



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI ÁRIDO
CAMPUS MOSSORÓ
ENGENHARIA MECÂNICA

JUAREZ POMPEU DE AMORIM NETO

**ANÁLISE DE TAMANHO DE TRINCA E SUA PROPAGAÇÃO ATRAVÉS DA
MECÂNICA DA FRATURA**

MOSSORÓ – RN

2017

JUAREZ POMPEU DE AMORIM NETO

**ANÁLISE DE TAMANHO DE TRINCA E SUA PROPAGAÇÃO ATRAVÉS DA
MECÂNICA DA FRATURA**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi Árido – UFERSA
Departamento de ciências ambientais e
tecnológicas para obtenção do título de
engenheiro mecânico.

Orientador: Profº. Dr. Fabrício José
Nóbrega Cavalcante – UFERSA

MOSSORÓ – RN

2017

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº

9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

A469 Amorim Neto, Juarez Pompeu de .
ANÁLISE DE TAMANHO DE TRINCA E SUA PROPAGAÇÃO
ATRAVÉS DA MECÂNICA DA FRATURA / Juarez Pompeu de
Amorim Neto. - 2017.
40 f. : il.

Orientador: Fabrício José de Nóbrega Cavalcante.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de , 2017.

1. Mecânica da fratura. 2. Trinca. 3. Fadiga.
I. Cavalcante, Fabrício José de Nóbrega, orient.
II. Título.

JUAREZ POMPEU DE AMORIM NETO

**ANÁLISE DE TAMANHO DE TRINCA E SUA PROPAGAÇÃO ATRAVÉS DA
MECÂNICA DA FRATURA**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi Árido – UFERSA
Departamento de ciências ambientais e
tecnológicas para obtenção do título de
engenheiro mecânico.

Orientador: Profº. Dr. Fabrício José
Nóbrega Cavalcante – UFERSA

Defendida em: 20 / 10 / 2017

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Fabrício José de Nóbrega Cavalcante. (UFERSA)

Presidente



Prof. Dr. Zoroastro Torres Vilar. (UFERSA)

Membro Examinador



Daniel Ricardo Araújo Amaro. (UFPE)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me dar essa oportunidade de ter vivido esse momento e ter a sabedoria pra chegado até aqui.

Agradeço a minha mãe Lleni e minha avó Cléone por participarem sempre dos meus estudos e por terem me dado as chances para chegar até aqui.

A todos os familiares que estiveram ao meu lado.

A minha noiva Larissa por sempre ter me apoiado e acreditado no meu potencial.

Agradeço a toda família Cactus Baja por ter vivido momentos de aprendizagem e de amizade durante toda a vida universitária.

Aos colegas do curso de engenharia mecânica, estes que conheci em Mossoró e sei que levarei para o resto da vida.

Ao professor Fabrício pela orientação e paciência com esse trabalho.

"Determine que algo pode e deve ser
feito, e então você achará o caminho para
fazê-lo."

RESUMO

O seguinte trabalho realizou um estudo teórico sobre a mecânica da fratura para analisar qual o tamanho de trinca crítica que pode ter um determinado material. Após a análise do tamanho de trinca crítica o trabalho analisou como tal defeito se propagou até que chegue no tamanho admissível. Nesse trabalho foram analisados três diferentes tipos de materiais (aço SAE 1020, 1045 e 4340) em três diferentes situações, sendo elas uma em que há uma trinca central no material, na outra existe uma trinca lateral e por fim duas trincas laterais. O trabalho irá verificar como se comporta um determinado eixo de transmissão automotivo.

Palavras-chaves: Mecânica da fratura. Trinca. Fadiga.

ABSTRACT

The following work carried out a theoretical study on the mechanics of the fracture to analyze the critical crack size that can have a certain material. After analyzing the critical crack size the work analyzed how such a defect propagated until it reaches the permissible size. In this work three different types of materials (SAE 1020, 1045 and 4340 steel) were analyzed in three different situations, one in which there is a central crack in the material, in the other there is a lateral crack and finally two lateral crackings. The work will verify how a certain axis of automotive transmission behaves.

Keywords: Fracture mechanics, Crack, Fatigue.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Primeiro modo de ruptura.....	13
Figura 2 - Segundo modo de ruptura.....	13
Figura 3 - Terceiro modo de ruptura	13
Figura 4 - Placa com furo elíptico.....	14
Figura 5 - Concentração de tensão em um furo elíptico.....	15
Figura 6 - Zona de deformação plástica em torno da trinca	17
Figura 7 - Sequência de corpos de prova	18
Figura 8 - Primeira tentativa de cálculo do CTOD	19
Figura 9 - Esboço da abertura da boca do entalhe.....	20
Figura 10 - Curva de projeto de Wells	21
Figura 11 - Valor adimensional para corpo de prova de alumínio	22
Figura 12 - Curvas de projeto.....	23
Figura 13 - Passo a passo para achar fator de segurança.....	24
Figura 14 – Curva $dadn$ vs ΔK	25
Figura 15 - Ilustração das fases	26
Figura 16 - Fractografia revelando propagação de trinca em fadiga.....	26
Figura 17 - Fator geométrico para trinca central.....	28
Figura 18 - Fator geométrico para trinca lateral	29
Figura 19 - Fator geométrico para duas trincas laterais	29
Figura 20 – Sequência da metodologia do trabalho	30
Figura 21 - Eixo de transmissão intermediário Baja SAE.....	30
Figura 22 - Dimensões	31
Figura 23 - Fatores intensidade de tensões.....	32
Figura 24 – Tamanho de trinca crítico (defeito central).....	33
Figura 25 - Tamanho de trinca crítico (defeito lateral)	34
Figura 26 - Tamanho de trinca crítico (defeitos laterais)	35
Figura 27 - Condições simultâneas para uma trinca central.....	36
Figura 28 - Condições simultâneas para uma trinca lateral.....	37
Figura 29 - Condições simultâneas para duas trincas laterais	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores das constantes “C” e “m” da equação de Paris	27
Tabela 2 – Resultados dos tamanhos de trincas	35
Tabela 3 - Condições para a simulação do aço SAE 1020 (Trinca central)	36
Tabela 4 – Resultados de fadiga.....	38

SUMÁRIO

1. INTORDUÇÃO	10
2. OBJETIVOS	11
2.1 OBJETIVOS GERAIS	11
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
3. JUSTIFICATIVA.....	12
4. REVISÃO DA LITERATURA	13
4.1 FATOR CONCENTRADOR DE TENSÃO	13
4.2 MECÂNICA DA FRATURA LINEAR-ELÁTICA (MFLE).....	15
4.3 MECÂNICA DA FRATURA ELASTO PLÁSTICA (MFEP).....	17
4.3.1 Método CTOD	18
4.3.2 Abertura da trinca.....	18
4.3.3 Abertura de trinca e deformação no corpo	20
4.3.4 Confiabilidade da curva de projeto	23
4.4 MECÂNICA DA FRATURA APLICADA À FADIGA	24
4.4.1 Experimento de Paris.....	24
4.4.2 Região intermediária de crescimento de trinca.....	26
5. METODOLOGIA	28
5.1 Eixo de transmissão	30
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
6.1 Tamanho de trinca vs tensão aplicada em um eixo	32
6.2 Análise de fadiga nos materiais	35
7. CONCLUSÃO	39
BIBLIOGRAFIA	40

1. INTORDUÇÃO

No início dos estudos acerca das falhas estáticas nos materiais considera-se que o mesmo seja totalmente homogêneo e assim livre de qualquer defeito que seja uma fenda, lacuna, cantos pontiagudos, onde esses defeitos servem como concentradores de tensão no material. Saindo dessa idealização sabe-se que os materiais apresentam defeitos que não são visíveis a olho nu, como por exemplo o defeito de solda, inclusões, rachaduras de um tratamento de têmpera, dobras, etc. Devido a esses defeitos os materiais podem falhar quando aplicado a eles uma tensão abaixo da tensão de projeto, sendo esse um tipo de fratura considerado frágil, na qual é influenciada pelos devidos defeito citados anteriormente.

O objetivo do estudo acerca da Mecânica da Fratura visa prever se algum tipo de defeito irá acarretar na falha do material quando submetido a tensões normais de serviço. Um exemplo de falha ocorreu em navios-tanque, onde o mesmo se partiu ao meio. Muitas dessas falhas estavam ligadas a vida humana, então com o intuito de tentar evitar tais falhas o estudo da mecânica da fratura veio a ter seu grau de importância.

Devido as falhas ocorrerem abaixo do limite de escoamento do material a Mecânica da Fratura visa resolver dois problemas: o primeiro seria calcular o tamanho dos defeitos (fazer uma análise de como o tamanho da trica irá influenciar na resistência do material) e o segundo seria calcular o tempo de operação para manter a segurança da peça (tempo para a trinca alcançar o tamanho crítico).

A Mecânica da Fratura se divide em duas partes: a Mecânica da Fratura Linear-elástica (MFLE) e a Mecânica da Fratura Elasto-Plástica (MFEP).

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo do seguinte trabalho, será realizar um estudo teórico acerca da mecânica da fratura nos materiais de engenharia mecânica para saber como se comportam e assim poder otimizar a fase de projeto. O trabalho aborda as teorias da mecânica da fratura linear elástica (MFLE) aplicada a fadiga ficando restrita aos casos em que não há deformação plástica apreciável acompanhando a fratura.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Após realizada a abordagem teórica da mecânica da fratura o trabalho se aprofunda no cálculo do tamanho crítico de defeito admissível para um determinado nível de tensão e tenacidade à fratura e também o número de ciclos para que essa trinca de propague até o tamanho crítico auxiliando assim o engenheiro na fase de projeto.

3. JUSTIFICATIVA

A abordagem do seguinte trabalho busca prever o comportamento dos materiais diante dos defeitos expostos a um campo de tensão de trabalho e isso é um fator de extrema importância na área de projetos, pois viabiliza o projeto do engenheiro garantindo segurança e confiabilidade.

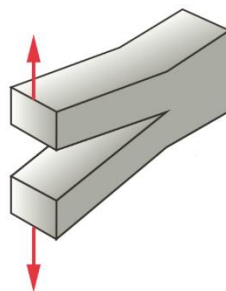
A partir de tais estudos, onde leva-se em conta as propriedades dos materiais, tensões aplicadas e tamanhos de defeitos, os resultados irão auxiliar o engenheiro durante os cálculos de projeto do seu produto, evitando assim uma falha prematura de algum material.

4. REVISÃO DA LITERATURA

4.1 FATOR CONCENTRADOR DE TENSÃO

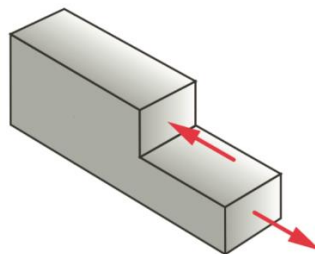
Existem três maneiras de ruptura em materiais sólidos, o primeiro modo são quando existem tensões trativas de tal maneira que tendem a puxar a trinca conforme a Figura 1, a segunda maneira seria de deslizar a trinca no plano, onde ocorre o cisalhamento puro de acordo com a Figura 2 e a terceira maneira seria de deslizar a trinca fora do plano conforme Figura 3.

Figura 1 - Primeiro modo de ruptura



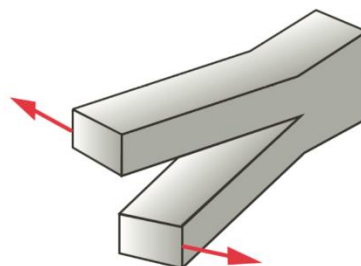
Fonte: (NORTON, 2013)

Figura 2 - Segundo modo de ruptura



Fonte: (NORTON, 2013)

Figura 3 - Terceiro modo de ruptura



Fonte: (NORTON, 2013)

O estudo acerca de projetos visa determinar um fator concentrador de tensão (K_t) associado aos defeitos geométricos já citado anteriormente, então a tensão aplicada sobre alguma peça deve ser multiplicada por um fator de concentrador de tensão para que dessa forma possa ser usada a tensão efetiva.

Em uma trinca de formato elíptico conforme a Figura 4, as tensões máximas surgem nas extremidades do eixo da elipse normal a aplicação de forças, onde pode-se achar a tensão máxima por:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \sigma \left(1 + \frac{2a}{b} \right) \quad (1)$$

Onde:

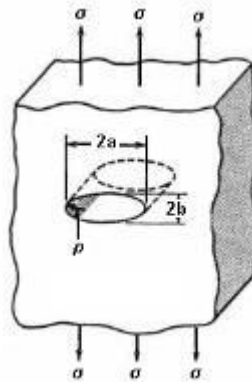
$\sigma_{m\acute{a}x}$: Tensão máxima;

σ : Tensão aplicada;

a : Eixo maior da elipse;

b : Eixo menor da elipse.

Figura 4 - Placa com furo elíptico



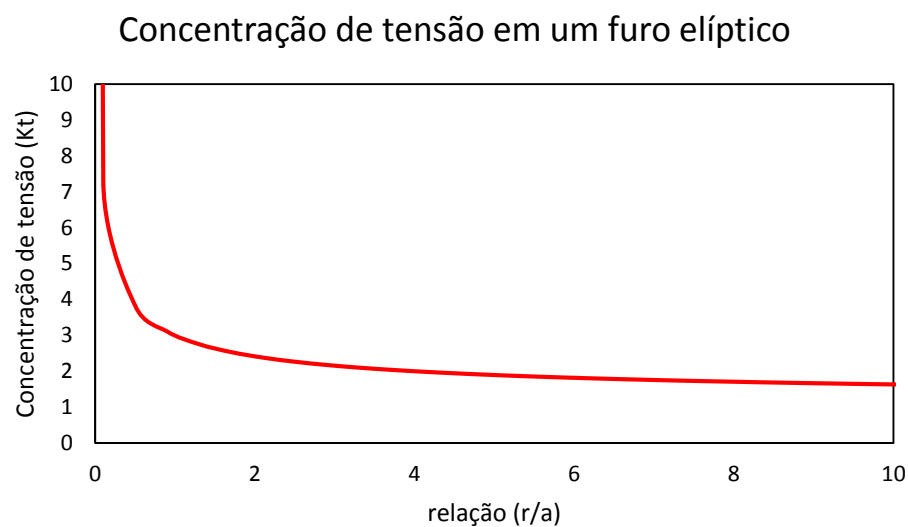
Fonte: (TELMO STROHAECKER, 1999)

O raio de curvatura r na extremidade de um trinca de formato elíptico se dá matematicamente por $r = \frac{b^2}{a}$ e combinando com a equação (1) chega-se que:

$$\frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{\sigma} = 1 + 2\sqrt{\frac{a}{r}} \quad (2)$$

Onde essa é a relação na qual se denomina o fator concentrador de tensão, fica evidente que se o furo se tornar circular tem-se um fator concentrador de tensão igual a 3, então dependendo da geometria do defeito estima-se esses fatores concentradores de tensão, vale ressaltar que uma breve análise da equação de número (2) mostra que quanto mais agudo for esse defeito menor seria o valor do raio de curvatura e assim maior seria o fator concentrador de tensão, contanto maior a magnitude da tensão na trinca. O gráfico da Figura 5 mostra tal resultado.

Figura 5 - Concentração de tensão em um furo elíptico



Fonte: Autoria própria (2017)

4.2 MECÂNICA DA FRATURA LINEAR-ELÁSTICA (MFLE)

A MFLE é utilizada quando a fratura ocorre no regime linear elástico, essa abordagem tenta estimar o campo de tensões na ponta da trinca através de um fator concentrador de tensão que depende da geometria da peça. Segundo Strohaecker (1999, p. 18).

A Mecânica da Fratura Linear Elástica é a metodologia a ser empregada em situações onde há possibilidade de ocorrer fratura sem ser precedida de extensa deformação plástica. Esta restrição à deformação plástica pode ser decorrência das próprias propriedades do material, aços de altíssima resistência mecânica, por exemplo, ou de fatores geométricos como as dimensões da estrutura, mesmo para aços de média resistência mecânica o estado de deformação plana pode ser alcançado, se houver espessura suficiente ou se a temperatura for suficientemente baixa.

O campo de tensões na ponta da trinca é relacionado com um fator intensidade de tensão (K_{IC}) através da equação:

$$\sigma_x = \frac{K_{IC}}{\sqrt{2\pi r}} \cdot F_x(\theta) \quad (3)$$

Onde:

K_{IC} : Fator intensidade de tensão;

r : Distância da ponta da trinca;

F_x : Função adimensional de θ ;

θ : Ângulo medido a partir do plano da trinca.

A equação de número 3 é referente ao modo de carregamento da figura 1 e com relação aos outros carregamentos a distribuição de tensões na ponta da trinca será semelhante, onde a diferença irá se dar apenas no fator de intensidade de tensão que depende da geometria da peça. Os valores do fator intensidade de tensão varia de geometria para geometria, se for considerada uma trinca de comprimento $2a$ onde as dimensões da placa seria infinita se comparada com o tamanho da trinca tem-se um fator intensidade de tensão:

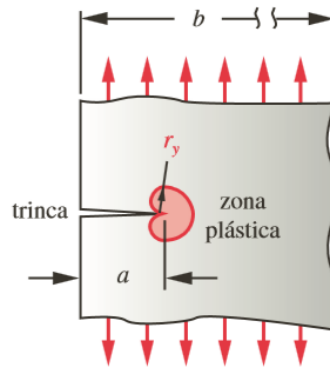
$$K_{IC} = \sigma_x \sqrt{\pi a} \quad (4)$$

Segundo Norton (2013, p 268) essa equação tem uma imprecisão menor que 10% no caso das relações entre a distância da ponta da trinca e o comprimento da placa seja menor que 0,4, que é exatamente o caso da placa ter uma dimensão muito maior que o comprimento da trinca. Caso o tamanho da trinca não seja muito menor que o tamanho da placa, então o cálculo para o fator intensidade de tensão não é tão simples e nesse caso para a equação de número 4 é acrescido como fator multiplicativo um fator β , onde o mesmo depende dessa relação de tamanhos, da própria geometria da peça e do tipo de esforço. Os valores para esse parâmetro adimensional podem ser encontrados em manuais.

$$K_{IC} = \beta \sigma_x \sqrt{\pi a} \quad (5)$$

As maiores tensões ocorrem quando o raio tende a zero (fazer análise da equação 3), só que essas tensões tem um fator limitante ocasionado pelo escoamento do material que cria uma zona plástica de raio R_y , conforme a Figura 6.

Figura 6 - Zona de deformação plástica em torno da trinca



Fonte: (NORTON, 2013)

O cálculo do fator intensidade de tensão é válido nas proximidades da trinca, mas não é válido dentro da faixa R_y , fato citado anteriormente pela imprecisão menor que 10%. Em virtude disso se a zona plástica for muito menor que o campo afetado por K_{IC} aceita-se que essa zona plástica é uma pequena perturbação da zona elástica. Segundo Strohaecker (1999, p 20) a zona plástica se comporta como perturbação quando seu tamanho for 15 vezes menor que as dimensões da peça.

Quando o fator intensidade de tensão for menor que o a tenacidade a fratura, sendo essa uma propriedade do material, dizemos que a trinca é estável.

Percebe-se facilmente que para o uso da MFLE deve-se usar muitas equações para cada tipo de geometria e carregamento, devido a essa dificuldade existem softwares que auxiliam nos cálculos, tornando assim a MFLE com um amplo campo de aplicações, um exemplo de software que auxilia nesses cálculos é o NASGRO desenvolvido pela NASA em 2001.

4.3 MECÂNICA DA FRATURA ELASTO PLÁSTICA (MFEP)

A mecânica da fratura elasto plástica tem duas vertentes distintas que procuram solucionar os problemas de materiais que apresentam deformação plástica na trinca, onde um deles é o método *Crack Tip Opening Displacement* (CTOD) e o método da integral J, essas

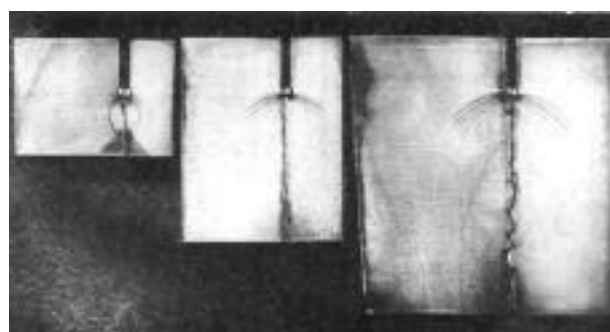
duas formas para solucionar os problemas apresentam um limite de aplicabilidade, mas não tão restrito quanto a MFLE. Esse trabalho tem por objetivo se aprofundar no método CTOD onde irá mostrar a maneira como se determina o CTOD crítico, CTOD de início de propagação instável da trinca e CTOD de carga máxima.

4.3.1 Método CTOD

O método CTOD foi desenvolvido por Wells, onde através de ensaios de fratura ele percebeu que as deformações afastavam as faces da fissura sem haver o crescimento da trinca e foi devido a esse afastamento o nome desse método que significa (abertura de ponta de fissura). O objetivo desse método é aplicado a materiais com alta capacidade de deformação plástica, onde se procura obter um parâmetro de fratura para esses materiais.

O CTOD vai ser exatamente esse valor de abertura de ponta de fissura onde fixado esse valor dentro de uma zona plástica e comparando ao tamanho de trinca pode-se prever se o material vai falhar antes ou depois da região de escoamento e ainda mais saber o tipo de fratura, se foi fratura frágil ou dúctil como mostra a Figura 7. Assim começa a perceber a importância do cálculo do CTOD dos materiais, pois essas previsões de fraturas são de grande importância para algum projeto.

Figura 7 - Sequência de corpos de prova



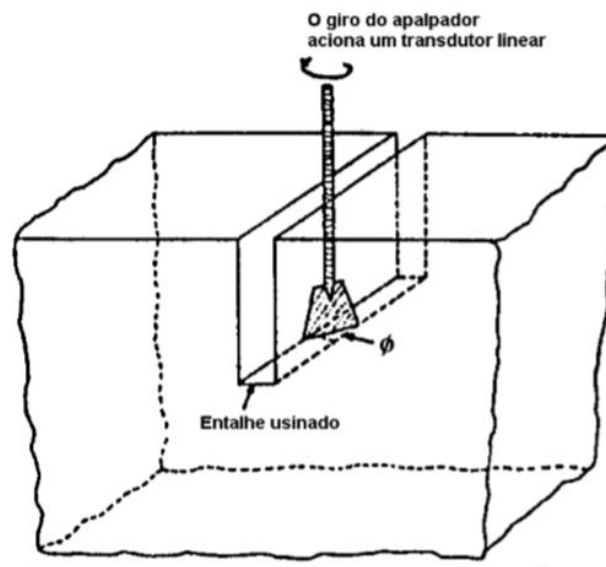
Fonte: (TELMO STROHAECKER, 1999)

4.3.2 Abertura da trinca

Uma primeira tentativa de calcular o CTOD foi realizada de uma maneira onde se era usinado um entalhe variando de 0,10 a 0,15 mm e um apalpador era colocado no fundo do entalhe, quando o entalhe aumentava de tamanho o apalpador girava de maneira proporcional

a abertura. E para aquisição dos dados para realizar o cálculo do CTOD era utilizado um transdutor que fazia tal medição. Ver Figura 8.

Figura 8 - Primeira tentativa de cálculo do CTOD



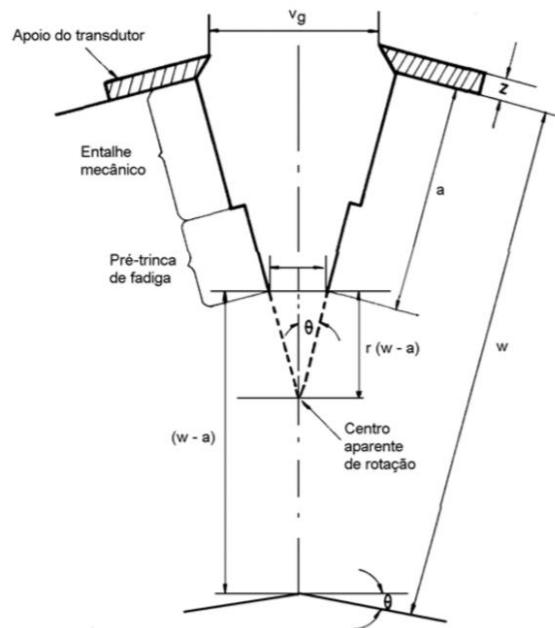
Fonte: (TELMO STROHAECKER, 1999)

Visando melhorar o cálculo do CTOD uma outra técnica foi realizada, onde se utilizava um corpo com dois entalhes e o CTOD era medido na seção que não se rompia.

Os valores calculados do CTOD crítico (δ_c) no método com duplo entalhe eram menores do que no outro método com um entalhe, e assim o método com apenas um entalhe foi descartado por não se comportar da maneira com um raio de curvatura tendendo a zero.

Para chegar em resultados mais precisos utilizou-se extensômetros para realizar tais medições onde eram introduzidas pré trincas de fadigas, cujo objetivo era relacionar a abertura da boca do entalhe (V_g) com a abertura da ponta da trinca (δ), onde essa relação depende de fatores geométricos, conforme mostra a Figura 9.

Figura 9 - Esboço da abertura da boca do entalhe



Fonte: (TELMO STROHAECKER, 1999)

Com a introdução dessa pré trinca de fadiga se fez necessário o uso de uma equação que desse um valor para δ . Essa equação se dá de maneira fácil através de relações geométricas nos triângulos da figura 9.

$$\delta = \frac{Y(W - a)V_g}{Y(W - a) + a + Z} \quad (6)$$

Onde:

Y : Fator rotacional;

W : Altura do corpo;

a : Pré trinca de fadiga;

Z : Altura do suporte do extensômetro.

4.3.3 Abertura de trinca e deformação no corpo

A fratura do elemento se dá quando a trinca chega no seu tamanho crítico, sabe-se que aparece uma zona plástica na ponta de uma trinca em virtude da intensificação de tensões, sendo assim tem-se um campo de tensões plásticas ao redor do campo elástico, contudo as equações para MFLE não será mais válida, e uma nova equação para o CTOD foi desenvolvida para

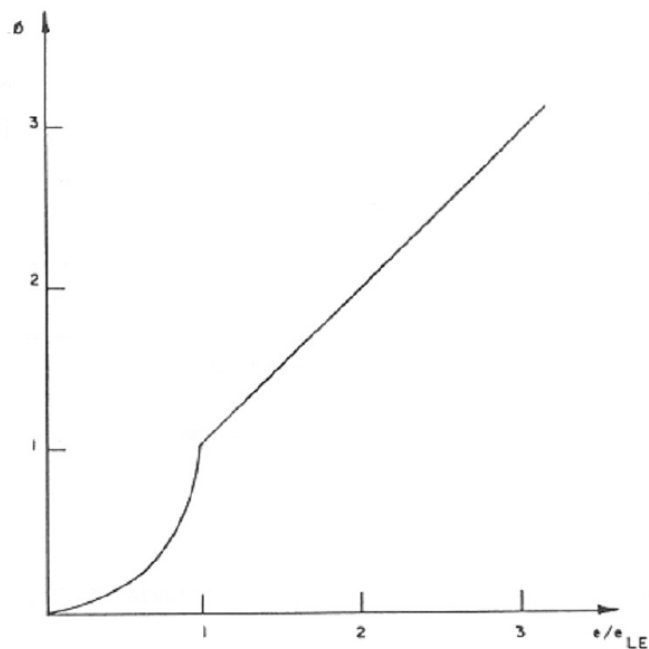
relacionar a abertura da trinca com a deformação no corpo, pois era muito complexo fazer a medição da abertura da ponta da trinca quando em serviço. Essa metodologia foi imposta por Wells. Ele desenvolveu um modelo chegando na seguinte expressão:

$$\frac{2\pi\varepsilon_y a}{\delta} = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon} \quad (7)$$

Apartir desse modelo Wells criou a curva de projeto conforme mostra a Figura 10 e 11, cujo objetivo era de determinar o tamanho máximo de efeito tolerável em uma estrutura soldada. E assim a abertura de trinca foi expressa de forma adimensional por:

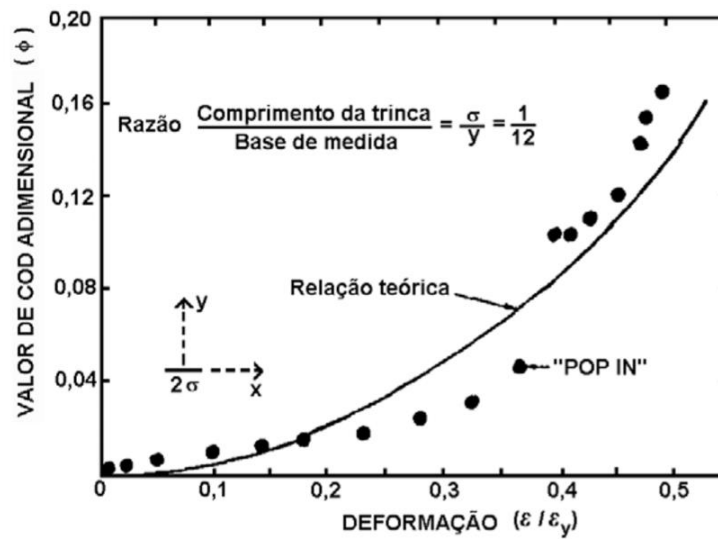
$$\phi = \frac{\delta}{2\pi\varepsilon_y a} \quad (8)$$

Figura 10 - Curva de projeto de Wells



Fonte: (CLEBER FORTES, 2003)

Figura 11 - Valor adimensional para corpo de prova de alumínio



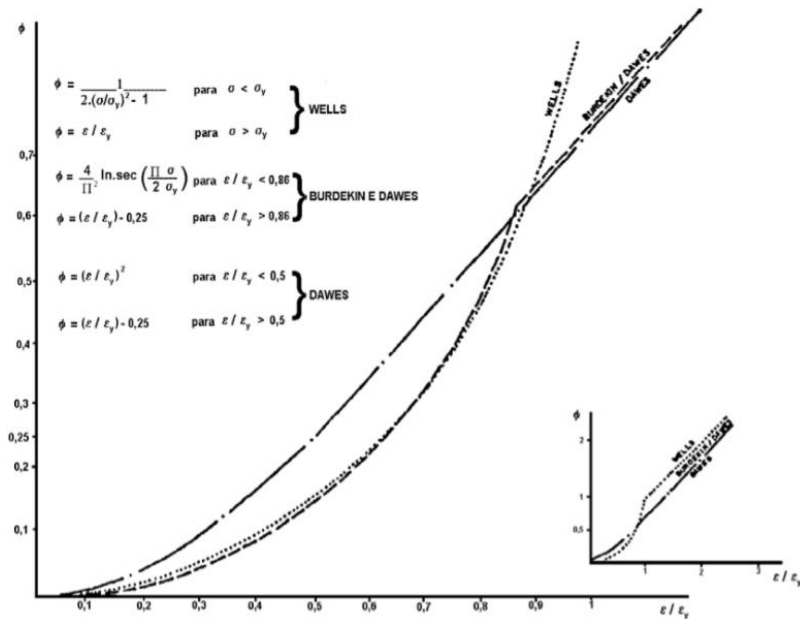
Fonte: (TELMO STROHAECKER, 1999)

Existem outras maneiras para o cálculo do CTOD em função da deformação, como por exemplo o método imposto por Burdekin e Stone:

$$\delta = \frac{8\epsilon_y a}{\pi} \ln \sec\left(\frac{\pi\sigma}{2\sigma_e}\right) \quad (9)$$

O uso da curva de projeto pode dar várias informações ao projetista, como por exemplo estipular o tamanho crítico para uma carga aplicada, estipular uma tensão admissível para um determinado tamanho de trinca e também através da curva pode se selecionar o material adequado para determinada aplicação. A Figura 12 mostram diversas curvas de projeto impostas por Wells, Burdekin e Dawes.

Figura 12 - Curvas de projeto



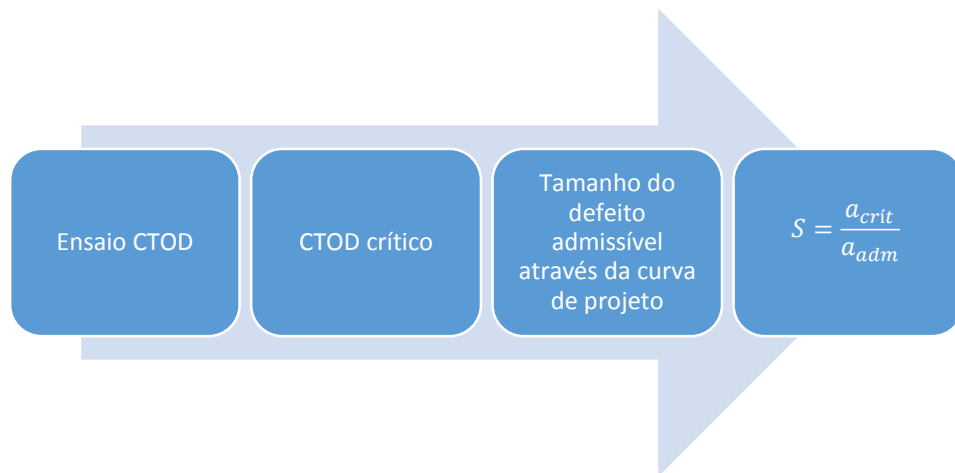
Fonte: (TELMO STROHAECKER, 1999)

4.3.4 Confiabilidade da curva de projeto

Como mencionado anteriormente o método CTOD apresenta suas falhas, mesmo sendo o método mais usado para o caso da MFEP. Através da curva de projeto de origem empírica, consegue-se achar o tamanho dos defeitos admissíveis (a_{adm}) para uma tensão aplicada, sendo assim procurou-se saber qual seria o fator de segurança para otimização do projeto.

O método consiste em fixar a tensão aplicada e gradativamente aumentar o tamanho da trinca até a fratura, esse tamanho de trinca durante a fratura é exatamente o tamanho de defeito crítico (a_{crit}). Fazendo o ensaio CTOD compara-se os tipos de defeitos e assim achar o fator de segurança ideal. O fluxograma seguinte mostra tal processo. Ver Figura 13.

Figura 13 - Passo a passo para achar fator de segurança



Fonte: Autoria própria (2017)

4.4 MECÂNICA DA FRATURA APLICADA À FADIGA

A fadiga é um tipo de falha causado por um carregamento cíclico que vai gerar e propagar uma trinca. Antigamente o enfoque principal acerca do estudo da fadiga era saber como eram formadas as trincas, mas a partir da década de 60 o objetivo foi voltado para estudar o crescimento dessa trinca, pois foram constatados que as trincas causadas por fadiga não se davam de maneira catastrófica e que as trincas eram formadas no início da vida em fadiga de um material. Esse tipo de método vai considerar que já exista uma trinca no material que tenha sido detectada de alguma forma e a partir daí verificar como ela se propaga para que dessa forma se saiba se o material vai falhar ou não. Para esse tipo de análise são usados algoritmos computacionais junto com um programa de inspeção periódica, verificando assim a existência de trincas. Um tipo de programa computacional que visa resolver esse tipo de problema é o NASA/FLAGRO 2.0.

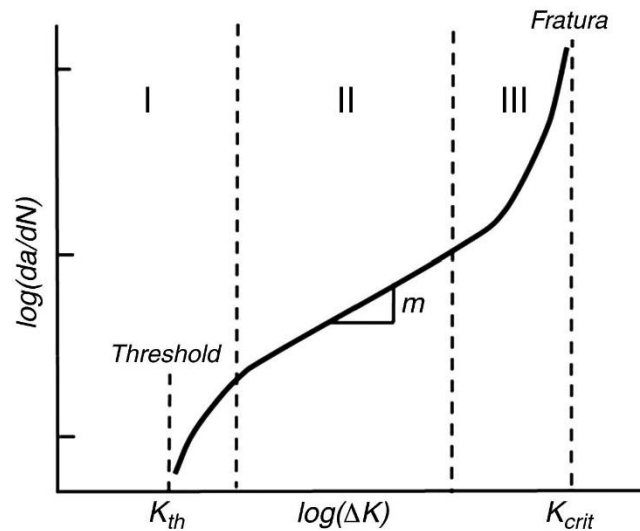
4.4.1 Experimento de Paris

Durante os estudos para relacionar o crescimento de trincas por fadiga, Paris chegou em uma equação que mostrava de forma convincente que era a variação do fator de intensidade de tensão (ΔK) e não a tensão que controlava tal crescimento. Com seus experimentos chegou-se a seguinte equação:

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m \quad (10)$$

Plotando o gráfico de tal equação na escala logarítmica obtém-se uma curva de três fases distintas conforme a Figura 14:

Figura 14 – Curva $\frac{da}{dn}$ vs ΔK



Fonte: (TELMO STROHAECKER, 1999)

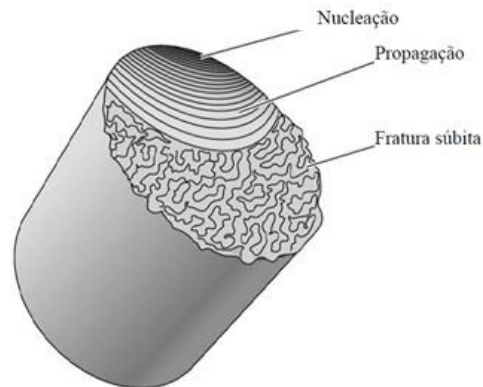
Fase 1: Caracterizada pela existência de um limite inferior de ΔK onde nessa fase há grande influência da microestrutura, tensão média e ambiente. Não há a propagação de trinca e as variações de ΔK vão de $10^{-10} - 10^{-9}$. Essa é a fase onde ocorre a nucleação das trincas.

Fase 2: Essa é a fase que a Lei de Paris é válida, pois há um crescimento contínuo da trinca e não há muita influência da tensão média, microestrutura, ambiente e espessura. As variações de ΔK vão de $10^{-9} - 10^{-6}$.

Fase 3: Caracterizada pela existência de um limite superior de ΔK (se aproxima muito do fator intensidade de tensão do material) onde nessa fase há grande influência da microestrutura, tensão média e espessura. Não há a propagação de trinca. Nessa fase ocorre a ruptura catastrófica do material.

A Figura 15 mostra a disposição dessas três fases.

Figura 15 - Ilustração das fases

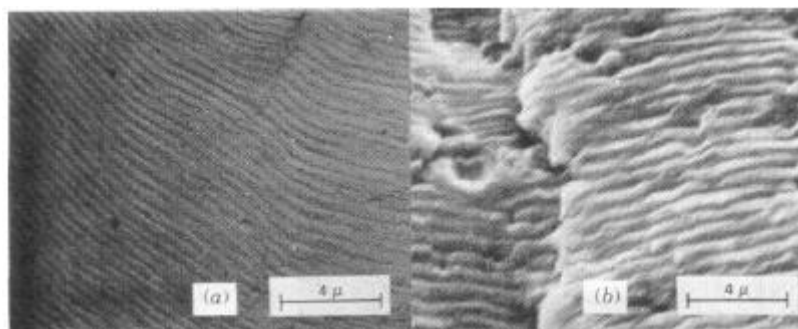


Fonte: (ASKELAND, 2008)

4.4.2 Região intermediária de crescimento de trinca

Como mencionado anteriormente sabe-se que a equação de Paris vai descrever de maneira adequada o crescimento de uma trinca e a partir dessa lei pode-se prever o tempo de vida útil de um componente de projeto em função da equação 10. Esta vida útil é dada pelo número de ciclos que vai propagar uma trinca até o tamanho crítico, tudo isso em função de um tamanho de trinca pré-existente que pode ser averiguado por algum tipo de inspeção. “Nesta região de crescimento de trinca a fratura dá-se, predominantemente, por um mecanismo de estriação dúctil transgranular”. (STROHAECKER, 1999, p 20). E assim cada estria era proveniente de um ciclo de carregamento de acordo com a Figura 16.

Figura 16 - Fractografia revelando propagação de trinca em fadiga



Fonte: (TELMO STROHAECKER, 1999)

Cada estria de um material representa um resultado no avanço do crescimento de trinca proveniente de um ciclo. Com toda essa análise conseguiu-se chegar em uma equação que

pudesse prever o número de ciclos de um componente em função do seu tamanho crítico de trinca.

Utilizando a equação de Paris pode-se calcular a vida em fadiga pelo método $\frac{da}{dN}$, de fato temos o seguinte resultado:

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m$$

$$\int_0^{Nf} dN = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{C \Delta K^m}$$

Usando o resultado da equação de número (5) e substituindo nesse resultado, tem-se:

$$\int_0^{Nf} dN = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{C (Y \Delta \sigma \sqrt{\pi a})^m}$$

Resolvendo a integral, tem-se:

$$Nf = \frac{1}{C Y^m \Delta \sigma^m \sqrt{\pi}^m} \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{\sqrt{a}^m}$$

$$Nf = \frac{a_c^{(1-\frac{m}{2})} - a_0^{(1-\frac{m}{2})}}{C Y^m \Delta \sigma^m \sqrt{\pi}^m (1 - \frac{m}{2})} \quad (11)$$

A Tabela 1 mostra os valores experimentais para as constantes “C” e “m” para que se possa ser usada na equação de Paris (equação 11),

Tabela 1 - Valores das constantes “C” e “m” da equação de Paris

Material	C	m
Aços ferríticos – perlíticos	$6,89 \cdot 10^{-12}$	3
Aços martensíticos	$1,36 \cdot 10^{-10}$	2,25
Aços inoxidáveis austeníticos	$5,61 \cdot 10^{-12}$	3,25

Fonte: (Shigley adaptado)

5. METODOLOGIA

Como foi mencionado anteriormente, o objetivo desse trabalho é achar o tamanho crítico de uma trinca no eixo de transmissão automotivo para três tipos de materiais (aço SAE 4340, aço SAE 1020, aço SAE 1045) com diversas situações de trincas, sendo elas uma trinca central, trinca em uma única borda e com trinca nas duas bordas. Os seguintes materiais foram escolhidos, pois possuem larga escala no mercado e também são bastantes utilizados para tal aplicação.

Cada tipo de situação deve-se levar em conta o fator geométrico envolvido na situação. Para isso o fator intensidade de tensão em cada caso vai depender da seguinte equação:

$$K_{ic} = \lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{m\acute{a}x} \sqrt{r} \frac{\sqrt{\pi}}{2} \quad (12)$$

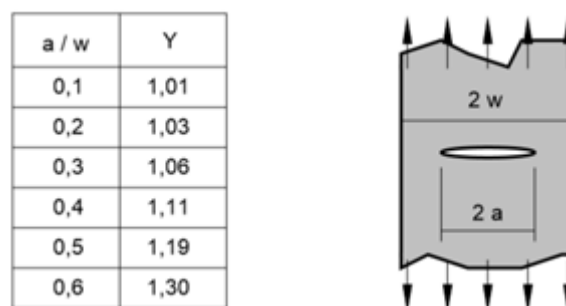
Substituindo a equação (2) que considera um furo elíptico na equação (12):

$$K_{ic} = \lim_{r \rightarrow 0} \sigma \left(1 + 2 \sqrt{\frac{a}{r}}\right) \sqrt{r} \frac{\sqrt{\pi}}{2}$$

$$K_{ic} = 1 \sigma \sqrt{\pi a} \quad (13)$$

Esse caso exemplifica a situação em que se tem uma trinca central elíptica, com fator geométrico 1, a Figura 17 exemplifica essa situação mostrando como se alcança o fator geométrico Y . No caso da equação (13) levou-se em conta a dimensão da peça muito maior que o tamanho da trinca e assim $Y \rightarrow 1$.

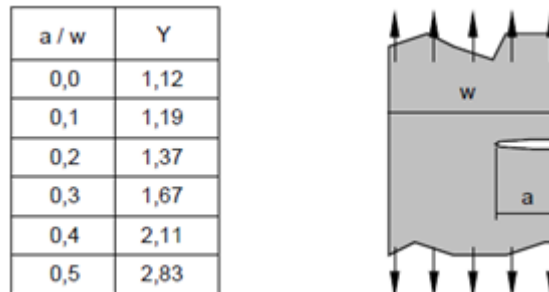
Figura 17 - Fator geométrico para trinca central.



Fonte: (EDISON DA ROSA, 2002)

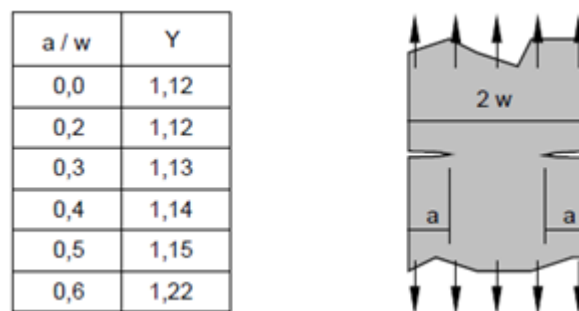
As Figuras 18 e 19 exemplificam as outras duas situações requeridas pelo trabalho onde para uma trinca lateral ou duas trincas laterais com dimensões muito maior que a trinca tem-se um fator geométrico $Y \rightarrow 1$.

Figura 18 - Fator geométrico para trinca lateral



Fonte: (EDISON DA ROSA, 2002)

Figura 19 - Fator geométrico para duas trincas laterais



Fonte: (EDISON DA ROSA, 2002)

Assim, pode-se concluir que a equação (13) pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$K_{ic} = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad (13)$$

Onde:

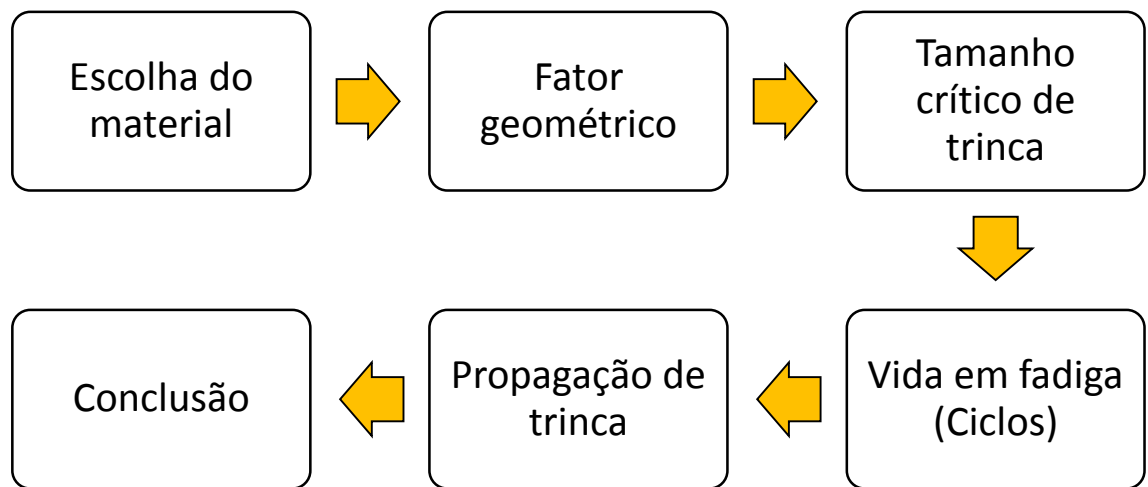
Y : Fator geométrico

σ : Tensão aplicada

a : Tamanho de trinca

Após a análise de tamanho de defeito admissível o trabalho tem como objetivo verificar como essa trinca irá se propagar por meio da equação de número 11 até chegar no seu tamanho crítico e a partir desse resultado verificar qual a vida em fadiga da peça analisada. A Figura 20 mostra um fluxograma representando a metodologia do trabalho:

Figura 20 – Sequência da metodologia do trabalho

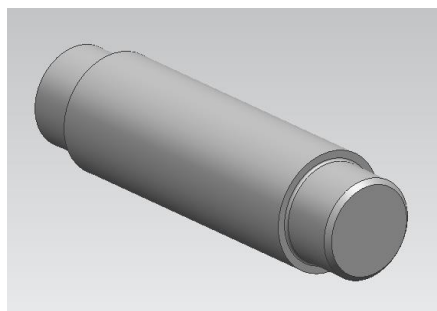


Fonte: Autoria própria (2017)

5.1 Eixo de transmissão

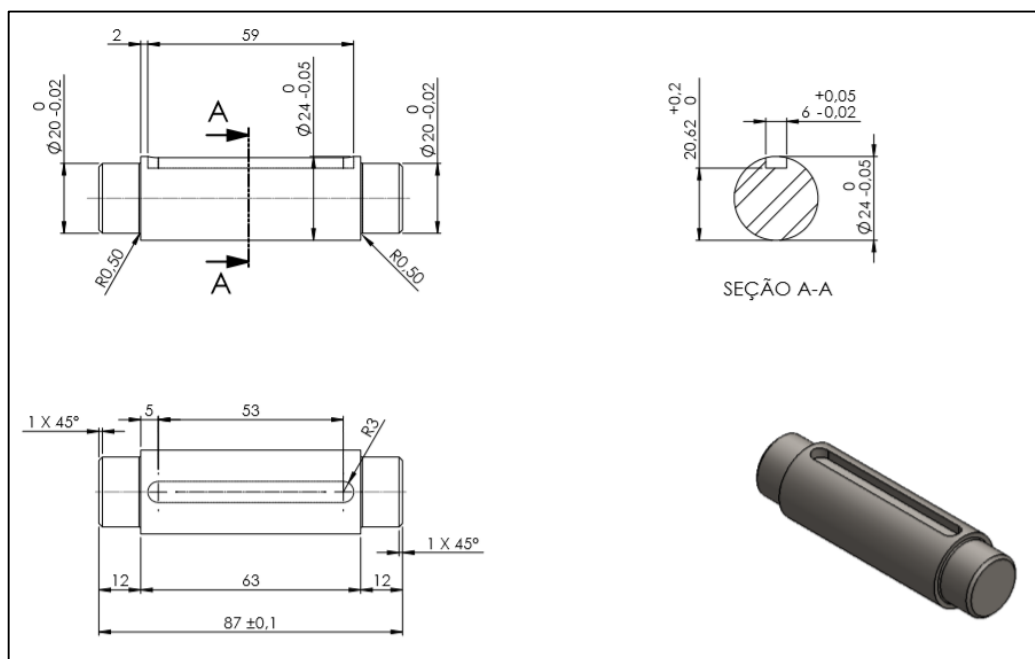
O componente a ser analisado para as situações acima citadas é exatamente o eixo de transmissão intermediário conforme mostra a Figura 21, esse eixo fica na caixa de engrenagens do protótipo permitindo o acoplamento e funcionamento das mesmas. A Figura 22 mostra todas as dimensões de projeto da peça requerida.

Figura 21 - Eixo de transmissão intermediário Baja SAE



Fonte: Autoria própria (2017)

Figura 22 - Dimensões



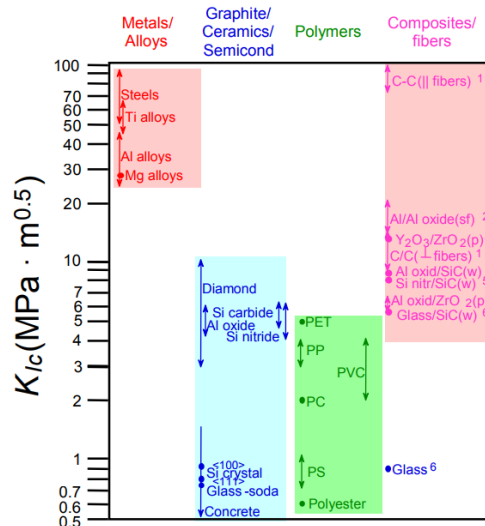
Fonte: Autoria própria (2017)

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Tamanho de trinca vs tensão aplicada em um eixo

Para que seja determinado o tamanho crítico de uma trinca nesse eixo usando os aços SAE 4340, SAE 1045 e SAE 1020, deve-se saber qual o K_{Ic} crítico para essas materiais e logo depois fazer uso da equação da mecânica da fratura linear elástica. Nesse caso foi encontrado para o aço SAE 4340 um valor próximo de $K_{Ic} = 66 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0,5}$, para o aço SAE 1045 um $K_{Ic} = 56 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0,5}$ e para o aço SAE 1020 um $K_{Ic} = 45 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0,5}$. A Figura 23 mostra a faixa de valores encontrados:

Figura 23 - Fatores intensidade de tensões



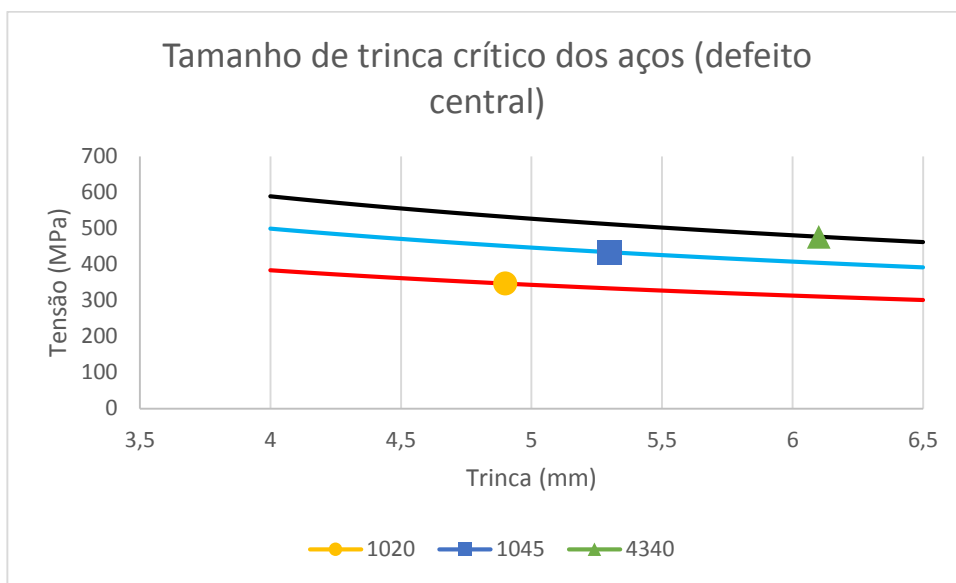
Fonte: (CALLISTER, 2009)

A Figura 17, 18 e 19 mostra que o fator geométrico se altera quando se varia o tamanho de trinca, então para se achar o tamanho crítico de trinca para cada material e em cada situação buscou-se variar a trinca com intervalos de 0,1 mm para que dessa forme se chegasse no objetivo principal.

A primeira situação é a trinca central no aço SAE 1020, onde foi analisada inicialmente uma trinca de 4,0 mm até 6,5 mm, o resultado encontrado foi um tamanho de trinca crítico de 4,9 mm, exatamente nesse ponto o material suporta uma tensão de 345 MPa e quanto maior for o tamanho de trinca na peça menor seria tensão suportada pelo material. A segunda análise foi para o aço SAE 1045 também com trinca central onde encontrou-se um tamanho de trinca crítico de 5,3 mm, onde com esse tamanho de trinca o material iria suportar uma tensão de 430

MPa e com um trinca maior que 5,3 mm o material já iria suportar uma tensão menor. A terceira análise para a situação de trinca central foi para o aço SAE 4340, onde encontrou-se um tamanho de trinca crítico de 6,1 mm. Com esse tamanho de trinca o material suporta uma tensão de 475 MPa e com o aumento do tamanho de trinca essa tensão que o material suporta diminui. A figura 24 mostra como se comportam os aços nessas situações.

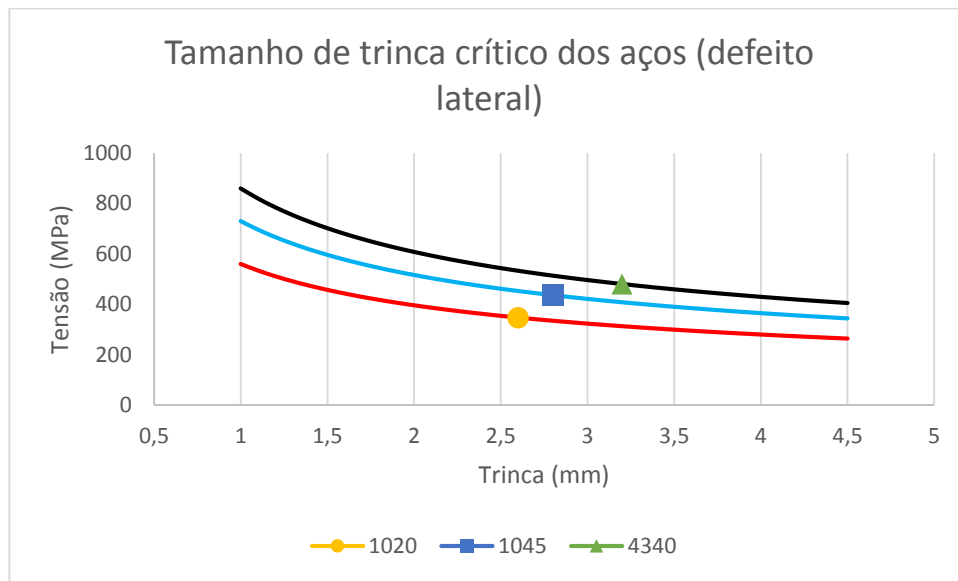
Figura 24 – Tamanho de trinca crítico (defeito central)



Fonte: Autoria própria (2017)

O próximo grupo de análises é para a situação de uma trinca lateral nos três tipos de materiais. Para o material de aço SAE 1020 chegou-se em um tamanho de trinca crítico de 2,6 mm, onde o material vai suportar uma tensão de 345 MPa para esse determinado tamanho de trinca, quando se aumenta a trinca a tensão que o material vai suportar diminui consideravelmente. Para o aço SAE 1045 chegou-se em um tamanho de trinca crítico de 2,8 mm, onde com esse tamanho de trinca o material iria suportar uma tensão de 430 MPa e com o aumento da trinca a tensão suportada iria diminuir. Para o aço SAE 4340 chegou-se em um tamanho de trinca crítico de 3,2 mm, onde com esse tamanho de trinca o material iria suportar uma tensão de 475 MPa e com o aumento da trinca a tensão suportada iria diminuir.

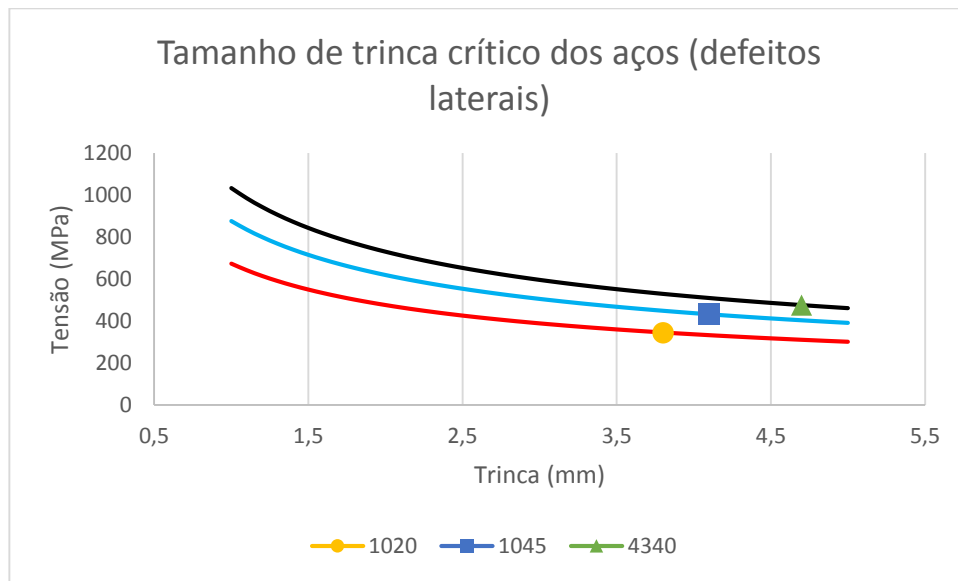
Figura 25 - Tamanho de trinca crítica (defeito lateral)



Fonte: Autoria própria (2017)

O terceiro grupo de análises para os três diferentes tipos de materiais é quando se tem duas trincas laterais. Para o aço SAE 1020 tem-se um tamanho de trinca crítica de 3,8 mm, onde com esse tamanho de trinca o material suporta uma tensão de 345 MPa e com o aumento de trinca essa tensão que o material suporta se reduz consideravelmente. Para o aço SAE 1045 chegou-se em um tamanho de trinca crítica de 4,1 mm, onde nessa situação o material suporta uma tensão de 430 MPa e com o aumento do tamanho de trinca essa tensão se reduz. Para o aço SAE 4340 chegou-se em um tamanho de trinca crítica de 4,7 mm onde nessa situação o material suporta uma tensão de 475 MPa e com o aumento do tamanho de trinca essa tensão se reduz. A figura 26 mostra a situação de duas trincas laterais para os aços SAE 1020, 1045 e 4340.

Figura 26 - Tamanho de trinca crítica (defeitos laterais)



Fonte: Autoria própria (2017)

Essas análises mostram que o material que apresenta uma maior tensão de escoamento apresentam sempre um maior tamanho de trinca admissível. Com relação aos tipos de defeitos, o que se comportou de melhor maneira foi o tipo de defeito central e com relação aos defeitos laterais, duas trincas laterais se comportam melhor que uma trinca lateral. A tabela 2 mostra todos os resultados, onde a cor vermelha destaca a pior situação e a azul a melhor.

Tabela 2 – Resultados dos tamanhos de trincas

	Trinca central (mm)	Trinca lateral (mm)	Trincas laterais (mm)
Aço SAE 1020	4,9	2,6	3,8
Aço SAE 1045	5,3	2,8	4,1
Aço SAE 4340	6,1	3,2	4,7

Fonte: Autoria própria (2017)

6.2 Análise de fadiga nos materiais

O próximo passo é encontrar a vida em fadiga até que a trinca se propague ao tamanho crítico para os materiais do tópico anterior fazendo uma análise de cada tipo de defeito e variando as tensões aplicadas.

Os dados para se obter a simulação do aço SAE 1020 para que uma trinca central de formato elíptico se propague de 1 mm até o tamanho de trinca crítica são encontrados na Tabela 3. Com as condições encontradas nessa tabela e com auxílio da equação já demonstrada de número 11, consegue-se obter os gráficos de ciclos aplicados e tamanho de defeito, percebendo assim como a trinca se propaga em função da tensão aplicada.

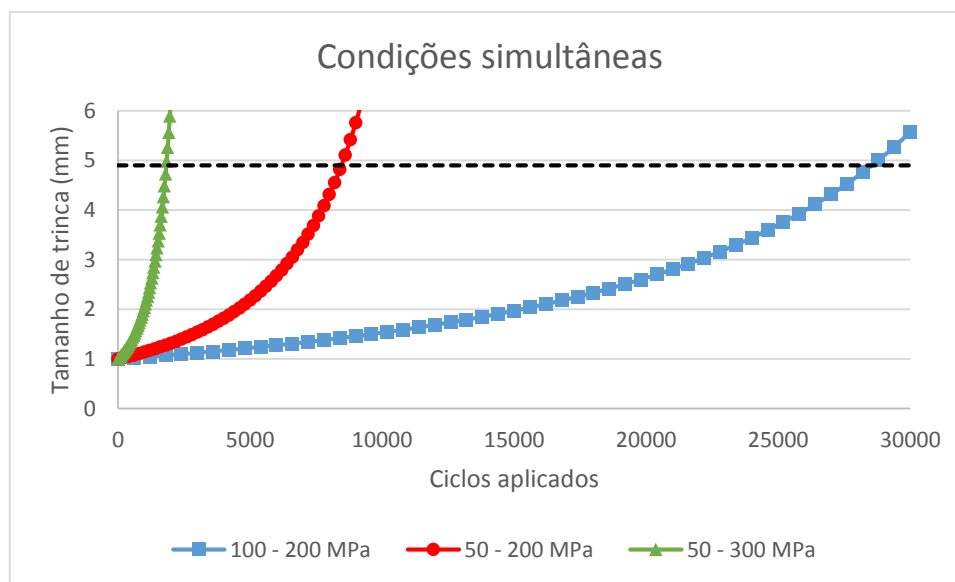
Tabela 3 - Condições para a simulação do aço SAE 1020 (Trinca central)

SIMULAÇÃO AÇO SAE 1020 (Trinca central, lateral e duas laterais)			
Simulações	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
Material	Aço SAE 1020	Aço SAE 1020	Aço SAE 1020
Tensão máxima (MPa)	200	200	300
Tensão mínima (MPa)	100	50	50

Fonte: Autoria própria (2017)

O gráfico seguinte representado pela Figuras 27 mostra os resultados para cada tipo de situação destacando em cada um deles a propagação da trinca até a ruptura do material:

Figura 27 - Condições simultâneas para uma trinca central

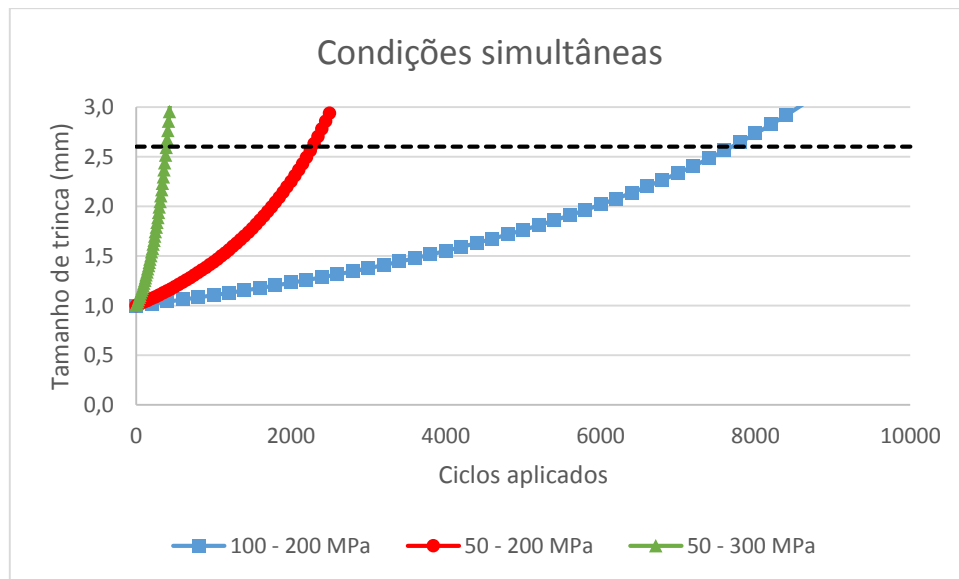


Fonte: Autoria própria (2017)

O resultado mostra que quando se tem uma maior variação entre as tensões mínimas e máximas, maior será a velocidade de propagação da trinca até que se chegue no tamanho crítico de 4,9 mm.

A próxima simulação é para o aço SAE 1020 com a condição de se ter uma trinca lateral e dessa forma analisar como a trinca se propaga de 1 mm até o tamanho crítico. Os dados para se obter essa simulação são os mesmos da tabela 1. O resultado das simulações são mostrados na figura 28.

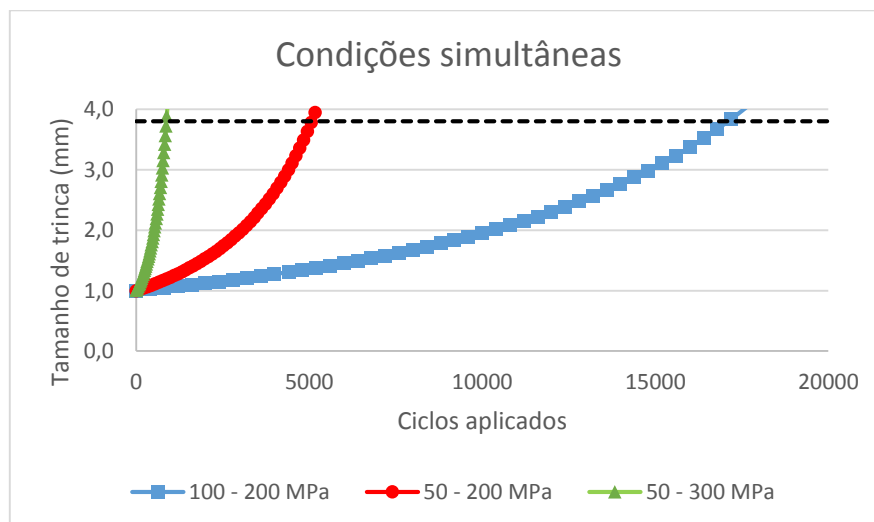
Figura 28 - Condições simultâneas para uma trinca lateral



Fonte: Autoria própria (2017)

A próxima simulação é para o aço SAE 1020 com a condição de se ter duas trincas laterais e dessa forma analisar como a trinca se propaga de 1 mm até o tamanho crítico. O gráfico da figura 29 mostra o resultado.

Figura 29 - Condições simultâneas para duas trincas laterais



Fonte: Autoria própria (2017)

Com essas análises feitas acerca do aço SAE 1020 em três diferentes tipos de situações pode-se perceber que com uma trinca central a velocidade de propagação de trinca é bem menor do que as outras duas situações, já com uma trinca lateral percebe-se uma maior velocidade de propagação da trinca, a outra situação é a intermediária. Uma mesma análise poderia ser feita mudando apenas o material, mas o objetivo já foi alcançado fazendo apenas a análise de um só material, pois assim verifica-se em qual situação a trinca irá se propagar de maneira mais rápida. A tabela 4 mostra a comparação entre os resultados.

Tabela 4 – Resultados de fadiga

	Trinca central (ciclos)	Trinca lateral (ciclos)	Trincas laterais (ciclos)
100 – 200 MPa	28200	7800	17300
50 – 200 MPa	8400	2300	5000
50 – 300 MPa	1840	400	970

Fonte: Autoria própria (2017)

Com esse resultado percebe-se que a vida em fadiga para que uma trinca se propague até o tamanho crítico depende das tensões cíclicas aplicadas.

7. CONCLUSÃO

A metodologia aplicada nesse trabalho se mostrou de forma eficiente, onde buscou-se saber o tamanho crítico de trinca em três diferentes materiais e em três diferentes situações, para se buscar os resultados foram feitas análises numéricas por meio de equações que foram demonstradas no trabalho fundamentada na teoria da mecânica da fratura.

O primeiro caso analisado foi o tamanho de defeito admissível, onde chegou-se a conclusão que um material de aço SAE 1020 tinha um tamanho de defeito crítico menor que os materiais de aço SAE 1045 e 4340 (isso se deve ao fato desse tipo de material possuir um menor limite de escoamento), dentro dessa mesma análise percebeu-se também que a situação de trinca central era a que admitia uma maior trinca crítica e uma trinca lateral admitia uma menor trinca crítica, até mesmo se comparado a duas trincas laterais, isso se deve ao fato do fator geométrico variar dependendo do tipo de defeito.

A outra análise foi exatamente a vida em fadiga nas três diferentes situações para uma trinca inicial de 1 mm, onde percebeu-se que a trinca central se comportou de maneira mais eficiente mais uma vez, pois a mesma admitia um maior número de ciclos até que a trinca se propagasse ao tamanho admissível, por fim uma trinca lateral admitia um menor número de ciclos.

Com relação a propagação das trincas e tamanho crítico, isso pode ser aplicado de forma bem direta no setor de manutenção de indústrias, pois uma peça trincada pode ainda ser usada até que a trinca chegue no seu tamanho crítico, evitando assim trocas prematuras de alguns componentes e quebras acidentais onde com essa aplicação a indústria teria uma melhoria em sua eficiência e assim tendo o plano de manutenção de alguns componentes melhorados.

BIBLIOGRAFIA

BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J. Keith. **Elementos de máquina de Shigley**. 8. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011.

CALLISTER. JUNIOR, William D.. **Ciência e Engenharia de Materiais**. Sétima edição Rio de Janeiro: Ltc, 2009.

Fortes, C. **Mecânica da fratura**, ESAB BR, 2003.

NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas: Uma abordagem integrada**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

ROSA, Edison da. **ANÁLISE DE RESISTÊNCIA MECÂNICA**. Primeira edição Santa Catarina: Grante, 2002.

Strohaecker, T. **Mecânica da fratura**, PPGEM-UFRGS, Porto Alegre, 1999.