecto da fratura de cada um dos materiais testados. Qual a particularidade de uma fratura por fadiga?

## 7 - Conclusões

Estabelecer as principais conclusões relativas à prática realizada e a sua importância para a formação do aluno que se gradua em Engenharia Aeronáutica.

## 8 – Bibliografia

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. E466. West Conshohocken, 2017. 6p. Norma técnica.
- ANDERSON, T. L. Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications 3<sup>a</sup>.ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2005.

- DOWNLING, N. E. Mechanical Behavior of Materials. 4<sup>a</sup>.ed. England: Pearson Education Limited., 2012
- SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G. Projeto de Engenharia Mecânica.7<sup>a</sup>.ed. São Paulo: Artmed Editora S.A., 2005.



**DISCIPLINA: FADIGA E MECÂNICA DA FRATURA**  
**(FEMEC43084)**

**ENSAIO DE FADIGA (FLEXÃO ROTATIVA)**

**1 - Objetivos**

Verificar o procedimento prático para a obtenção de propriedades mecânicas de dois materiais diferentes, através do ensaio de fadiga.

**2 - Equipamentos necessários**

Máquina de ensaio de flexão rotativa, corpos de prova, paquímetro e chaves de fixação.

**3 - Resumo teórico**

Fadiga é um processo de falha de um material sujeito à tensões flutuantes ou variáveis. Por exemplo, um elemento sobre a superfície de um eixo rotativo, sujeito a ação de cargas de flexão, fica submetido à tração e compressão alternadamente, em cada rotação do eixo. Estas e outras espécies de cargas que ocorrem em peças de máquinas produzem tensões chamadas repetidas, alternadas ou flutuantes que são decisivas num processo de falha por fadiga.

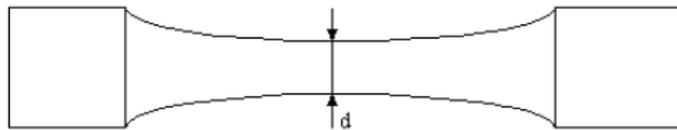
**3.1 Processos de falha por fadiga**

Uma falha por fadiga começa com uma pequena trinca. A trinca aparecerá em um ponto de descontinuidade do material, o efeito de concentração de tensões torna-se maior e a trinca progride mais depressa. A proporção que a área tensionada diminui de tamanho, devido ao aumento da trinca, a tensão aumenta de intensidade até, finalmente, a peça partir-se subitamente.

Portanto uma falha por fadiga caracteriza-se por duas áreas distintas de fratura. A primeira é devida ao desenvolvimento progressivo da trinca, enquanto a segunda deve-se à fratura súbita, semelhante a falha por tração de um material frágil como o ferro fundido.

**3.2 Características do corpo de prova**

Em experimentos que visam um estudo experimental do processo de falha por fadiga geralmente são usados corpos de prova com secção circular (utilizado neste experimento, vide Figura 5.1). Além disso, a região que sofrerá a ação das tensões deve ser polida na direção axial já que o corpo de prova ficará submetido a uma flexão alternada pura.

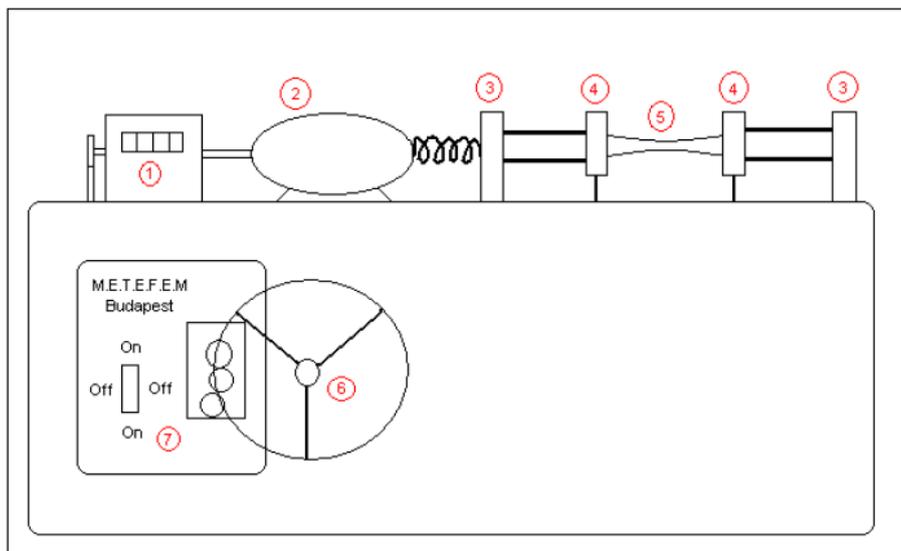


**Figura 5.1** - Aspecto do corpo de prova.

### 3.3 Princípio da máquina de testes

A máquina utilizada no teste (figura 5.2) submete o corpo de prova a uma flexão rotativa pura (sem cisalhamento) por meio de pesos. Um motor elétrico faz girar o corpo de prova preso por rolamentos em dois mancais de apoios. Outros dois mancais suportam o carregamento imposto ao corpo de prova.

Além disso, há um conta-giros que faz a leitura do número de revoluções do corpo de prova.



**Figura 5.2** - Esquema da máquina de testes.

- 1- Conta-giro
- 2- Motor elétrico
- 3- Apoios fixos
- 4- Mancais onde a carga é aplicada
- 5- Corpo de prova

6- Volante de liberação da carga

7- Interruptor

### 3.4 Diagrama $SxN$ típico para os materiais testados. (aço e alumínio)

Esse diagrama é bastante utilizado para estimar a vida das peças submetidas ao ensaio de fadiga. Em escalas normais esse diagrama apresenta curvas que se aproximam de curvas logarítmicas, assim, com o propósito de facilitar os cálculos e melhorar a visualização são construídos diagramas em escala log-log (onde  $\log(N)$  ocupa o eixo horizontal e  $\log(S)$  ocupa o eixo vertical), que apresentam as curvas em formas de retas. Esse diagrama é construído com base em resultados experimentais com corpos de prova de um mesmo material padronizados, onde cada corpo de prova é submetido a diferentes cargas obtendo-se assim diferentes vidas para cada corpo, com base nas cargas aplicadas e nos ciclos de vida obtidos, constrói-se o diagrama  $SxN$  do determinado material.

Para os aços, o diagrama apresenta o aspecto da Figura 5.3. Para ciclos inferiores a  $10^3$  o fenômeno da fadiga não é tão evidente e, se por acaso alguma peça se romper com ciclos inferiores a esse valor considera-se um problema de carga estática. Entre valores de  $10^3$  e  $10^6$  ciclos ocorre um declínio da resistência do material, e, para cada valor do número de ciclos encontra-se uma resistência a fadiga correspondente. Para ciclos com o valor aproximado a  $10^6$  nota-se o aparecimento de uma inflexão nesse gráfico e abaixo deste ponto não ocorrerá falha, não importando o número de ciclos. A resistência correspondente a esse ponto de inflexão chama-se limite de resistência à fadiga,  $S_e$ , ou limite de fadiga.

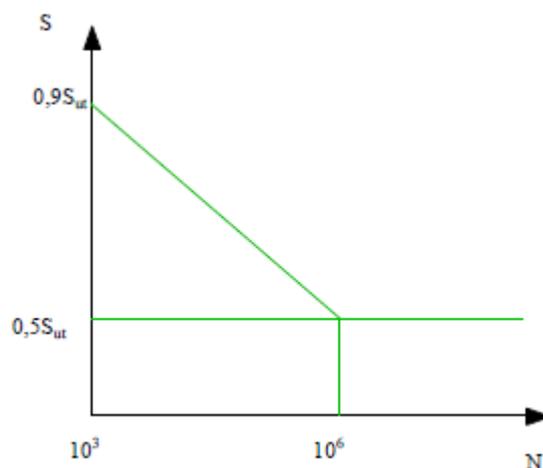
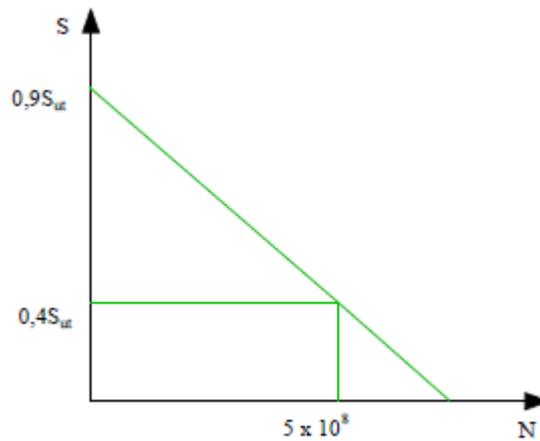


Figura 5.3 – Diagrama  $S \times N$  (Aços e Materiais Ferrosos).

Limite de fadiga para alumínio:

$$\begin{aligned} S_{f,@5.10^8} &= 0,4 \cdot S_{ut} && \text{para } S_{ut} < 330 \text{ MPa} \\ S_{f,@5.10^8} &= 130 \text{ MPa} && \text{para } S_{ut} \geq 330 \text{ MPa} \end{aligned}$$



**Figura 5.4** – Diagrama S x N (Alumínio e Suas Ligas)

Onde:

$S_{ut}$  => limite de resistência à tração  
 $S$  => limite de resistência à fadiga  
 $N$  => número de ciclos

#### 4 – Descrição do experimento

É importante que o aluno assista a um ensaio realizado por profissionais responsáveis pela análise tratada nesse roteiro. Assim, sugere-se o seguinte vídeo: <https://www.youtube.com/watch?v=wvE9ld2BjZ4&t=6s>

Antes de inserir os corpos de prova na máquina de teste, deve-se medir o diâmetro da região central de cada corpo (região que apresenta menor área).

Feito isso, seleciona-se um dos corpos de prova, por exemplo, o de aço 1020, e insere o mesmo na máquina, passando por dentro dos apoios fixos e os mancais onde a carga é aplicada. Em seguida o corpo de prova deve ser travado.

Para que isso seja feito, coloca-se uma chave-inglesa no cilindro que recobre o corpo de prova e o outro na porca de fixação.

Deve-se estimar os níveis de peso através do cálculo das tensões no modelo considerando os níveis dos limites de escoamento e resistência a tração médios obtidos no ensaio de tração.

Com o corpo de prova travado, colocam-se os pesos pré-determinados na haste (no interior da máquina), zerar o contador e ligar o motor elétrico.

Assim libera-se a carga e deve-se aguardar até que o corpo de prova se rompa. Rompido o corpo de prova, anota-se o número de ciclos realizados no ensaio.

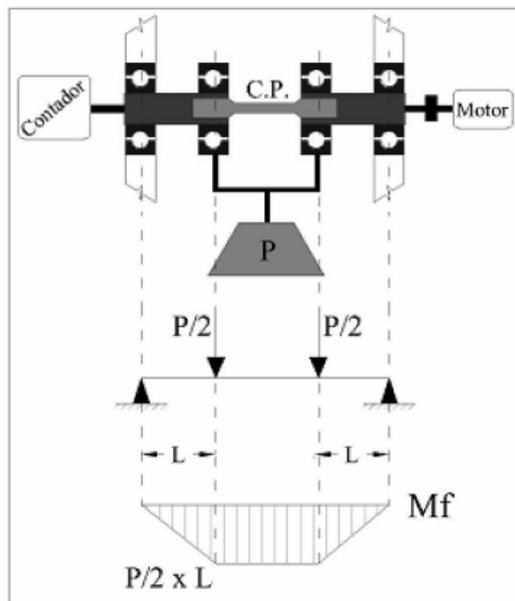
Repete-se então o mesmo procedimento acima para os outros corpos de prova.

## 5 – Anotações

Os alunos devem anotar e fazer as avaliações abaixo:

Material	$S_{ut}$ (MPa)	$S_y$ (MPa)
FoFo		
Alumínio		

**Procedimento de cálculo dos pesos:**



**Figura 5.5** - Esquema do cálculo dos pesos.

O campo de tensões na menor seção do corpo de prova é dado por:

$$\sigma = \frac{16000P}{\pi d^3}.$$

Como o objetivo do ensaio de flexão rotativa é apresentar os procedimentos de teste visando uma avaliação futura da curva  $S_xN$ , serão utilizados valores de tensão próximos do limite de escoamento visando obter um menor número de ciclos e, conseqüentemente, reduzir o tempo dos ensaios.

Neste caso, sugere-se 20% e 25% do limite de escoamento.

Dados do Ensaio de Fadiga:

FoFo						
CP	Diâmetro (mm)	Carga (N)	N (ciclos)	$\sigma$ (Mpa)	Log (N)	Log ( $\sigma$ )
1						
2						
3						

Alumínio						
CP	Diâmetro (mm)	Carga (N)	N (ciclos)	$\sigma$ (Mpa)	Log (N)	Log ( $\sigma$ )
1						
2						
3						

## 6 – Apresentação de dados e cálculos

6.1 Esboce a curva S x N teórica.

6.2 O que é fadiga de alto ciclo?

6.3 Avaliar o aspecto da fratura de cada um dos materiais testados. Qual a particularidade de uma fratura por fadiga

## 7 - Conclusões

Estabelecer as principais conclusões relativas à prática realizada e a sua importância para a formação do aluno que se gradua em Engenharia Aeronáutica.

## 8 – Bibliografia

- CHIAVERINI, VICENTE. Tecnologia Mecânica. Volume 1. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1981;
- SHIGLEY, J. E. Elementos de Máquinas. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 1984.
- SOUZA, S. A. Ensaios Mecânicos de Materiais Metálicos. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1982.

## CAPÍTULO IV

### CONCLUSÕES

Nas últimas décadas cresceu o interesse por aprimorar a integridade e segurança de componentes estruturais de engenharia, para assim, evitar acidentes e catástrofes que acontecem normalmente após uma sucessão de pequenas falhas.

Ver os sistemas de forma mais dinâmica, complexa e instável é um dos fatores mais importantes para evitar acidentes. É papel do engenheiro preocupar com esses sistemas complexos, pois cada gesto mínimo implica em riscos.

Uma falha bem comum em componentes estruturais, é a fadiga, que é caracterizada pela propagação de trincas seguida por uma fratura repentina do material quando submetido a carregamentos cíclicos. As operações de aeronaves sempre estão sujeitas a esses carregamentos cíclicos, ao decolar e pousar, ligar e desligar os motores, entre outras. Logo, o estudo da fadiga é essencial na engenharia aeronáutica, para evitar falhas. Além disso, a maioria dos componentes estruturais aeronáuticos trabalham com comportamento *fail-safe* (à prova de falhas), onde a falha de um componente não leva necessariamente ao colapso da estrutura completa, pois os componentes restantes são capazes de suportar a carga até a reposição do elemento com falha. Porém, deve-se organizar intervalos de inspeção de tal forma que uma trinca não atinja um tamanho catastrófico antes da próxima inspeção.

O profissional habilitado é a melhor forma de entender o fenômeno da fadiga e fazer cálculos e previsões para evitar falhas em projetos de estruturas aeronáuticas que devido à complexidade ficam cada vez mais desafiadoras.

Buscou-se então, com o desenvolvimento deste projeto contribuir para a disciplina de Fadiga e Mecânica da Fratura do curso de graduação em Engenharia Aeronáutica da Universidade Federal de Uberlândia, através da proposição de três práticas laboratoriais para serem realizadas pela disciplina, e assim formar profissionais com melhor entendimento do fenômeno da fadiga, que é essencial para essa área.

Após a realização deste estudo, a autora pode aprofundar seu aprendizado sobre o conteúdo em apreço, importante para o exercício da sua profissão de Engenheira Aeronáutica, tanto na Academia como na Indústria.

Acredita-se que os roteiros e respectivos vídeos sejam de grande valia tanto a alunos como professores e que sirvam de motivação para outras contribuições que possam surgir neste mesmo sentido, bem como de despertar do interesse dos alunos que os utilizarem para prosseguir em estudos avançados, como pesquisas, ou para fazer parte de equipes profissionais futuras.

Indubitavelmente, ao término deste trabalho, conclui-se que o propósito estabelecido desde a sua concepção foi satisfatoriamente cumprido. Registra-se que o objetivo não foi apresentar a fundamentação teórica de maneira aprofundada e muito menos em completude, mas de oportunizar práticas de ensino

## CAPÍTULO V

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. E399. West Conshohocken, 2017. 34p. Norma técnica.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. E466. West Conshohocken, 2017. 6p. Norma técnica.

ANDERSON, T. L. **Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications** 3ª.ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2005. 630p.

ASKELAND, D. R.; FULAY, P. P.; WRIGHT, W. J. **The Science and Engineering of Materials**. 6ª.ed. Stamford: Cengage Learning, 2011. 949p.

BANNANTINE, J. A.; COMER, J.J.; HANDROCK, J.L. **Fundamentals os Metal Fatigue Analysis**. New Jersey: Prentice Hall, 284p.

DOWNLING, N. E. **Mechanical Behavior of Materials**. 4ª.ed. England: Pearson Education Limited., 2012. 977.

MEGSON, T.H.G. **Aircraft Structures for Engineering Students**. 4th.ed. UK: Butterworth-Heinemman, 2007. 804p.

SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G. **Projeto de Engenharia Mecânica**. 7ª.ed. São Paulo: Artmed Editora S.A., 2005. 950p.