



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMIÁRIDO.
CENTRO DE ENGENHARIAS – CAMPUS MOSSORÓ.
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CAMILA ELNATANA RAMOS DOS SANTOS

**ESTUDO TEÓRICO DA PROPAGAÇÃO DE TRINCA POR FADIGA EM
COMPONENTES BASEADA NA MECÂNICA DA FRATURA**

Mossoró-RN

2018

CAMILA ELNATANA RAMOS DOS SANTOS

**ESTUDO TEÓRICO DA PROPAGAÇÃO DE TRINCA POR FADIGA EM
COMPONENTES BASEADA NA MECÂNICA DA FRATURA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro de engenharias – CE da Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA - Campus Mossoró como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel(a) em Engenharia mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Fabrício José Nóbrega Cavalcante.

Mossoró-RN

2018

© 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.

S237e Santos, Camila Elnatana Ramos .
ESTUDO TEÓRICO DA PROPAGAÇÃO DE TRINCA POR
FADIGA EM COMPONENTES BASEADA NA MECÂNICA DA
FRATURA / Camila Elnatana Ramos Santos. - 2018.
65 f. : il.

Orientador: Fabrício José Nóbrega Cavalcante
José Nóbrega Cavalcante.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Mecânica, 2018.

1. Fadiga. 2. Falha. 3. Mecânica da fratura. 4.
Descontinuidade. I. José Nóbrega Cavalcante,
Fabrício José Nóbrega Cavalcante, orient. II.
Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

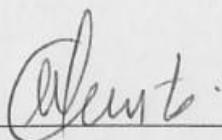
CAMILA ELNATANA RAMOS DOS SANTOS

**ESTUDO TEÓRICO DA PROPAGAÇÃO DE TRINCA POR FADIGA EM
COMPONENTES BASEADA NA MECÂNICA DA FRATURA**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Centro de engenharias- CE da
Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA - Campus Mossoró para a obtenção do
título de Bacharel (a) em Engenharia mecânica.

Aprovado em: 14 de Setembro de 2018.

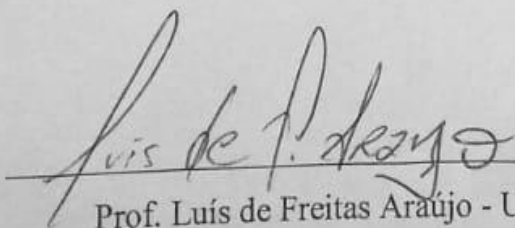
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Fabrício José Nóbrega Cavalcante - UFERSA



Prof. Dr. Zoroastro Torres Pilar - UFERSA



Prof. Luís de Freitas Araújo - UFERSA

É algo assustador encarar o desconhecido do início de novos ciclos em nossa vida, mas paremos hoje para admirar o belo e infinito mar de possibilidades que ele traz consigo!

Camila Elnatana

AGRADECIMENTOS

Ao meu Deus e pai, por cuidar e guiar meus passos com sua infinita bondade e sabedoria, sei que uma vida inteira de louvor e gratidão não será suficiente, por isso, sou grata daqui a eternidade.

Aos meus pais, por me tornarem a pessoa que sou, por se dedicarem a mim de forma incansável e persistente. Eu sou o reflexo dessas pessoas incríveis que me deram um lar feliz do qual sinto tantas saudades. Amo vocês de todo meu coração.

Aos meus tios, Juvenal Martins e Joselita Soares por contribuírem na minha formação de forma tão efetiva, vocês são anjos enviados por Deus para minha vida e eu jamais chegaria até aqui sem o auxílio e proteção que me concederam. Serei sempre grata.

Aos meus avôs e avós por tanto amor e conhecimento destinados a mim, obrigada pelas orações que me tornaram tão abençoada. Amo vocês incondicionalmente.

As minhas tias Roseane Lima, Rosemere Siqueira, Sara Beserra e ao meu tio Cesar Silva por estarem ao meu lado durante toda minha vida, me aconselhando e auxiliando em todas e quaisquer dificuldades. Além de todo carinho e amor destinados a mim.

A toda minha família pelo precioso amor e apoio que me faz seguir em frente. Em especial aos meus irmãos que tanto amo.

As minhas amigas que tenho como irmãs Camila Gabrielle e Quezia Lima, por todo carinho e amizade, que me proporcionaram momentos felizes e valiosos.

A todos os meus amigos, Isaac Esdras, André Cefas e Victor Menezes por serem os melhores parceiros de estudos e por estar sempre disposto a me ajudar. Obrigada a todos por todas as alegrias.

Ao meu lindo namorado, Pedro Vinicius por tanto esforço e dedicação a minha pessoa, pelos conselhos e conhecimentos transmitidos a mim, por todo apoio emocional que me fez superar os momentos mais difíceis. Obrigada!

Agradeço ao professor Fabrício Cavalcante que se disponibilizou para me orientar no meu projeto, e por toda ajuda e confiança a mim dedicadas.

RESUMO

A fadiga é um tipo de falha que ocorre em estruturas que são submetidas a repetidos ciclos mecânicos ou termomecânicos de tensão ou deformação. Esse fenômeno pode ser observado nas mais diversas estruturas, desde um eixo automotivo a uma aeronave, ou pontes e outros elementos mecânicos. A fadiga é responsável por 90% em média de todas as falhas metálicas, isso acontece devido a negligência com que tratam o assunto, além disso, a área de estudos da fadiga é considerada multidisciplinar, que exige do engenheiro conhecimentos em metalúrgica, ciência dos materiais, mecânica, processos de fabricação, simulação computacional e testes de laboratório, o que dificulta seu estudo. Porém, existem métodos de analisa-la e quantifica-la a fim de prever suas falhas, essa previsão dará confiabilidade ao componente, algo que, em componentes que podem por em risco a vida humana, é imprescindível. Além da confiabilidade, prever a vida útil de um equipamento, trás economia, visto que não trará os imprevistos que ocorrem em situações de falha inesperada. Pra esse estudo contaremos com a metodologia da Mecânica da fratura que prevê falhas causadas por fadiga em componentes submetidos a esforços cíclicos. A Mecânica da fratura faz essa previsão de acordo com o tamanho e a localização da descontinuidade inicial do componente, com essas informações poderemos prever seu desenvolvimento até que sua possível falha seja iminente.

Palavras- chave: Fadiga, Falha, Mecânica da fratura, descontinuidade.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Aspecto físico de uma fratura dúctil.....	14
Figura 2- Aspecto físico de uma fratura frágil	15
Figura 3- Curva tensão-deformação de um material dúctil e um frágil.	15
Figura 4- Formas fundamentais para a carga opera sobre uma trinca.....	19
Figura 5- Estrias de fadiga na superfície da ruptura de uma liga de alumínio. O espaçamento entre as estrias corresponde ao modelo de carregamento cíclico e com uma ampliação de 12000×.....	22
Figura 6- Duas peças que falharam sob fadiga: (a) Eixo com rasgo de chaveta de aço 1040 que falhou sob flexão rotativa. A trinca teve início no rasgo de chaveta.(b) Eixo de manivela do motor diesel, falhou sob torção e flexão combinadas. A trinca iniciou na seta.....	22
Figura 7- Dimensões do corpo de prova no teste de resistência à fadiga.....	24
Figura 8- Diagrama S-N traçado com base nos resultados obtidos no ensaio de fadiga axial do aço UNS G41 300, normalizado.....	24
Figura 9- Ciclos de histerese da tensão verdadeira.	25
Figura 10- Gráfico log-log mostrando como a vida de fadiga se relaciona com a amplitude da deformação verdadeira para aço 1020 laminado a quente.....	26
Figura 11- a) ilustra um carregamento de amplitude constante; b) ilustra um carregamento de amplitude variável definido por blocos de amplitude constante; c) ilustra um carregamento aleatório.	28
Figura 12- Aumento no comprimento da trinca a a partir do comprimento inicial como uma função da contagem de ciclos para três intervalos de tensão, $(\Delta\sigma)_3 > (\Delta\sigma)_2 > (\Delta\sigma)_1$	30
Figura 13- Log da/dN versus Log ΔK	30
Figura 14- Fluxograma mostrando quais parâmetros precisam ser definidos para a determinação do crescimento da trinca e da vida útil do componente.	33
Figura 15- Placa retangular com 0,1m×0,2m de dimensão.....	35
Figura 16- Placa retangular submetida a tensões cíclicas de tração na longitudinal.....	36
Figura 17- Placa retangular submetida a tensões cíclicas de tração na longitudinal com uma trinca na superfície.....	37
Figura 18- Gráfico do fator β em função das dimensões de uma placa retangular.....	38

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Comparativo entre as curvas de crescimento de trinca versus número de ciclos de vida do Aço SAE 4140.	44
Gráfico 2- Comprimento da trinca inicial versus número de ciclos para o Aço SAE 4140.	45
Gráfico 3- da/dN versus a variação do fator de intensidade de tensão para $R=0$ do Aço SAE 4140.	46
Gráfico 4- da/dN versus a variação do fator de intensidade de tensão para $R=0,15$ do Aço SAE 4140.	46
Gráfico 5- da/dN versus a variação do fator de intensidade de tensão para $R=0,25$ do Aço SAE 4140.	47
Gráfico 6- da/dN versus a variação do fator de intensidade de tensão para $R=0,35$ do Aço SAE 4140.	47
Gráfico 7- Comparativo das curvas de propagação da trinca para diferentes razões de tensão do Aço SAE 4140.	48
Gráfico 8- Número de ciclos pela variação dos intervalos de tensão.	49
Gráfico 9- Comparativo entre as curvas de crescimento de trinca versus número de ciclos de vida do Aço SAE 4340.	50
Gráfico 10- Comprimento da trinca inicial versus número de ciclos para o Aço SAE 4340.	51
Gráfico 11- da/dN versus a variação do fator de intensidade de tensão para $R=0$ do Aço SAE 4340.	52
Gráfico 12- da/dN versus a variação do fator de intensidade de tensão para $R=0,15$ do Aço SAE 4340.	52
Gráfico 13- da/dN versus a variação do fator de intensidade de tensão para $R=0,25$ do Aço SAE 4340.	53
Gráfico 14- da/dN versus a variação do fator de intensidade de tensão para $R=0,35$ do Aço SAE 4340.	53
Gráfico 15- Comparativo das curvas de propagação da trinca para diferentes razões de tensão do Aço SAE 4340.	54
Gráfico 16- Número de ciclos pela variação dos intervalos de tensão para o Aço SAE 4340.	55

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVOS	12
1.1.1 Objetivo geral.....	12
1.1.2 Objetivos específicos.....	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1 MECANISMOS DE FRATURA	16
2.2 FADIGA	19
2.2.1 Métodos principais de vida sob fadiga.....	23
2.2.2 Métodos tensão-vida	23
2.2.3 Métodos deformação-vida.....	25
2.3 MECÂNICA DE FRATURA LINEAR ELÁSTICA.....	27
2.3.1 Crescimento de trinca	29
3 METODOLOGIA.....	32
3.1 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS INICIAIS.....	33
3.1.1 Definição do material.	34
3.1.2 Dimensões do componente.	35
3.1.3 Tipo de carregamento.	35
3.1.4 Tamanho e localização da trinca.....	36
3.2 DETERMINAÇÃO DO FATOR DE MODIFICAÇÃO DA INTENSIDADE DE TENSÃO.	37
3.3 DETERMINAÇÃO DO FATOR DE INTENSIDADE DE TENSÃO (ΔKI).	39
3.4 DETERMINAÇÃO DAS CONSTANTES C E m	39
3.5 CÁLCULO DO CRESCIMENTO DA TRINCA EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE CICLOS DE VIDA.....	40
3.6 ESTIMATIVAS DA CURVA DE PROPAGAÇÃO DE TRINCA POR FADIGA	40
3.7 ANÁLISE DO NÚMERO DE CICLOS DE VIDA COM A VARIAÇÃO DA TRINCA INICIAL.	41
3.8 ANÁLISE DO NÚMERO DE CICLOS COM A VARIAÇÃO DO INTERVALO DE TENSÃO	41
4 RESULTADOS	43
4.1 ANÁLISE DO AÇO SAE 4140	43
4.2 ANÁLISE DO AÇO SAE 4340	49

5 CONCLUSÃO.....	56
REFERENCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

Com os grandes avanços científicos na área de experimentos e métodos numéricos, as falhas em estruturas tiveram uma significativa redução, porém continuam a acontecer. A fadiga é um tipo de falha que ocorre em estruturas que são submetidas a repetidos ciclos mecânicos ou termomecânicos de tensão ou deformação. Esse fenômeno pode ser observado nas mais diversas estruturas, desde um eixo automotivo a uma aeronave, ou pontes e outros elementos mecânicos.

Segundo Zavanelli (1999) a fadiga é responsável por 90% em média de todas as falhas metálicas, isso acontece devido a negligência com que tratam o assunto, além disso, a área de estudos da fadiga é considerada multidisciplinar, que exige do engenheiro conhecimentos em metalúrgica, ciência dos materiais, mecânica, processos de fabricação, simulação computacional e testes de laboratório, o que dificulta seu estudo. Estudo esse, que apresenta alguma pertinência a nível nacional, pois o Brasil é um país que possui e constrói diversos tipos de estruturas metálicas que são submetidas a repetidos ciclos mecânicos ou termomecânicos, nomeadamente pontes metálicas, reservatórios sob pressão, etc.

O mecanismo de fadiga compreende as seguintes fases sucessivas: nucleação ou iniciação da fissura de fadiga, propagação dessa fissura, e ruptura final. A primeira fase que ocorre apartir de uma pequena trinca, que mesmo imperceptível a olho nu, pode estar presente no material desde a manufatura. Essas trincas geralmente têm início em um entalhe ou em outro elemento de concentração de tensão e continuará a crescer enquanto tensões de tração cíclicas e/ou fatores de corrosão de severidade suficiente estiverem presentes. Assim, é fundamental que peças dinamicamente carregadas sejam projetadas para minimizar a concentração de tensões.

Veremos aqui como a variação do tipo de carregamento e de outros parâmetros como tamanho e forma da trinca inicial pode afetar a vida útil de um componente submetido a esforços cíclicos.

Com a crescente preocupação com a integridade física das pessoas, a falha em componentes estruturais dentro ou fora das indústrias é um fator preocupante na atualidade de uma sociedade cada vez mais preocupada com o assunto. Dessa forma, o estudo minucioso de falhas por fadiga, visto que é responsável por 90% em média de todas as falhas metálicas, se tornou imprescindível na tentativa da redução desse percentual e consequente preservação da vida, além claro que evitar prejuízos econômicos para as empresas.

Por isso, introduziremos esse estudo preliminar em componentes submetidos a esforços cíclicos, considerando que já exista uma falha inicial já conhecida no material. Como descontinuidades no material é algo inevitável que ocorre devido a vários fatores, esta consideração é pertinente.

Apartir do conhecimento das variáveis de entrada como a intensidade e o tipo de carregamento, a localização e o tamanho da trinca inicial, poderemos analisar o desenvolvimento da trinca e prever a falha do componente. Para essa análise cálculos analíticos serão suficientes para essa previsão.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo analisar o crescimento de uma trinca de tamanho e localização previamente conhecida, em um componente submetido a carregamentos cíclicos, cujo material e propriedades também são conhecidos. Além de, analisar como essa trinca se comporta quando o componente é submetido a diferentes intervalos de tensão. Apartir dessas análises, definir sua vida útil em números de ciclos para diferentes tensões cíclicas e comprimentos iniciais de trinca.

1.1.2 Objetivos específicos

- Apresentar fluxograma dos parâmetros que precisam ser definidos para realizar a análise;
- Selecionar os parâmetros que serão utilizados;
- Realizar a análise através de cálculos analíticos propostos pela Mecânica da fratura;
- Analisar os dados obtidos;
- Demonstrar graficamente os resultados obtidos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Falhas em estruturas é um infortúnio bastante frequente e preocupante no ambiente industrial, pois além de oferecer risco a integridade física das pessoas traz grandes perdas financeiras para as empresas. Acontecimentos assim são conhecidos pelo homem desde as primeiras criações de componentes estruturais, por isso com o passar o tempo, o homem passou a investigar as causas dessas falhas.

Para entender melhor esse problema é necessário questionar porque os componentes apresentam falha e qual evento a esta provocando. Em resposta temos que aparentemente as estruturas falham, pois estão sendo submetidas a tensões que excedem a sua resistência limite, ou seja, uma peça pode falhar se suas deformações e distorções foram grandes o suficiente para que não funcione adequadamente ou para sofrer a ruptura e se separar. Já o tipo de evento que proporciona a falha, segundo Norton (2013), dependerá de três fatores: do material, do tipo de carregamento e da presença ou não de defeitos no material.

Outro conceito importante de se ter em mente para compreender a fratura é a ductilidade que segundo Norton (2013) representa uma medida do grau de deformação plástica que o material suporta antes de ocorrer à ruptura. A forma mais comumente utilizada para quantificar a ductilidade foi explanada por Fischer e Yen. (1972) como sendo o percentual de alongação do material até a ruptura, que, se $> 5\%$, é considerado dúctil. A maioria dos metais dúcteis tem alongação até a ruptura $> 10\%$. Quando um material não for considerado dúctil será chamado de material frágil.

Materiais dúcteis apresentaram a falha como uma fratura dúctil já os materiais caracterizados como frágeis sofreram fratura frágil. Esses são os dois tipos de falha definidos pelo tipo de material. Porém esse conceito é válido em situações de carregamento estático, pois em carregamento dinâmico a fratura sempre será frágil, tanto para os materiais dúcteis quanto para os frágeis.

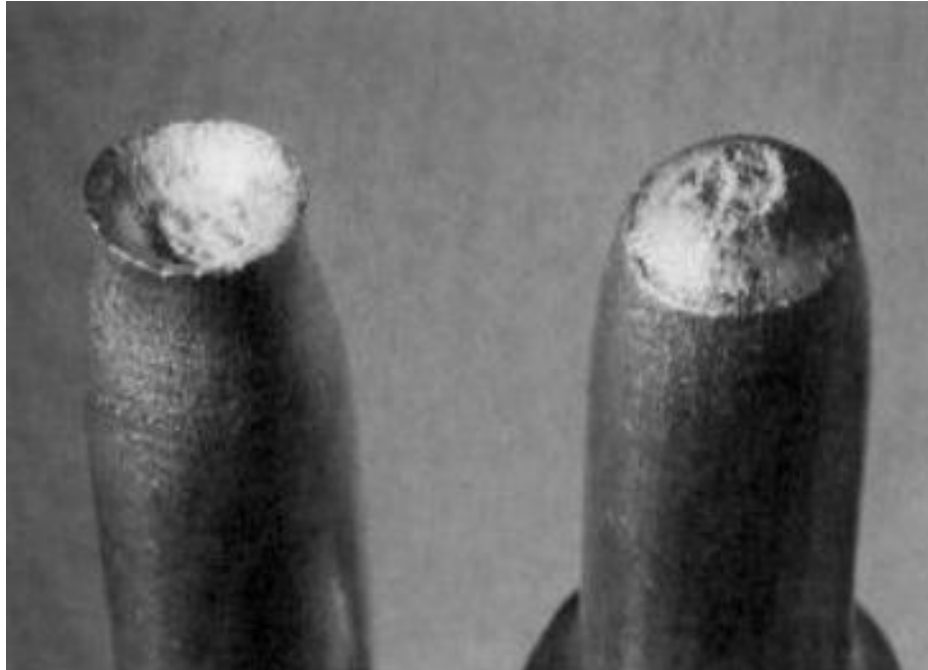
Para a melhor compreensão, explanaremos melhor a seguir os conceitos de fratura frágil e fratura dúctil a seguir:

- Fratura dúctil

Com isso, temos então que segundo Norton (2013) a *fratura dúctil* é caracterizada por uma considerável deformação plástica causando redução na área antes de romper, além disso, apresenta um crescimento da trinca consideravelmente constante e estável. A aparência dessa fratura pode ser diferenciada das demais por ser irregular, fibrosa, aspecto fosco e com grande

retração lateral formando micro vazios e lábios de cisalhamento na região da fratura. A sua forma geral é como na Figura 1 a seguir:

Figura 1- Aspecto físico de uma fratura dúctil.



FONTE: (CALLISTER, 2007)

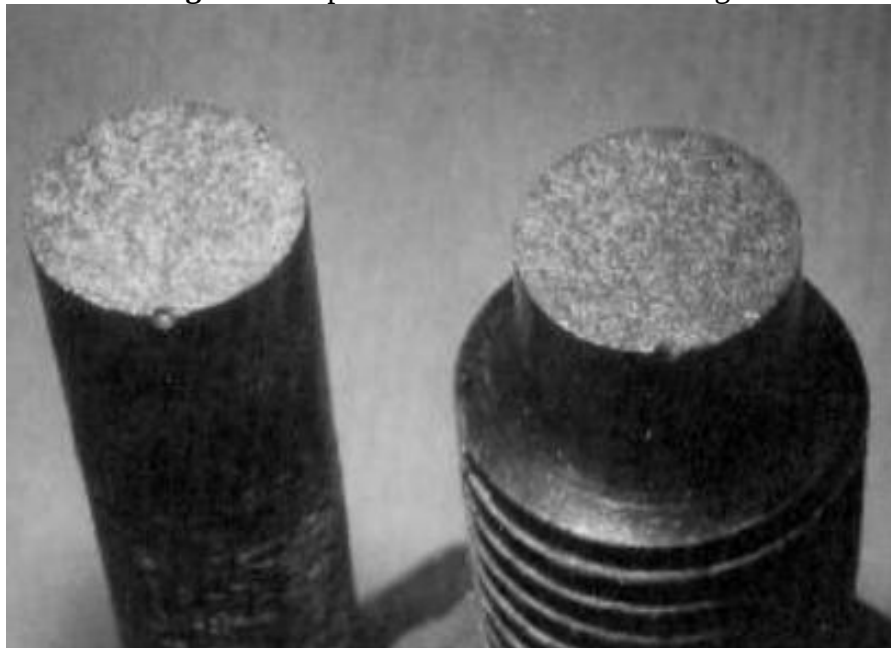
Na Figura 1 acima podemos ver que a fratura dúctil possui uma forma característica que é um lado da fratura tem formato de cone e o outro possui formato semelhante a uma bacia.

- Fratura frágil

A *fratura frágil* é caracterizada por Norton (2013) por não ter essa fase de deformação plástica, e a peça rompe sem avisar, pois as trincas se propagam de forma brusca e rápida. Requer menos energia, pois não ocorre quase nenhuma deformação plástica. Ao contrário da fratura dúctil que consome energia para o movimento de discordâncias e imperfeições no material. O crescimento da trinca na fratura frágil é instável e a aparência da fratura é brilhante.

O aspecto físico da fratura frágil é bastante diferente da fratura dúctil, pois não existe toda aquela deformação plástica do material, ele simplesmente rompe sem haver significativas deformações. Sua aparência pode ser melhor compreendida com a Figura 2 a seguir:

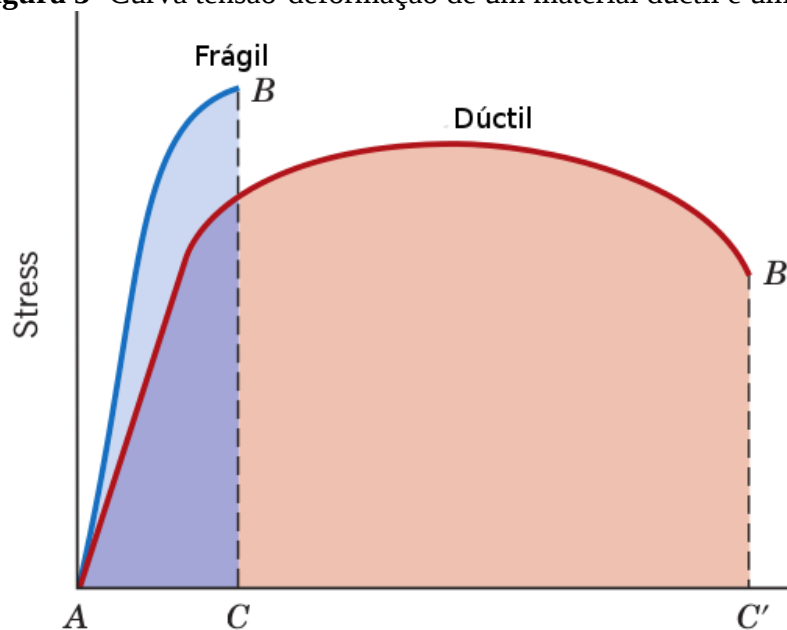
Figura 2- Aspecto físico de uma fratura frágil



FONTE: (CALLISTER, 2007)

Para entender melhor a diferença entre essas duas fraturas, veremos abaixo as curvas tensão-deformação de cada uma delas.

Figura 3- Curva tensão-deformação de um material dúctil e um frágil.



FONTE: (CALLISTER, 2007)

Na curva podemos observar no eixo das abcissas que o material apresenta pouca deformação antes de romper, caracterizando uma fratura frágil, em contraste com a curva

vermelha que apresenta grande deformação antes da ruptura, caracterizando uma fratura dúctil.

Feita a classificação pelo tipo de material, mostraremos os tipos de fratura de acordo com o tipo de carregamento, que pode ser estático ou dinâmico. Nessa seção nos deteremos a explicar as falhas causadas por carregamento estático.

Segundo Norton (2013) em materiais dúcteis a falha em carregamento estático será formulada pela **teoria da energia de distorção**, também chamada de **teoria de Von Mises**, cujas resistências à compressão e à tração são aproximadamente as mesmas e cuja resistência ao cisalhamento é menor que a resistência à tração. Considera-se que esses materiais falhem por cisalhamento, e a teoria da energia de distorção melhor prediz suas falhas.

Em contrapartida, os materiais frágeis se rompem em vez de escoarem e sua ruptura frágil pode ser sob tração ou sob compressão. Segundo Norton (2013) uma ruptura frágil sob tração se deve apenas à tensão normal de tração, e por isso a **teoria da máxima tensão normal** é aplicável neste caso, já uma ruptura frágil sob compressão se deve a alguma combinação de tensão normal de compressão e de tensão de cisalhamento, e requer uma teoria de falha diferente.

Com base nisso, as falhas em materiais frágeis serão formuladas e melhor definidas para todas as condições de carregamento pela teoria de Mohr modificada, usada como combinação das teorias. A teoria de Mohr modificada irá descrever melhor essas falhas, sob a observação de que suas resistências à tração são muito inferiores às suas resistências à compressão, e suas resistências ao cisalhamento estão entre estes dois valores. Sendo estes são mais fracos sob tração.

2.1 MECANISMOS DE FRATURA

Assim foram criados os conceitos tradicionais de resistência dos materiais baseados em propriedades como resistência ao escoamento ou resistência à ruptura. Esses conceitos não levam em consideração a tenacidade à fratura do material que é a propriedade que define e quantifica a resistência a propagação de uma trinca segundo a mecânica da fratura. Porém nessa seção será necessário já que trataremos da fratura em materiais que são heterogêneos e não isotrópicos, diferentemente da anterior.

Com a necessidade de estudar a propagação de trincas e fissuras foi que surgiu a mecânica da fratura que leva em consideração componentes contendo defeitos ou trincas, ou

seja, sob condições semelhantes às encontradas na prática, estudando assim, os processos mecânicos que contribuem para o aumento de trincas, fissuras, fendas e outros defeitos através da tenacidade, que como foi comentado anteriormente, é a propriedade de quantificar essa resistência à propagação de uma trinca.

A importância desse estudo, portanto, se deve ao fato de que a propagação dessas fissuras e defeitos influencia diretamente na resistência do material, podendo levar o componente a ruptura, além do fato deles não poderem ser evitados nas estruturas, mesmo que tenha um processo de fabricação estritamente rigoroso, até mesmo pelo fato de que alguns defeitos serem inerentes ao material.

O estudo da mecânica da fratura foi iniciado por Alan Arnold Griffith e tem como objetivo quantificar a propagação de trincas em materiais, relacionando as propriedades do material, obtidas experimentalmente, o nível das tensões atuantes no componente, obtidas através da análise estrutural executada a partir dos carregamentos a serem aplicados na estrutura, e como diferencial aos outros métodos, a presença de defeitos existentes na estrutura. Através do conhecimento desses três fatores é possível avaliar a resistência do material à fratura e a força motriz de crescimento de trinca.

Qualquer componente frágil contém falhas, como trincas, que podem ser microtrincas ou macrotrinca e quando esse componente é submetido a uma tensão externa ele não poderá dissipar essa tensão na forma de deformação plástica, por isso, a ponta da microtrinca atuará como concentrador de tensão, causando um aumento gradativo da tensão nesse local até o momento em que atingir a resistência do material e romper. A mecânica da fratura possui duas vertentes de estudo: A Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) e a Mecânica da Fratura Elasto-Plástica (MFEP). (GRIFFITH, 1920)

A MFLE assume que a maior parte do material está se comportando de acordo com a lei de Hooke e surgiu para suprir as limitações dos conceitos tradicionais, em estruturas relativamente frágeis, visto que não podiam quantificar o comportamento da falha em materiais com descontinuidades internas ou superficiais, para isso esse estudo introduz o conceito de fatores de intensidade de tensão.

Nessa primeira teoria criada por Griffith em 1920, para o estudo de trincas, ele mostrou que a energia de deformação superficial é quantificada através da seguinte equação para materiais frágeis:

$$\sigma_c = \left(\frac{2 \times E \times \gamma_s}{\pi \times a} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Sendo,

σ_c : Tensão crítica

E : Módulo de elasticidade

γ_s : Energia de superfície específica

a : Metade do comprimento de uma trinca interna

Já a MFEP por sua vez surgiu para suprir as limitações que a MFLE apresenta para materiais dúcteis, essa limitação se dá pelo de que em materiais dúcteis a zona plástica possui o tamanho significativo em relação às dimensões do componente, invalidando as tensões elásticas na ponta da trinca controlando o processo de fratura.

Por isso, para calcular a tensão crítica em materiais que apresentam deformação plástica, foi adicionado um termo na equação 2:

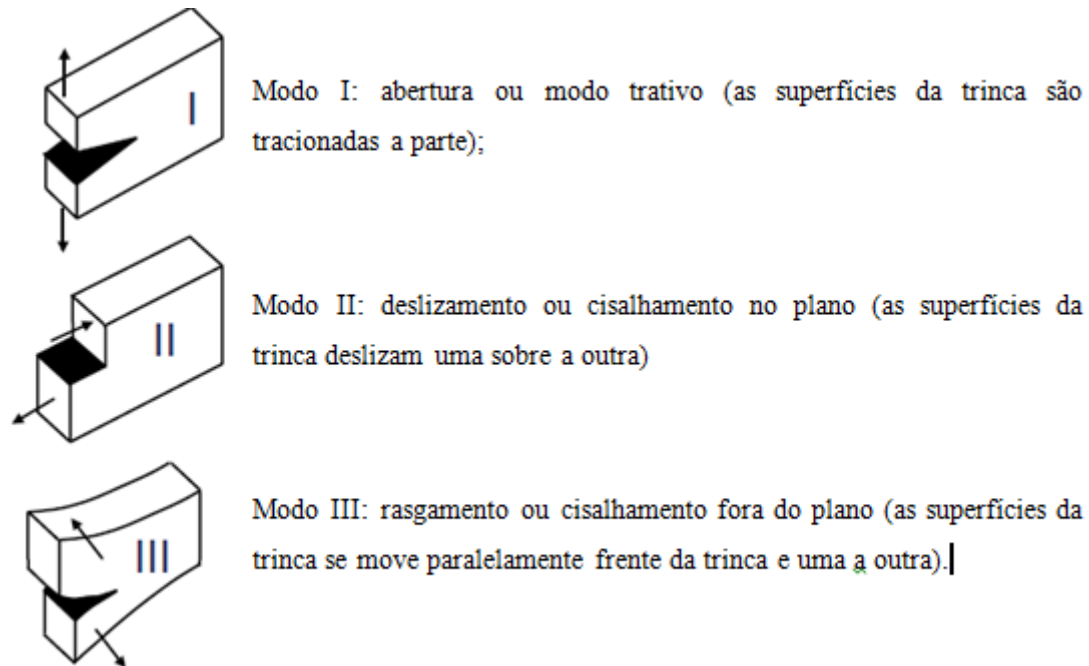
$$\sigma_c = \left(\frac{2 \times E \times (\gamma_s + \gamma_p)}{\pi \times a} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Sendo,

γ_p : taxa crítica de liberação de energia.

Griffith (1920) explica ainda que existem três formas fundamentais, segundo as quais a carga pode operar sobre uma trinca, e cada uma irá afetar um deslocamento diferente da superfície da trinca. Poderemos entender melhor observando a Figura 4 a seguir:

Figura 4- Formas fundamentais para a carga opera sobre uma trinca.



FONTE: (RUCHERT, 2014)

2.2 FADIGA

Agora estudaremos fratura em materiais submetidos a carregamentos que variam no tempo, de forma cíclica ou não. Nessas situações o material rompe com tensões muito inferiores à correspondente à resistência à tração (determinada para cargas estáticas).

Esse fenômeno se chama fadiga e é uma das causas mais comuns de ruptura em engenharia sendo responsável por aproximadamente 90% de todas as falhas de metais, bastante comum em pontes, aviões e componentes de máquinas, afetando também polímeros e cerâmicas.

O nome fadiga foi aplicado por *Poncelet* em 1839. Quando descrevia as falhas ocorridas em eixos de um vagão ferroviário em 1800, com um curto período de funcionamento. Nessa época o fenômeno da fadiga ainda não era bem compreendido e com base nos incidentes no vagão ferroviário acreditava-se que o material estava cansado ou fragilizado devido às solicitações cíclicas, e foi a partir desse pensamento que surgiu o termo fadiga.

Esse tipo de fratura resulta do crescimento de fendas em componentes sujeitos a esforços alternados, que podem ser de tração, tração e compressão, flexão ou torção. Como sua origem se dá a partir de um entalhe ou outro concentrador de tensão, como imperfeições

no material introduzidas nos seus processos de fabricação ou de manufatura, todo material que sofre esforços alternados possivelmente sofrerá as consequências desse efeito, pois como Fischer e Yen. (1972) mostraram que, praticamente todas as partes de uma estrutura contêm descontinuidades, variando de microscópicas ($<0,010$ in) até macroscópicas.

Por isso, com frequência componentes mecânicos apresentam falha e quando analisados observa-se que as tensões reais máximas a que estavam sendo submetidos estava bem abaixo da resistência ao escoamento do material, porém estava sob a ação de tensões repetidas ou flutuantes. A característica mais distinguível dessas falhas é que as tensões foram repetidas várias vezes. Daí a falha ser denominada falha por fadiga.

Além da característica citada, outra característica distinguível da fadiga é sua natureza frágil e repentina, mesmo em materiais dúcteis, portanto, as fraturas por fadiga terão pouca deformação plástica generalizada associada com a falha.

O processo de falha acontece inicialmente com uma microtrinca que cresce formando uma macrotrinca que concentra tensão e no geral a superfície de fratura é perpendicular à direção de uma tensão de tração aplicada sem a presença do fenômeno da estricção, já que a natureza da fratura é frágil. Dessa forma, o mecanismo de fadiga, acontece em três fases, que são os estágios para a propagação da trinca:

- Estágio de início da trinca:

A falha se inicia devido a uma concentração de tensão devido às oscilações da tensão em algum entalhe, vazios ou inclusões na peça. Nesse caso, ocorre o escoamento local, mesmo quando as tensões estão bem abaixo da tensão de escoamento do material.

Este estágio se inicia com uma ou mais microtrincas geradas pela formação de bandas de deslizamento, nucleação e crescimento das microtrincas, que até este momento não são visíveis a olho nu e à medida que os ciclos de tensão ocorrem, bandas de deslizamento adicionais aparecem e agrupam-se em trincas microscópicas.

Portanto é sabido que entalhe, vazios ou inclusões na peça intensificam a tensão atuante no local, porém mesmo em peças com a superfície plana que não contenha concentrador de tensão a fadiga ainda pode ocorrer, se o limite de escoamento do material for excedido em alguma região da peça.

Esse primeiro estágio será diferente para materiais dúcteis e para os frágeis, pois em materiais dúcteis o escoamento é mais fácil e a propagação de trincas é mais rápida, já os materiais frágeis não possuem a habilidade de escoar, podendo não existir o estágio inicial na peça.

- Estágio de propagação da trinca

Após o estágio inicia de formação de microtrincas, inicia-se o estágio de propagação de trinca que ocorre com a concentração de tensões maiores na trinca mais pontiaguda, e assim, se desenvolve a propagação da micro para a macro trinca. Cada vez que uma tensão de tração a alonga, ela tende a crescer.

Como o crescimento da trinca se deve as tensões de tração, caso a tensão de tração seja interrompida, o escoamento tenderá a cessar e a trinca estabiliza, tornando-se novamente pontiaguda só que agora com um comprimento maior. Por isso, componentes que sejam submetidos apenas a tensões de compressão não irão sofrer fadiga, visto que a compressão só contribui para fechar a trinca.

A propagação da trinca é a fase mais lenta do processo, pois seu crescimento é da ordem de 10^{-8} a 10^{-4} por ciclo, porém se torna significativa com um grande número de ciclos. Sua velocidade de crescimento é consideravelmente maior se o componente estiver em um meio corrosivo, de tal forma que se uma peça contendo uma trinca estiver em um meio corrosivo, a trinca irá crescer mesmo estando submetida apenas a tensões estáticas. (NORTON, 2013)

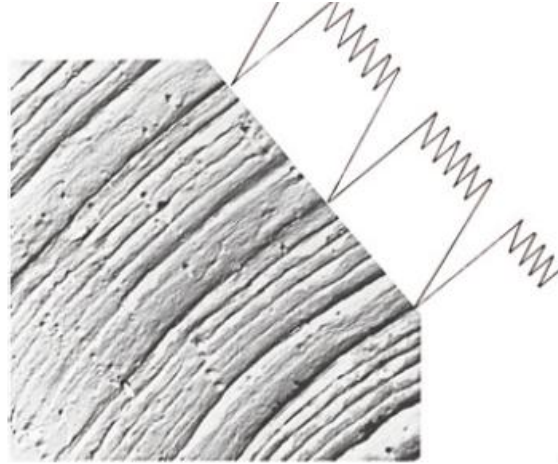
Vale destacar também que a frequência dos ciclos de tensão não possuem efeito efetivo no crescimento da trinca em ambientes não corrosivos, ao contrário do número de ciclos, já em ambiente corrosivo, baixas frequências cíclicas darão tempo para a corrosão atuar na ponta da trinca aberta sob tensão, com isso há uma significativa aceleração no crescimento da trinca em um meio corrosivo.

- Fratura

Enquanto houver tensões de tração cíclicas a trinca continuará a crescer até o momento de sua ruptura que é o último estágio é ocorre de forma repentina e inesperada. A ruptura pode acontecer em duas condições diferentes: a primeira e mais comum, é quando a trinca atinge um tamanho suficiente para aumentar o fator de intensidade de tensão na trinca até atingir o limite de tenacidade do material, a segunda condição é comum em carregamentos estáticos, nesse caso a tensão nominal aumentar o suficiente para atingir o limite do material.

Após a ruptura causada por fadiga é possível comprovar esse fenômeno pela aparência da fratura fazendo uma ampliação da superfície fraturada. A fratura possui aspecto diferenciado, pois possui marcas que chamamos de estrias. Como podemos ver na Figura 5 a seguir. Essas estrias são resultado dos ciclos de tensão, consequentemente ciclo de tensão mais elevadas terão estrias maiores, que indicará um aumento no crescimento da trinca por ciclo com o aumento da tensão.

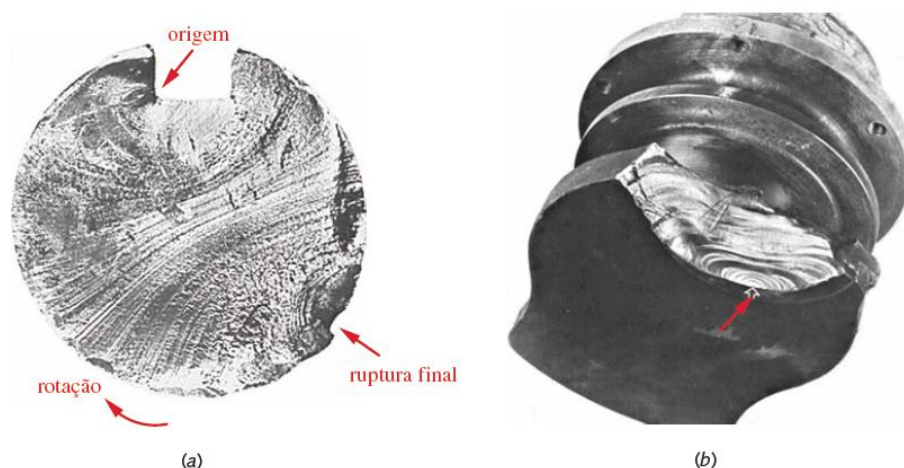
Figura 5- Estrias de fadiga na superfície da ruptura de uma liga de alumínio. O espaçamento entre as estrias corresponde ao modelo de carregamento cíclico e com uma ampliação de 12000 $\times$.



FONTE: (NORTON, 2013)

A olho nu a aparência da fratura também pode ser distinguível, a superfície fraturada apresenta uma parte de aparência polida, que possui marcas semelhantes as que a água deixa na areia no litoral, popularmente conhecida como “marcas de praia”, e a outra parte da superfície fraturada tem aparência áspera, como a da fratura frágil. Essas marcas de praia poderão ser mais bem compreendidas com a Figura 6 a seguir:

Figura 6- Duas peças que falharam sob fadiga: (a) Eixo com rasgo de chaveta de aço 1040 que falhou sob flexão rotativa. A trinca teve início no rasgo de chaveta.(b) Eixo de manivela do motor diesel, falhou sob torção e flexão combinadas. A trinca iniciou na seta.



FONTE: (NORTON, 2013)

Como foi dito anteriormente a fadiga se inicia com uma descontinuidade no material em que a tensão cíclica é um máximo, descontinuidades essas que podem surgir apartir de chavetas ou furos que podem servir de concentradores de tensão, mancais ou engrenagens que

deslizam uns sobre os outros sob altas pressões de contato desenvolvendo tensões concentradas de contato superficial.

Marcas ou riscos de ferramentas causados durante montagem ou fabricação da peça e até mesmo a composição do próprio material pode conter descontinuidades superficiais e subsuperficiais microscópicas e submicroscópicas, que também causaram concentração de tensão no material.

Depois de iniciada a trinca através desses concentradores de tensão, o tempo que ela levará para se propagar e romper sofrerá a influencia de vários fatores, como: tensões residuais de tração, temperaturas elevadas, ciclagem térmica, meio corrosivo e ciclagem de alta frequência.

2.2.1 Métodos principais de vida sob fadiga

Os principais métodos de vida sob fadiga utilizados em projetos são: métodos tensão-vida, deformação-vida e mecânica da fratura linear elástica (MFLE). Nessa seção explicaremos esses métodos, mas nos aprofundaremos no MFLE, pois utilizaremos esse método para a análise feita nesse trabalho.

Esses métodos irão definir a quantidade de ciclos que o componente terá antes da fratura para um valor especificado de carregamento. Uma vida de 1 a 10^3 ciclos é chamada de fadiga de baixo ciclo, a partir de 10^3 ciclos, chamamos de fadiga alto ciclo.

O MFLE foi o escolhido para determinar a vida sob fadiga nesse trabalho, pois ele considera a existência da trinca e que a mesma já foi detectada, dessa forma, ele se aproxima mais das situações encontradas na prática.

2.2.2 Métodos tensão-vida

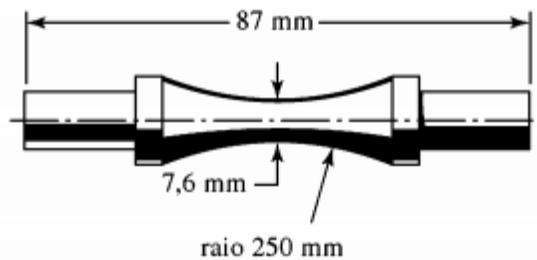
Esse método é o mais utilizado e possui muitos dados disponíveis publicados, pois é o método de mais fácil implementação para uma gama de aplicações de projeto, principalmente em aplicações de alta ciclagem.

Porém, esse método quantifica a vida do componente baseado apenas em níveis de tensão, por isso é considerado o método menos preciso, especialmente em aplicações de baixa

ciclagem, visto que ele não leva em consideração o comportamento tensão-deformação verdadeiro quando o escoamento localizado ocorre.

Para estabelecer a resistência à fadiga de um material através desse método é preciso uma grande quantidade de testes. A forma mais utilizada para a realização desses teste é utilizando a máquina de viga rotativa de alta velocidade de R.R. Moore. Esse dispositivo irá submeter um corpo de prova, como o da Figura 7 abaixo, a flexão pura.

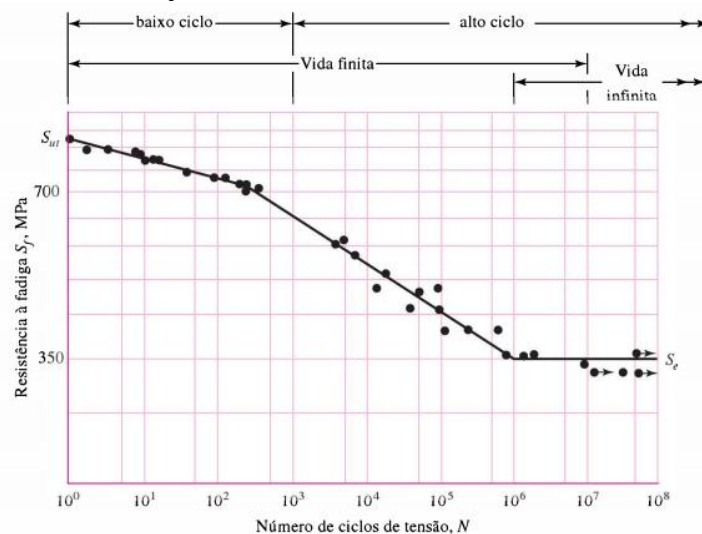
Figura 7- Dimensões do corpo de prova no teste de resistência à fadiga.



FONTE: (BUDYNAS; NISBETT, 2011).

No primeiro ensaio, uma carga de flexão constante, de valor inferior à resistência última do material, é aplicada até a ruptura do corpo de prova, o número de revoluções até o momento de ruptura é registrado. No segundo ensaio é utilizada uma tensão menor que a do primeiro teste, e o numero de revoluções deve ser novamente registrado. O processo continua, teste após teste e os resultados são traçados em um diagrama S-N, como na Figura 8 a seguir.

Figura 8- Diagrama S-N traçado com base nos resultados obtidos no ensaio de fadiga axial do aço UNS G41 300, normalizado.



FONTE: (BUDYNAS; NISBETT, 2011).

Como podemos ver na Figura 8, o gráfico S-N, representa a resistência à fadiga de um material em função do número de ciclos. Vale destacar que os gráficos S-N dos aços apresentam um joelho, no qual, além dele não ocorrerá falha no material e a resistência correspondente ao joelho é chamada de limite de segurança S_e . Porém existem materiais, como metais não ferrosos ou ligas, em que o gráfico nunca se torna horizontal, não existindo um joelho ou um limite de segurança.

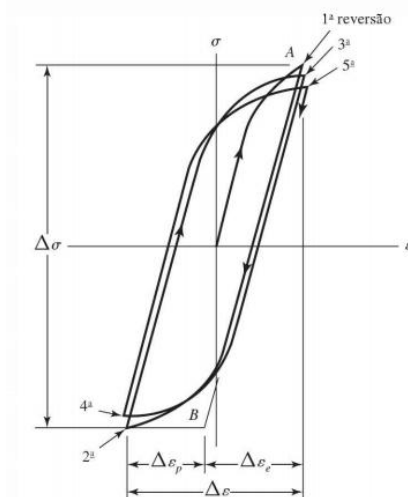
2.2.3 Métodos deformação-vida

O método deformação-vida é considerado o melhor na explicação da natureza da falha por fadiga, pois ele envolve uma análise mais detalhada da deformação plástica em regiões localizadas em que as tensões e deformações são consideradas para estimativas de vida e, ao contrário do método tensão-vida, ele apresenta bons resultados em aplicações de fadiga de baixo ciclo. Porém, esse método compõem várias idealizações e, portanto, algumas incertezas existirão nos resultados.

Para entender esse método é preciso lembrar que falhas por fadiga geralmente começam em discontinuidades, como entalhes ou trincas, que concentram tensão, quando essa tensão excede o limite elástico, ocorre deformação plástica, por esse motivo o método deformação-vida investiga o comportamento de materiais sujeitos à deformação cíclica.

A aparência geral dos gráficos, mostrada na Figura 9, foi construída para ciclos de deformação cíclica controlada.

Figura 9- Ciclos de histerese da tensão verdadeira.



FONTE: (BUDYNAS; NISBETT, 2011).

Na Figura 9 acima vemos que a resistência decresce com as repetições de tensão, o que foi evidenciado pelo fato de que as reversões ocorrem em níveis de tensão sempre menores. Porém, outros materiais podem ser enrijecidos por reversões cíclicas de tensões. (ELEMENTOS).

Posteriormente, a *SAE Fatigue Design and Evaluation Steering Committee* mostrou a relação da vida em reversões até a falha relacionada a amplitude de deformação $\Delta\varepsilon/2$. Essa relação foi dada por Manson-Coffin pela equação 3:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_F}{E} (2N)^b + \varepsilon'_F (2N)^c \quad (3)$$

Sendo:

ε'_F = O coeficiente de ductilidade de fadiga que é a deformação verdadeira correspondente à fratura em uma reversão.

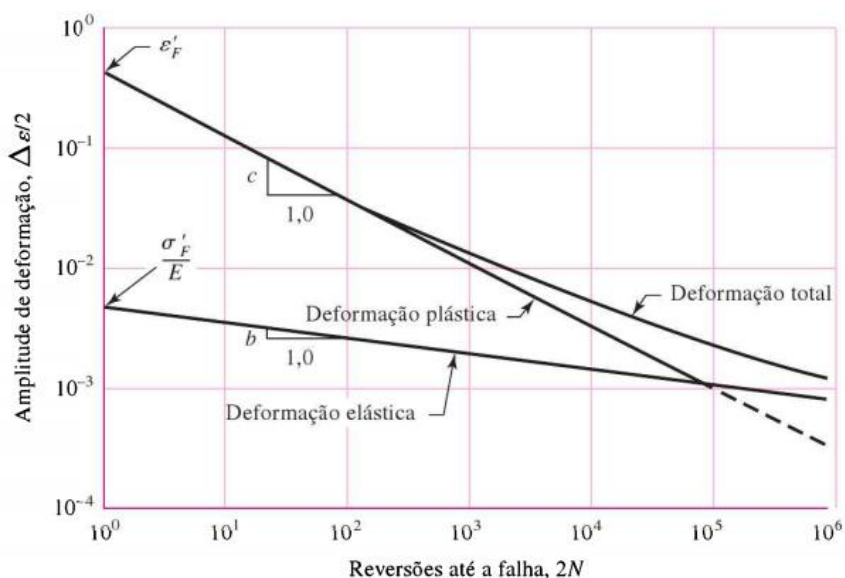
σ'_F = Coeficiente de resistência à fadiga que é a tensão verdadeira correspondente à fratura em uma reversão.

C = Expoente de ductilidade de fadiga que é a inclinação da linha de deformação plástica na Figura 10 a seguir.

b = Expoente de resistência à fadiga que é a inclinação da linha de deformação plástica.

O gráfico que expressa essa relação é o gráfico de amplitude de deformação *versus* Reversões até a falha como mostra a Figura 10 :

Figura 10- Gráfico log-log mostrando como a vida de fadiga se relaciona com a amplitude da deformação verdadeira para aço 1020 laminado a quente.



FONTE: (BUDYNAS; NISBETT, 2011).

No gráfico log-log acima, a linha de deformação plástica irá começar no coeficiente de ductilidade de fadiga, representado pelo ponto A da Figura 9, já a linha de deformação elástica irá iniciar no ponto do valor do coeficiente de resistência à fadiga, também representado pelo ponto A na Figura 9, pelo módulo de elasticidade.

Além disso, para a vida $2N$ ser proporcional à amplitude da deformação plástica verdadeira, precisa ser elevada a potência c , e para ser proporcional à amplitude da tensão verdadeira, precisa ser elevada a potência b . Por fim, se $2N$ é o número de reversões de tensão, então N é o número de ciclos.

2.3 MECÂNICA DE FRATURA LINEAR ELÁSTICA.

Como vimos anteriormente o trincamento por fadiga é dividida em três estágios. O primeiro normalmente é invisível ao observador. A segunda fase onde ocorre a extensão da trinca, e por fim, o terceiro estágio, quando ocorre a ruptura propriamente dita. A ruptura ocorrerá quando $K_I = K_{Ic}$, para a amplitude de tensão envolvida, sendo K_{Ic} a intensidade crítica de tensão para o metal não danificado.

Para haver a nucleação e crescimento da trinca por fadiga é necessário que a tensão aplicada seja variante no tempo e precisa existir esforço de tração em cada ciclo. Na mecânica da fratura é comum definir alguns parâmetros, como:

- Concentrador de tensão:

São defeitos ou trincas muito pequenas, microscópicos, que sempre existem em condições normais na superfície e no interior do corpo de um material. Esses defeitos irão aumentar ou concentrar na extremidade a tensão que foi aplicada e são chamados de concentrador de tensão, devido a sua habilidade de amplificar uma tensão aplicada nas suas proximidades. (Callister 2007)

- Fator de intensidade de tensões (K):

Esse fator de intensidade não deve ser confundido com os fatores de concentração de tensão, visto que o fator de intensidade vai ser uma função da geometria, do tamanho e da forma da trinca e do tipo de carregamento e pode ser expresso com a seguinte equação:

$$K_I = \beta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (4)$$

Sendo,

K_I = O fator de intensidade de tensão;

β = O fator geométrico;

σ = Tensão aplicada no material

a = Comprimento da trinca

Segundo Dieter(1981), se a falha de um material se associa a uma combinação de tensões e deformações, a propagação da trinca ocorrerá quando K atingir ou exceder um valor crítico. Esse valor crítico K recebe a denominação de tenacidade a fratura (K_{Ic}).

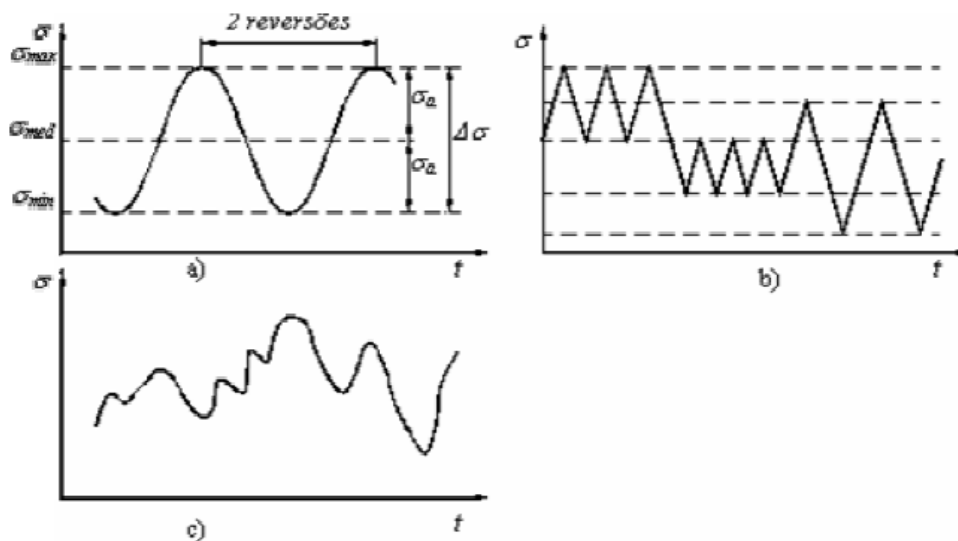
O valor de K_{Ic} se relaciona ao modo tração do material e é uma propriedade do material em estado plano de deformação (BORGES, 2010).

- Tensões flutuantes envolvidas no processo de fadiga:

Até o momento vimos o fenômeno da fadiga e como ocorre sua fratura, agora veremos os tipos de carregamentos que podem provocar a fadiga. Basicamente qualquer carregamento que varie no tempo pode acarretar nesse evento, porém existem variações de carregamento variante no tempo de acordo com a aplicação em questão.

Em máquinas rotativas, por exemplo, as cargas tendem a ser consistentes na amplitude ao longo do tempo e repetem-se com alguma frequência, como na Figura 11-a. Já em veículos ou até mesmo aviões as cargas tendem a variar completamente a sua amplitude e frequência no transcorrer do tempo, como na Figura 11-b, podendo até mesmo assumir uma natureza aleatória, como na Figura 11-c.

Figura 11- a) ilustra um carregamento de amplitude constante; b) ilustra um carregamento de amplitude variável definido por blocos de amplitude constante; c) ilustra um carregamento aleatório.



FONTE: (PEREIRA, 2006)

Segundo Norton (2013), a forma da onda que representa a relação tensão-tempo ou deformação-tempo terão o mesmo aspecto e frequência que a onda carga-tempo. Os fatores significativos são a amplitude e o valor médio da onda de tensão-tempo (ou deformação-tempo) e o número total de ciclos de tensão/deformação a que a peça é submetida.

A partir dos ciclos de tensões observadas na Figura 11-a, onde é considerado um carregamento de amplitude constante, alguns conceitos são adotados, onde:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n}}{2}; \quad (5)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}}{2}; \quad (6)$$

$$\Delta\sigma = \sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n} \quad (7)$$

;

$$R = \frac{\sigma_{m\acute{i}n}}{\sigma_{m\acute{a}x}} = \frac{K_{m\acute{i}n}}{K_{m\acute{a}x}} \quad (8)$$

Onde, σ_m é a tensão média, σ_a é a amplitude de tensão, $\Delta\sigma$ é o intervalo de tensão e R é a razão de tensões ou dos fatores de intensidade de tensões. Sendo que $\sigma_{m\acute{a}x}$ e $\sigma_{m\acute{i}n}$ são os níveis máximos e mínimos de tensão.

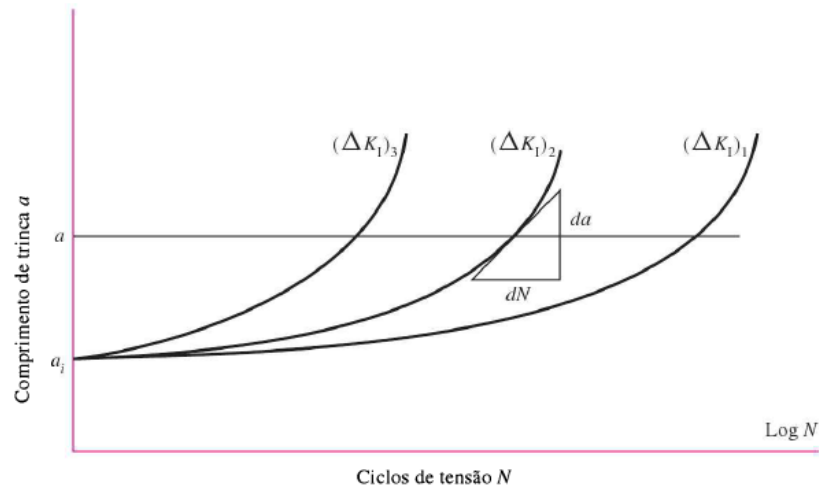
2.3.1 Crescimento de trinca

Trincas geralmente nucleiam na superfície livre, muito próxima a ela ou de uma grande descontinuidade. Se uma trinca tiver comprimento a_i , o crescimento da trinca como uma função do número de ciclos N dependerá de $\Delta\sigma$, isto é ΔK_I , visto que $K_I = \beta\sigma\sqrt{\pi a}$, então:

$$\Delta K_I = \beta\Delta\sigma\sqrt{\pi a} \quad (9)$$

Para ΔK_I abaixo de certo valor limiar $(\Delta K_I)_{th}$, uma trinca não crescerá. A Figura 12, a seguir, representa o comprimento da trinca a como uma função de N para três níveis de tensão $(\Delta\sigma)_3 > (\Delta\sigma)_2 > (\Delta\sigma)_1$, em que $(\Delta K_I)_3 > (\Delta K_I)_2 > (\Delta K_I)_1$.

Figura 12- Aumento no comprimento da trinca a partir do comprimento inicial como uma função da contagem de ciclos para três intervalos de tensão, $(\Delta\sigma)_3 > (\Delta\sigma)_2 > (\Delta\sigma)_1$.

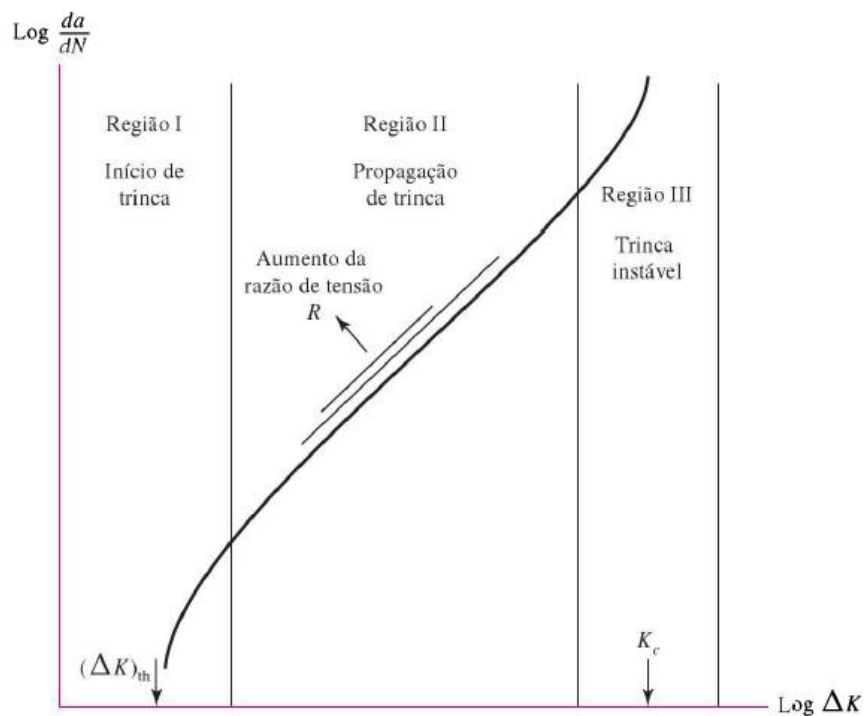


FONTE: (BUDYNAS; NISBETT, 2011).

Na Figura 12 acima podemos notar que para o crescimento de trincas mais longas em um computo particular de ciclos, teremos um intervalo de tensão mais elevado.

Quando a razão de crescimento de trinca por ciclo, da/dN , como mostra a Figura 13, os três estágios de desenvolvimento de trinca são observáveis, e os dados do estágio II são lineares em coordenadas log-log, dentro do domínio de validade da mecânica de fratura linear elástica (LEFM). (BUDYNAS; NISBETT, 2011)

Figura 13- Log da/dN versus Log ΔK .



FONTE: (BUDYNAS; NISBETT, 2011).

Com essa abordagem é possível estimar a vida de um componente ciclicamente carregado, após a descoberta de uma trinca. Poderemos fazer essa estimativa utilizando a equação de Paris, descrita pela equação 10 abaixo, que pode ser aproximada a região II do crescimento da trinca na Figura 13. Para isso, iremos supor que a trinca seja descoberta no início do estágio II e que as condições de deformação plana prevaleçam.

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

Em que C e m são constantes empíricas do material e ΔK_I é dado pela seguinte equação 9. Substituindo C e m na equação 9 e integrando, obtemos:

$$\int_0^{N_f} dN = \frac{1}{C} \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{(\beta \Delta \sigma \sqrt{\pi a})^m} \quad (11)$$

Sendo,

a_i = O comprimento inicial da trinca;

a_f = É o comprimento final da trinca, correspondente à falha;

N_f = É o número estimado de ciclos para produzir uma falha após a trinca inicial ser formada.

No caso de β mudar na variável de integração, N_f será:

$$N_f = \sum \delta N_j \quad (12)$$

Sendo,

N_f = Números de ciclos para determinada trinca.

Segundo Budynas e Nisbett (2011) δa_j e δN_j são incrementos do comprimento de trinca e do número de ciclos. O procedimento é selecionar um valor de δN_j utilizando a_i , determinar β e computar ΔK_I , determinar δa_j e, então, encontrar o próximo valor de a . Repetir o procedimento até que:

$$a = a_f \quad (13)$$

3 METODOLOGIA

Para o estudo do presente trabalho iremos investigar o crescimento ou desenvolvimento de uma trinca, trinca esta que pode ser desenvolvida apartir de concentradores de tensão, como entalhes, mudanças rápidas na seção transversal, descuidos que podem ocasionar em marcas de ferramentas, ou até mesmo vazios e inclusões da composição do próprio material. Esse crescimento que ocorre devido a tensões residuais de tração, temperaturas elevadas, ciclagem térmica, meio corrosivo e ciclagem de alta frequência.

Nesse trabalho iremos analisar o crescimento de uma trinca, de tamanho e localização previamente conhecidos, em um componente submetido a esforços cíclicos trativos (visto que esforços compressivos tendem apenas a fechar a trinca), ocasionando na falha do mesmo. Além disso, vamos analisar como essa trinca aumenta quando o componente é submetido a diferentes intervalos de tensão.

Para esse estudo utilizaremos a metodologia da Mecânica da fratura que trata justamente do comportamento à fratura em componentes contendo defeitos ou trincas sob condições semelhantes às encontradas na prática.

Através da Mecânica da fratura, poderemos definir o crescimento de uma trinca submetida a um carregamento cíclico e o número de ciclos de vida do material.

Para isso, faremos uma análise em dois componentes compostos por diferentes materiais e com as condições previamente definidas com o intuito de analisar, como dito anteriormente, como a variação de parâmetros tais como a tensão aplicada no componente e o tamanho de trinca inicial podem influenciar no crescimento de sua trinca inicial e consequentemente na vida útil do componente.

Esse estudo será embasado na metodologia proposta pela mecânica da fratura e toda a implementação foi realizada no *Microsoft Office Excel®*.

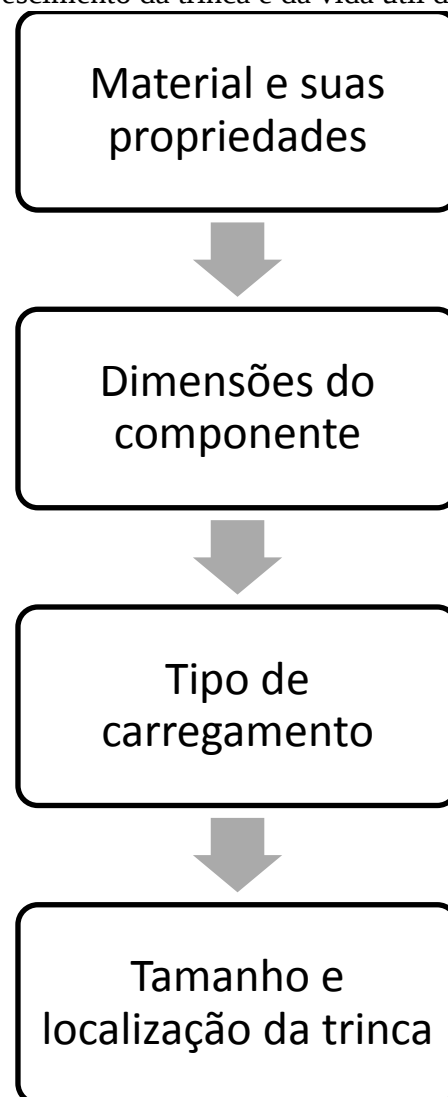
Após o estudo, analisaremos os resultados e faremos a plotagem dos dados, a fim de facilitar o entendimento do leitor acerca dos comportamentos que iremos obter no trabalho. Faremos isso, utilizando as variáveis de interesse que são: o comprimento da trinca, o intervalo de tensão e o número de ciclos de vida.

3.1 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS INICIAIS.

Para a realização dessa análise será necessário selecionar os parâmetros iniciais. Parâmetros como o material do componente, suas dimensões, o carregamento, além do tamanho e da localização da trinca inicial, essa seleção será feita de forma a facilitar os cálculos e de forma que seja possível resolver com as informações e dados pertinentes ao assunto que existem na nossa literatura.

Para isso, a Figura 14 a seguir mostra um fluxograma exibindo quais parâmetros iniciais precisam ser definidos para a determinação do crescimento da trinca e da vida útil dos componentes através da mecânica da fratura, que é o objetivo final dessa análise.

Figura 14- Fluxograma mostrando quais parâmetros precisam ser definidos para a determinação do crescimento da trinca e da vida útil do componente.



FONTE: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)

3.1.1 Definição do material.

Para estudar a fadiga, fizemos uma análise de quais componentes sofrem com esse fenômeno, como em eixos rotativos submetidos esforços cíclicos de tração e compressão.

Por esse motivo selecionamos para nossa análise o Aço SAE 4140 que possui boa resistência mecânica que o tornou um aço largamente utilizado na fabricação de eixos. O aço SAE 4140 possui a seguintes propriedades mecânicas:

Tabela 1- Propriedades do material 1.

Propriedades mecânicas	
Aço SAE 4140	
σ_r	655 MPa
σ_e	420MPa
K_c	$75\text{MPa}\sqrt{m}$

FONTE: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)

Com o intuito de comprovar que o comportamento dos gráficos obtidos como resultado desse trabalho não é um comportamento característico do material, mas sim do parâmetro em questão, faremos a análise em outro material, sendo este o aço SAE 4340.

Essa seleção também será justificada devido à aplicação desse aço que também possui alta resistência mecânica e também é destinado a fabricação de eixos, dentre outros componentes mecânicos.

As propriedades desse aço estão apresentadas na Tabela 2 abaixo:

Tabela 2- Propriedades do material 2.

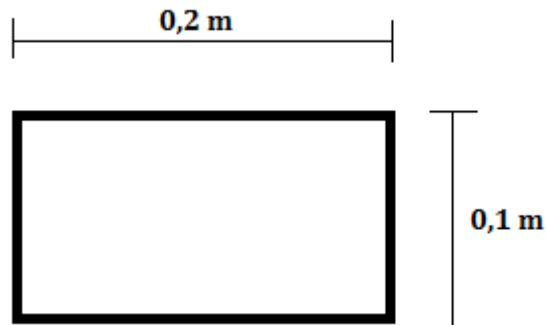
Propriedades mecânicas	
Aço SAE 4340	
σ_r	745 MPa
σ_e	475MPa
K_c	$87,4\text{MPa}\sqrt{m}$

FONTE: : (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)

3.1.2 Dimensões do componente.

O componente escolhido foi uma placa, essa escolha foi feita para facilitar na determinação do fator β . O componente é uma placa retangular com $0,1m \times 0,2m$ de dimensão como a Figura 15 abaixo:

Figura 15- Placa retangular com $0,1m \times 0,2m$ de dimensão.



FONTE: : (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)

3.1.3 Tipo de carregamento.

A placa mostrada na Figura 15 será submetida a tensões cíclicas de tração na longitudinal, como mostra a Figura 16 abaixo. Faremos a análise no Aço SAE 4140 e no Aço SAE 4340 sendo submetidos a quatro variações de intensidade de tensão.

Esse carregamento foi escolhido, pois o ensaio de tenacidade à fratura é realizado em uma máquina de ensaios de fadiga que aplica forças normais, e o carregamento padrão é geralmente uma tensão de tração pulsante ou variada, como mostra a Figura 17b e c.

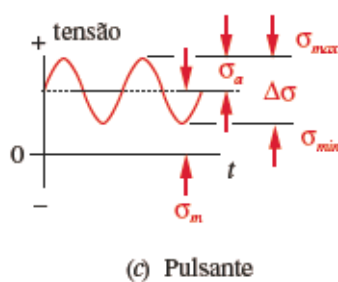
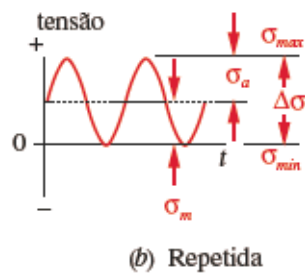
Ensaio sob tensões alternadas são raramente aplicados neste caso específico, visto que as tensões de compressão não promovem o crescimento de trincas.

Figura 16- Placa retangular submetida a tensões cíclicas de tração na longitudinal.



FONTE: Autoria própria.

Figura 17- Tensões cíclicas alternadas, repetidas e pulsantes.



FONTE: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)

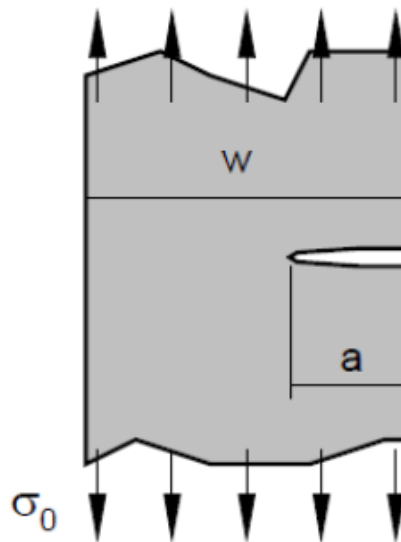
3.1.4 Tamanho e localização da trinca.

Nessa etapa, definimos o tamanho da trinca e sua localização na placa mostrada na Figura 18. Para a sua localização escolhemos a superfície da peça, essa escolha foi feita para mostrar os prejuízos que podem ser causados em peças que não possuem um bom

acabamento superficial ou que sofrem descuidos na sua manipulação, gerando falhas na sua superfície.

Dessa forma, fizemos a análise em um componente submetida a tensões cíclicas de tração na longitudinal com uma trinca na superfície com comprimento inicial de 0,001m. Como mostra a Figura 18 abaixo:

Figura 18- Placa retangular submetida a tensões cíclicas de tração na longitudinal com uma trinca na superfície.



FONTE: (ROSA, 2002).

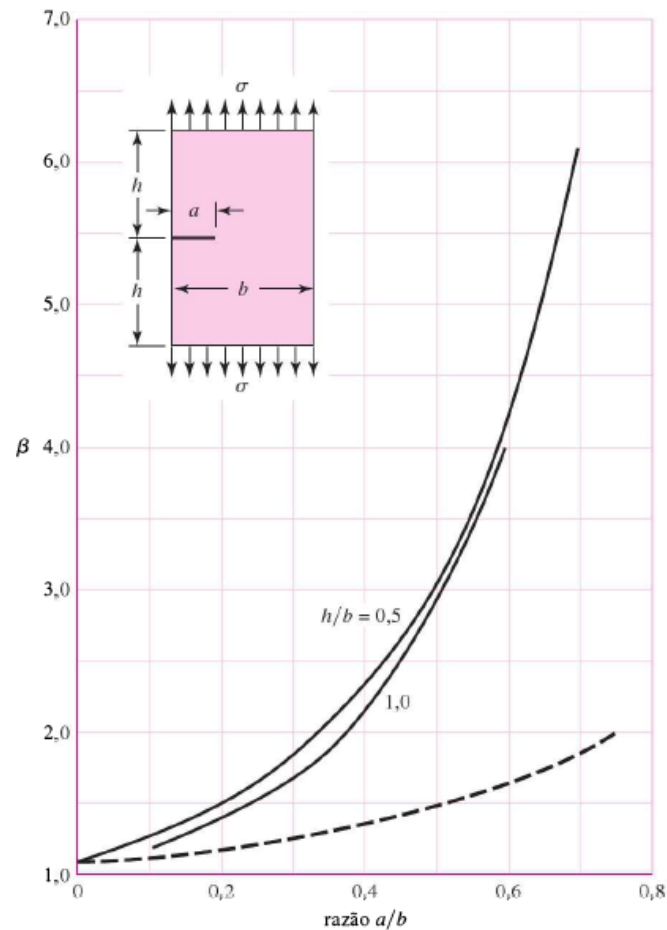
Após a definição dos parâmetros iniciais precisamos encontrar os valores das variáveis necessárias aos cálculos referentes aos parâmetros iniciais citados. Essas variáveis são: o fator de modificação da intensidade de tensão, que será selecionado de acordo com a forma e as dimensões do componente; o fator de intensidade de tensão, e por fim, as constantes C e m , que dependem do tipo de material escolhido, como veremos na Tabela 3 posteriormente.

3.2 DETERMINAÇÃO DO FATOR DE MODIFICAÇÃO DA INTENSIDADE DE TENSÃO.

Após a seleção dos parâmetros iniciais, podemos definir o fator de modificação da intensidade de tensão β . Esse fator foi definido de acordo com as dimensões e a forma do componente em questão, além do tamanho e localização da trinca, que foram definidos nas

seções acima. É importante ressaltar que o gráfico da Figura 19 é válido apenas para o modo de propagação de trinca I da Figura 4. Para isso consultaremos a Figura 19 a seguir, para encontrar o valor do fator:

Figura 19- Gráfico do fator β em função das dimensões de uma placa retangular.



FONTE: (BUDYNAS; NISBETT, 2011).

Sendo assim, uma placa retangular com $0,1m \times 0,2m$ de dimensões com uma trinca na superfície da placa com comprimento inicial de $0,001m$ como mostrado na Figura 18, submetida a tensões cíclicas de tração longitudinal, o valor da razão de a/b como na Figura 18 será de 0,01.

A partir das considerações de fizemos, podemos encontrar no gráfico o fator de modificação da intensidade de tensão (β) terá um valor próximo a 1,12.

O fator geométrico será considerado constante até o final da vida em fadiga, devido à trinca cresce no início lentamente e apenas na última fração da vida é que atinge um tamanho da ordem de a_f e assim perfeitamente possível usar um valor de β constante, pois o erro não será grande.

3.3 DETERMINAÇÃO DO FATOR DE INTENSIDADE DE TENSÃO (ΔK_I).

Para calcular a taxa de crescimento de uma trinca é necessário calcular o fator de intensidade de tensão e assim aplica-lo na equação de Paris, como podemos ver da equação 10, e para calcular o fator de intensidade de tensão utilizaremos a seguinte equação: $\Delta K_I = \beta \Delta \sigma \sqrt{\pi a}$.

Com essa equação podemos obter os valores ΔK_I para a variação do intervalo de tensão máxima e mínima ao qual o componente esta sendo submetido. Os cálculos para encontrar o fator de intensidade de tensão serão realizados para os dois materiais inicialmente selecionados.

3.4 DETERMINAÇÃO DAS CONSTANTES C E m .

O valor da taxa de crescimento de uma trinca foi obtida através da equação de Paris dada pela da equação 10, e como podemos ver pela equação, para isso é preciso saber os valores do fator de intensidade de tensão (ΔK_I), e das constantes C e m .

Essas são constantes empíricas do material encontradas através de testes em diferentes tipos de aço. Os valores encontrados estão listados na Tabela 3:

Tabela 3- Valores para as constantes C e m .

Aços	C	m
Martensíticos	$1,35 \times 10^{-10}$	2,25
Ferríticos-perlíticos	$6,9 \times 10^{-12}$	3,00
Inoxidáveis austeníticos	$5,6 \times 10^{-12}$	3,25
Ferríticos no ar, com formação de estrias.	1×10^{-11}	3,00
Para vasos de reator, ferríticos	$0,477 \times 10^{-12}$	3,726

FONTE: (ROSA, 2002)

Para os aços SAE 4140 e 4340, utilizaremos as constantes: $C = 1 \times 10^{-11}$ e $m = 3$. Agora com todas as variáveis definidas encontraremos o de crescimento da trinca.

3.5 CÁLCULO DO CRESCIMENTO DA TRINCA EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE CICLOS DE VIDA.

Aqui apresentamos um procedimento simplificado para estimar a vida remanescente de um componente ciclicamente tensionado, após a descoberta de uma trinca. O aumento do comprimento da trinca como função do número de ciclos foi obtida através da Equação 9.

Com isso em mente, primeiramente precisamos encontrar o tamanho final da trinca a_f , para isso substituiremos na Equação 9: o fator de modificação da intensidade de tensão, o fator de intensidade de tensão característico do material e o valor da tensão máxima aplicada no material.

Após obtermos o comprimento final da trinca (a_f), faremos uma divisão do intervalo entre os valores de a_f e a_i .

Por fim iremos calcular o número de ciclos N a crescer de uma fenda de um tamanho inicial a_i para um dado tamanho a_f nos intervalos definidos em um ciclo conhecido de amplitude de tensão $\Delta\sigma$ e geometria definida, N pode ser calculado a partir da integração da equação de Paris, resultando na seguinte equação:

$$N = \frac{a_f^{(1-m/2)} - a_i^{(1-m/2)}}{C \times \beta^m \times \pi^{m/2} \times \Delta\sigma^m (1 - m/2)} \quad (14)$$

Apartir dos valores de variação de trinca e número de ciclos calculados, plotaremos os gráfico de crescimento de trinca pela variação do número de ciclos.

3.6 ESTIMATIVAS DA CURVA DE PROPAGAÇÃO DE TRINCA POR FADIGA

Supondo que a trinca seja descoberta no estágio II, seu crescimento na região II pode ser aproximado pela Equação de Paris: $\frac{da}{dN} = C(\Delta K_I)^m$., assim obteremos a curva de propagação de fadiga. Para isso, será necessário substituir as constantes empíricas C e m , e o fator de intensidade de tensão.

O fator de intensidade de tensão ΔK_I , que é dado por:

$$\Delta K_I = K_{m\acute{a}x} - K_{m\acute{i}n} \quad (15)$$

Onde, o $K_{m\acute{a}x}$ é calculado utilizando o valor máximo de tensão aplicado e o $K_{m\acute{i}n}$ é calculado utilizando o valor mínimo de tensão aplicado.

Para gerar a curva de propagação de fadiga plotamos os valores de $\frac{da}{dN}$ e de ΔK_I , como veremos na seção 4 posteriormente, para cada um dos intervalos conforme foi explicado na seção 3.5.

3.7 ANÁLISE DO NÚMERO DE CICLOS DE VIDA COM A VARIAÇÃO DA TRINCA INICIAL.

Para analisar o número de ciclos de vida quando variamos a trinca inicial, fizemos os mesmos cálculos anteriores para fator de intensidade de tensão e a taxa de crescimento da trinca pelo número de ciclos. Como parâmetros de entrada utilizaremos o fator de modificação da intensidade de tensão $\beta = 1,12$, 200MPa de tensão máxima e 0MPa de tensão mínima, variando apenas o valor do comprimento inicial da trinca, utilizando os seguintes valores para a_i : 0,001; 0,002; 0,003; 0,004 ; 0,005.

Fizemos esses cálculos para verificar a relação que se estabelece entre o tamanho da trinca inicial e o número de ciclo de vida do componente estudado. Os valores encontrados nessa análise estão no Anexo C e D.

Fizemos essa mesma análise, sob os mesmos parâmetros para os dois materiais selecionados: Aço SAE 4140 e Aço SAE 4340. Com os resultados obtidos faremos um gráfico dos comprimentos iniciais de trinca pelo número de ciclos obtido.

3.8 ANÁLISE DO NÚMERO DE CICLOS COM A VARIAÇÃO DO INTERVALO DE TENSÃO

Com o objetivo de entender como a variação do intervalo de tensão aplicado em um componente influencia no seu número de ciclos de tensão, fizemos a análise do número de ciclos através da mecânica da fratura para um componente submetido às mesmas condições das análises anteriores, porém variando o intervalo de tensão ao qual ele será submetido.

Para isso utilizamos uma trinca de comprimento inicial igual a 0,001, o fator de modificação da intensidade de tensão $\beta = 1,12$ e 200MPa de tensão máxima, variando apenas as tensões mínimas com os seguintes valores: 0,30,50,70,100,150,170MPa.

Faremos essa mesma análise, sob os mesmos parâmetros para os dois materiais selecionados: Aço SAE 4140 e Aço SAE 4340. Com os resultados obtidos faremos um gráfico dos intervalos de tensão pelo número de ciclos obtido.

4 RESULTADOS

Foi feita a definição dos parâmetros envolvidos na análise (seção 3.1) e de todas as variáveis necessárias (seções 3.2; 3.3 e 3.4) aos cálculos do crescimento da trinca pelo número de ciclos de vida, para encontrar a curva de propagação da trinca e para realizar as análises propostas na metodologia (seções 3.5; 3.6; 3.7 e 3.8).

Para os cálculos do crescimento da trinca pelo o número de ciclos de vida e definição da curva de propagação da trinca fizemos 4 análises idênticas e variamos em cada uma delas apenas a tensão aplicada e consequentemente a razão de tensão R , como podemos ver na Tabela 4.

4.1 ANÁLISE DO AÇO SAE 4140

Para o aço SAE 4140 estabelecemos os seguintes parâmetros:

Tabela 4- Parâmetros para as análises no Aço SAE 4140.

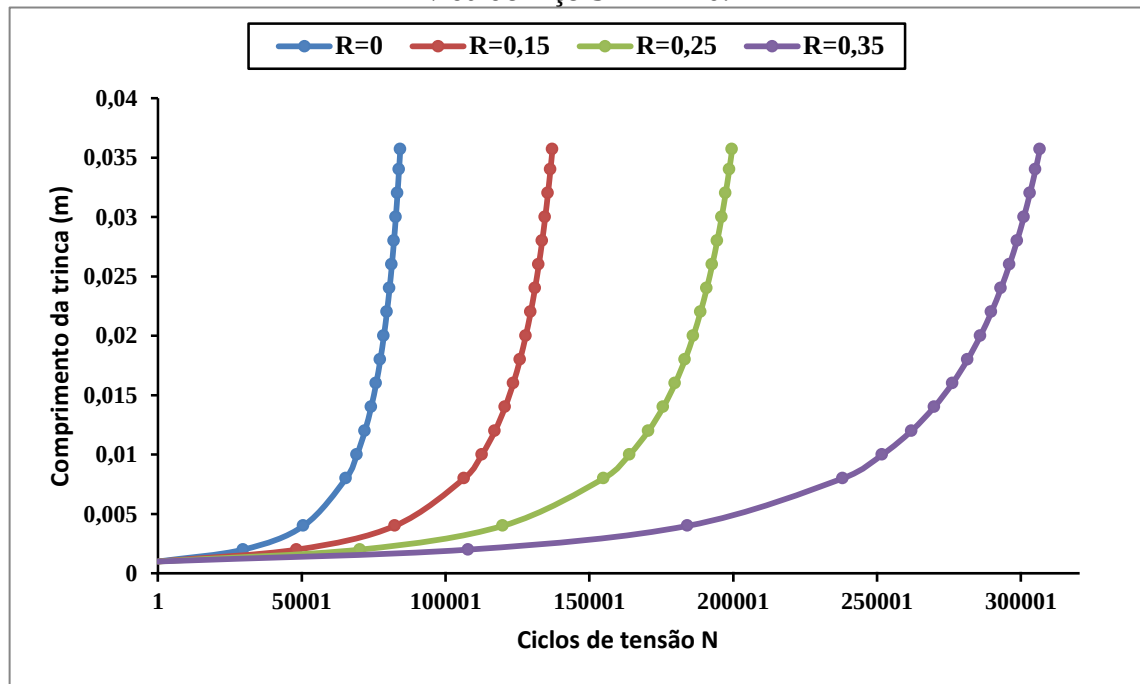
	Análise 1	Análise 2	Análise 3	Análise 4
Tensão máxima	200	200	200	200
Tensão mínima	0	30	50	70
β	1,12	1,12	1,12	1,12
R	0	0,15	0,25	0,35
a_i	0,001	0,001	0,001	0,001

FONTE: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)

Pela análise feita, com a finalidade de observar o comportamento do crescimento da trinca com o aumento do número de ciclos de vida, geramos o seguinte Gráfico 1 abaixo apartir dos valores encontrados no Anexo A.

No Gráfico 1, veremos um comparativo entre as curvas de crescimento de trinca versus número de ciclos de vida, com a variação do intervalo de tensão e consequentemente a razão de tensão.

Gráfico 1- Comparativo entre as curvas de crescimento de trinca versus número de ciclos de vida do Aço SAE 4140.



FONTE: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)

Apartir do Gráfico 1 podemos perceber que para aumentar o tamanho da trinca inicial, no início da curva é preciso uma grande quantidade de ciclos para fazer uma pequena diferença no tamanho da trinca, com o decorrer do processo de fadiga, o número de ciclos para aumentar aquela trinca vai diminuindo, gerando um grande crescimento da trinca nos últimos ciclos de vida do componente.

Observando o Gráfico 1, também podemos perceber que quanto maior o intervalo de tensão menor é a quantidade de ciclo necessário para se atingir um tamanho X de trinca.

Comparando as curvas $R=0$; $R=0,15$; $R=0,25$; $R=0,35$; é visto que as análises 1 e 4, tiveram comportamento semelhantes para determinado comprimento da trinca. Este comportamento é esperado e se assemelha as curvas da Figura 12 mostrada no referencial teórico.

Além disso, percebemos que a quantidade de ciclos de vida da análise 1 é menor que a quantidade calculada na análise 2 e assim sucessivamente, visto que o intervalo de tensão delas é decrescente, conforme a Tabela 4.

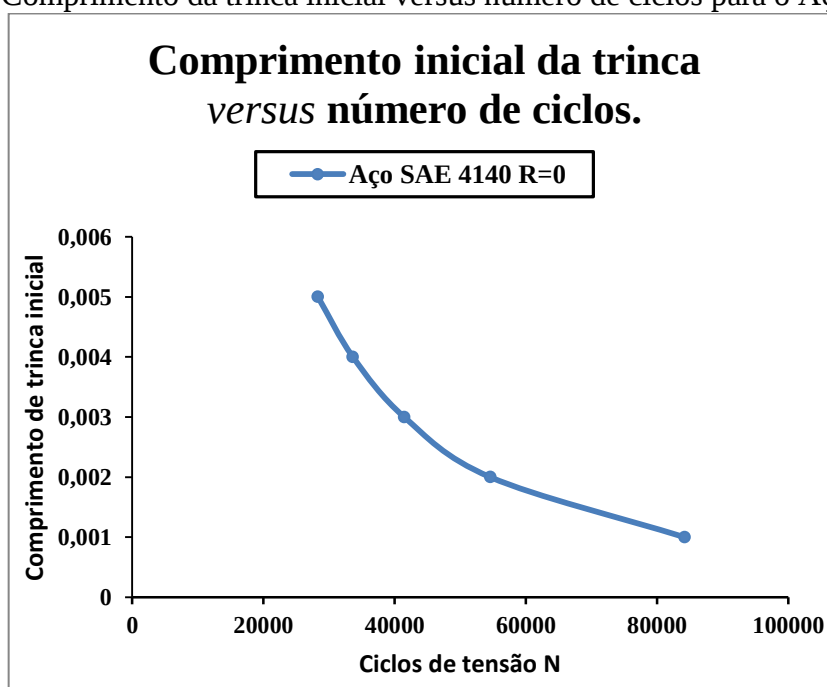
Assim, as curvas apresentadas no Gráfico 1 permite constatar o efeito de R na vida em fadiga das quatro análises. Por essas curvas é possível constatar que as trincas crescem muito mais rapidamente para o valor de R menos elevado ($R=0$). Da mesma maneira, pode dizer que

para a análise 1 submetidos a $R=0$ ao componente apresentará uma menor vida em fadiga quando comparados com aqueles submetidos a $R=0,15$, $R=0,25$ e $R=0,35$.

Com base nesse comportamento, verificamos também o número de ciclos de vida de um componente variando o tamanho de sua trinca inicial, ou seja, para um componente com uma trinca inicial de 0,001m, sua trinca final será de 0,0357m e seu número de ciclos de vida é de 84207 ciclos, já se esse mesmo componente sob as mesmas condições apresentar uma trinca inicial de 0,002m sua trinca final ainda será de 0,0357m, porém seu número de ciclos de vida será de 54586 ciclos.

A análise foi feita para o Aço SAE 4140, na condição do $R=0$ e os resultados dessa análise serão mostrados no Gráfico 6 abaixo, gerado apartir dos valores mostrados no Anexo C.

Gráfico 2- Comprimento da trinca inicial versus número de ciclos para o Aço SAE 4140.



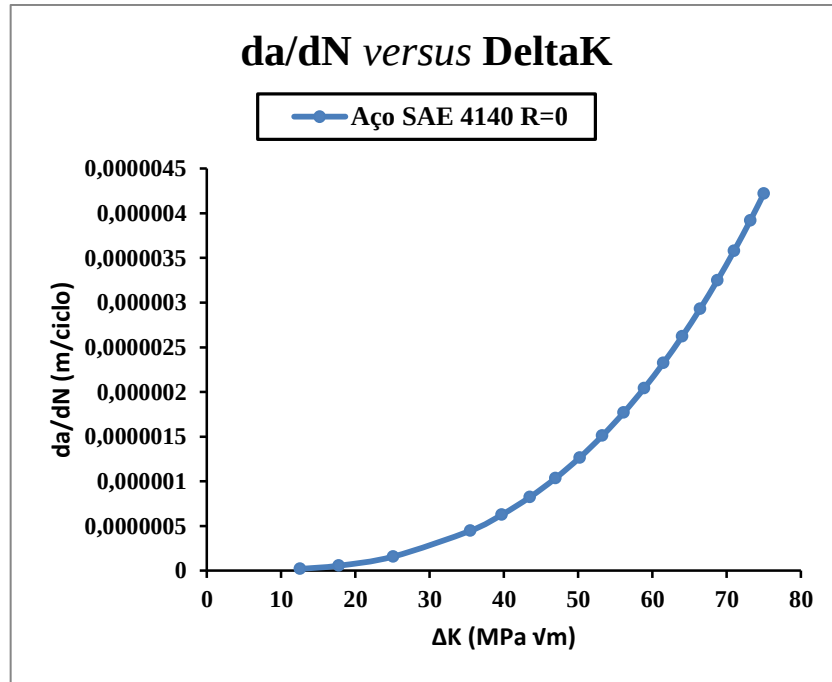
FONTE: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018).

Pela análise do gráfico acima podemos comprovar que o número de ciclos de vida e um componente submetido à fadiga cresce com o aumento do comprimento de sua trinca inicial, de forma não linear, como mostrado no Gráfico 6 acima.

Além do crescimento da trinca, geramos o gráfico de propagação da trinca definida pela equação de Paris, onde a curva traçada representa a região II demonstrada na Figura 13 do referencial teórico, para uma trinca descoberta no início desse estágio de propagação.

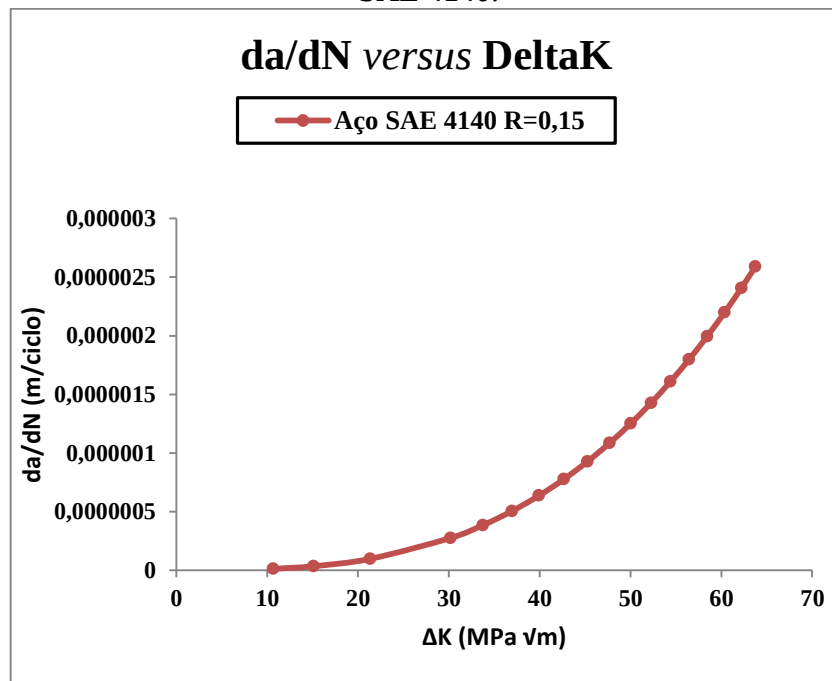
Os dados obtidos nessa análise estão nos Anexos A, cada um deles para um intervalo de tensão diferente e com as respectivas razões de tensão: $R=0$, $R=0,15$, $R=0,25$ e $R=0,35$. Apartir desses dados foi gerado o Gráfico 7,8,9 e 10, abaixo:

Gráfico 3- da/dN versus a variação do fator de intensidade de tensão para $R=0$ do Aço SAE 4140.



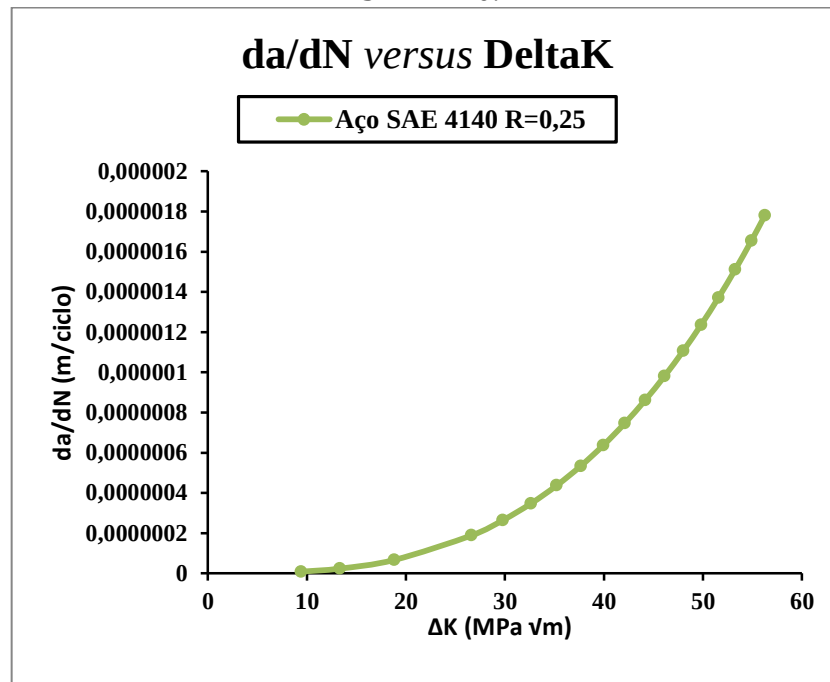
FONTE: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018).

Gráfico 4- da/dN versus a variação do fator de intensidade de tensão para $R=0,15$ do Aço SAE 4140.



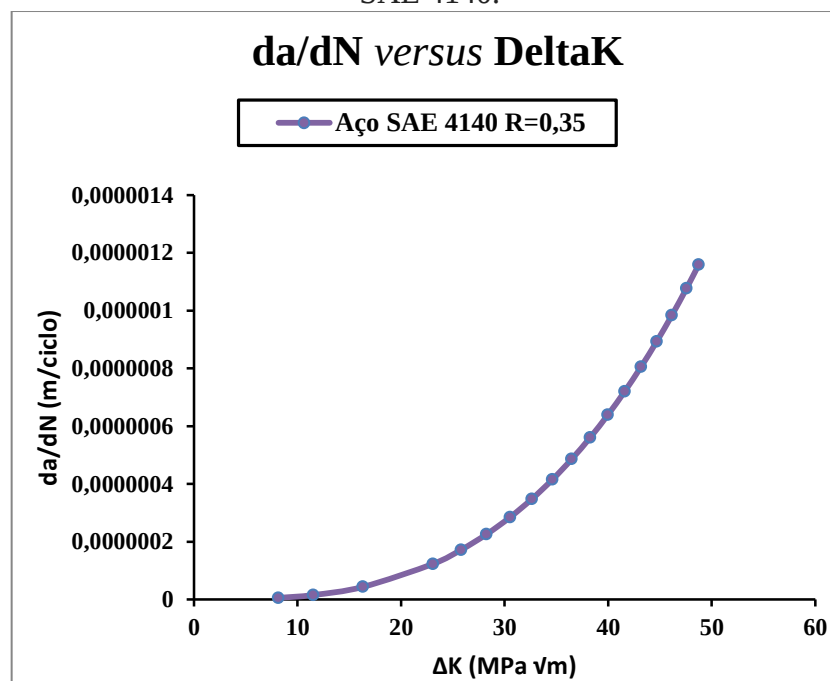
FONTE: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018).

Gráfico 5- da/dN versus a variação do fator de intensidade de tensão para $R=0,25$ do Aço SAE 4140.



FONTE: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018).

Gráfico 6- da/dN versus a variação do fator de intensidade de tensão para $R=0,35$ do Aço SAE 4140.

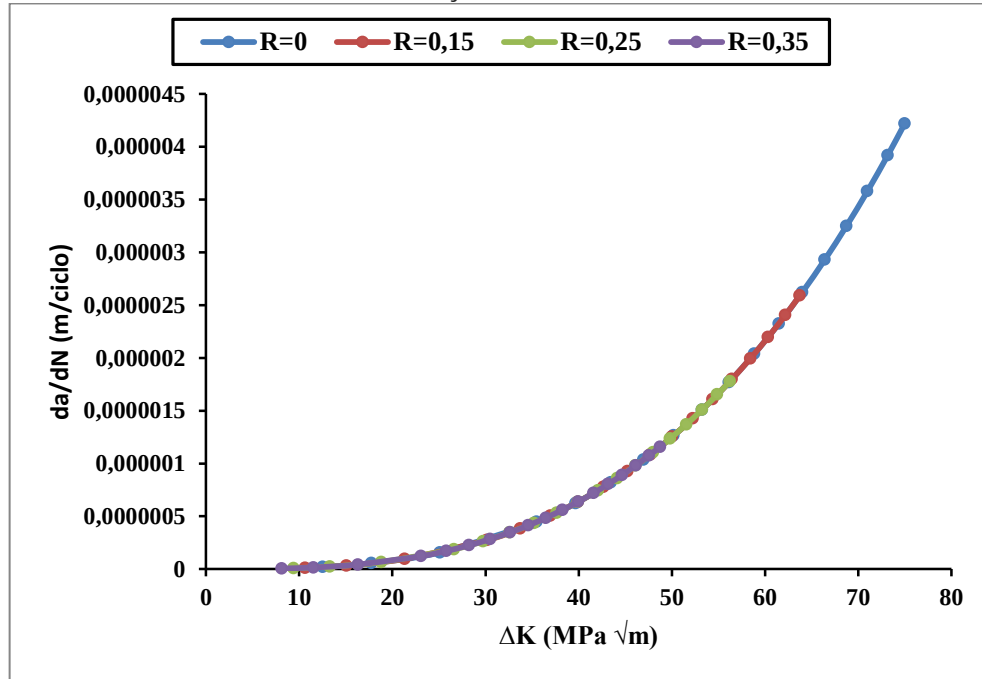


FONTE: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018).

Na análise 1, vimos que ela teve uma maior taxa de propagação de fadiga em relação as outras três simulações, isso se deve a uma alta variação de seus fatores de intensidade de tensões, com um $R=0$.

É importante observar que quanto maior o R, menor será a taxa de propagação de fadiga para o aço SAE 4140. A comprovação está no Gráfico 11 que mostra as curvas das análises 1,2,3 e 4 lado a lado.

Gráfico 7- Comparativo das curvas de propagação da trinca para diferentes razões de tensão do Aço SAE 4140.

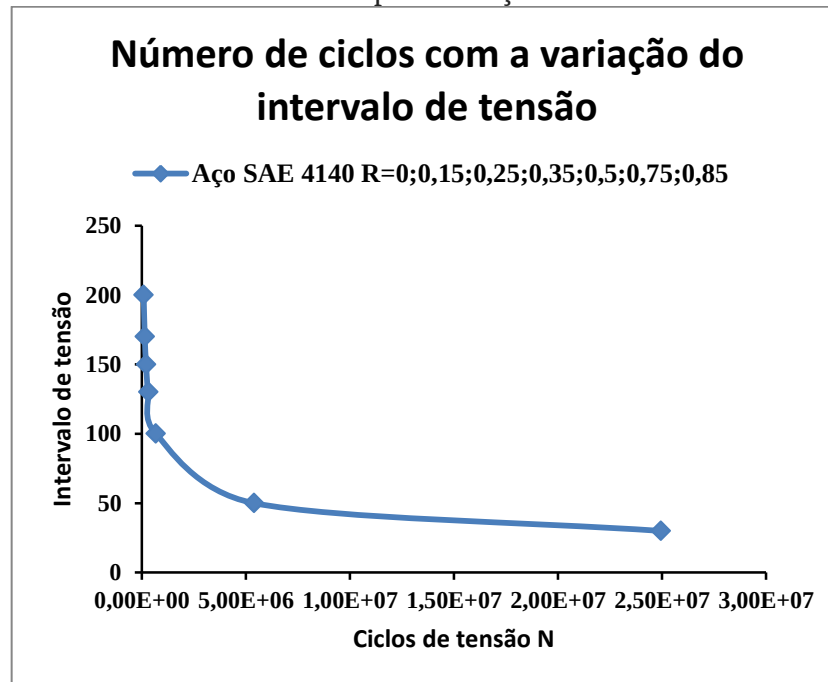


FONTE: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018).

Após definirmos as curvas de propagação de trinca mostradas acima, fizemos um estudo de como número de ciclos, para as análises descritas na Tabela 4, se comportará quando variarmos o intervalo de tensão, ou seja, iremos plotar um gráfico com os seguintes intervalos de tensão: 200-0; 200-30; 200-50; 200-70; 200-100; 200-150 e 200-170; e o número de ciclos referente a cada intervalo.

É importante lembrar que os outros parâmetros utilizados foram os mesmos adotados para as análises iniciais, como o tamanho inicial da trinca de $0,001m$ e $\beta = 1,12$.

Os resultados obtidos nessa análise serão exibidos no Gráfico 10 abaixo:

Gráfico 8- Número de ciclos pela variação dos intervalos de tensão.

FONTE: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018).

4.2 ANÁLISE DO AÇO SAE 4340

Para o aço SAE 4340 estabelecemos os seguintes parâmetros:

Tabela 5- Parâmetros para as análises no Aço SAE 4340.

	Análise 1	Análise 2	Análise 3	Análise 4
Tensão máxima	200	200	200	200
Tensão mínima	0	30	50	70
β	1,12	1,12	1,12	1,12
R	0	0,15	0,25	0,35
a_i	0,001	0,001	0,001	0,001

FONTE: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018).

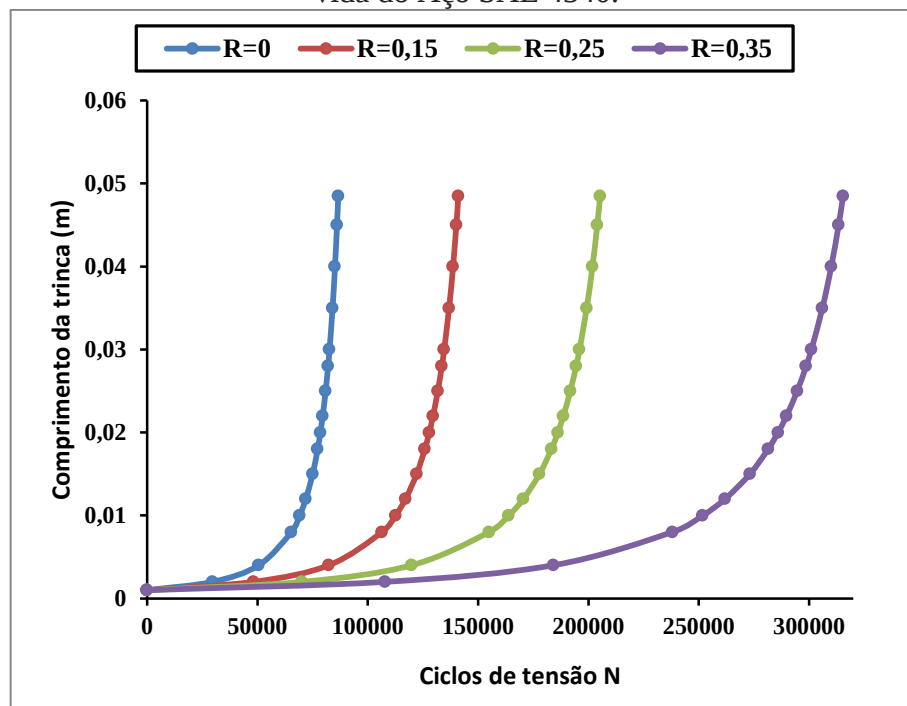
A análise do Aço SAE 4340 foi feita da mesma forma apresentada na seção 4.1 para o Aço SAE 4140. Para isso, foram utilizados os parâmetros citados na Tabela 5 acima e com a finalidade de observar o comportamento do crescimento da trinca com o aumento do número de ciclos de vida, geramos o Gráfico 9. Nele, veremos um comparativo entre as curvas de

crescimento de trinca versus número de ciclos de vida, com a variação do intervalo de tensão e consequentemente a razão de tensão.

Apartir do Gráfico 9 podemos perceber que o comportamento obtido na análise do Aço SAE 4140 se repete no Aço SAE 4340, em que, para aumentar o tamanho da trinca inicial é preciso uma grande quantidade de ciclos para fazer uma pequena diferença no tamanho da trinca, com o decorrer do processo de fadiga, o número de ciclos para aumentar aquela trinca vai diminuindo, gerando um grande crescimento da trinca nos últimos ciclos de vida do componente.

As curvas a seguir, como já eram esperados, seguem o padrão apresentado no Gráfico 1, como podemos ver nos Gráficos 9:

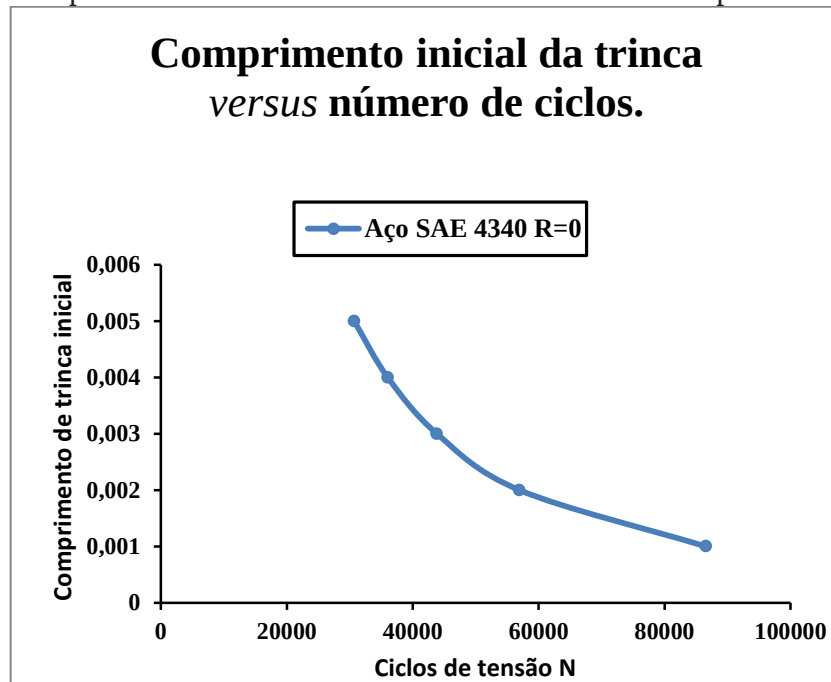
Gráfico 9- Comparativo entre as curvas de crescimento de trinca versus número de ciclos de vida do Aço SAE 4340.



FONTE: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)

Também verificamos para o Aço SAE 4340 a variação do número de ciclos de vida de um componente com a variação do tamanho de sua trinca inicial, os resultados dessa análise serão mostrados no Gráfico 10, gerado apartir dos valores mostrados no Anexo D.

Gráfico 10- Comprimento da trinca inicial versus número de ciclos para o Aço SAE 4340.



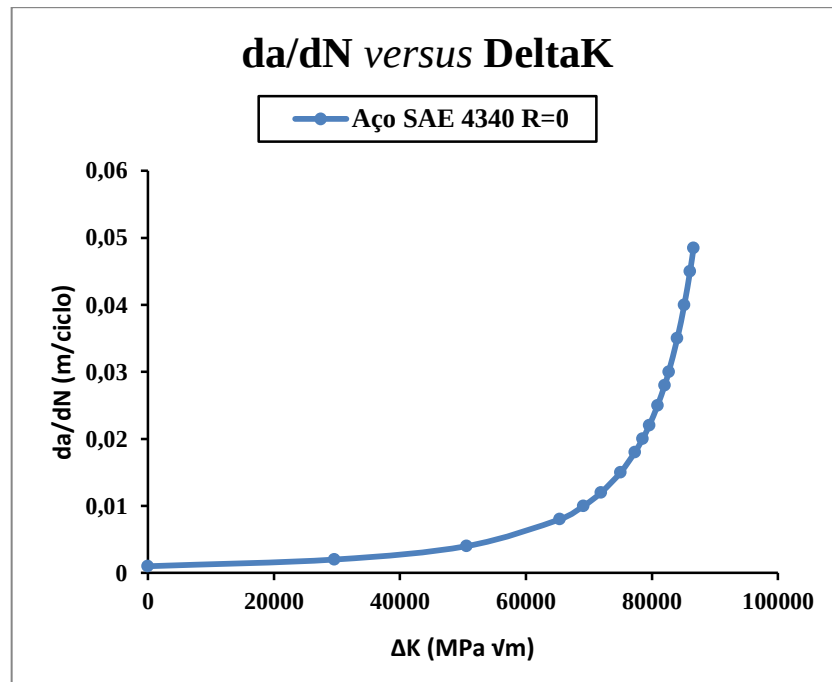
FONTE: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018).

O mesmo comportamento do Aço SAE 4140 para a curva de comprimento da trinca inicial versus o número de ciclos foi observado no Aço SAE 4340, como podemos ver no Gráfico 10.

O gráfico de propagação da trinca definida pela equação de Paris para o Aço SAE 4340 segue com o mesmo comportamento do Aço SAE 4140.

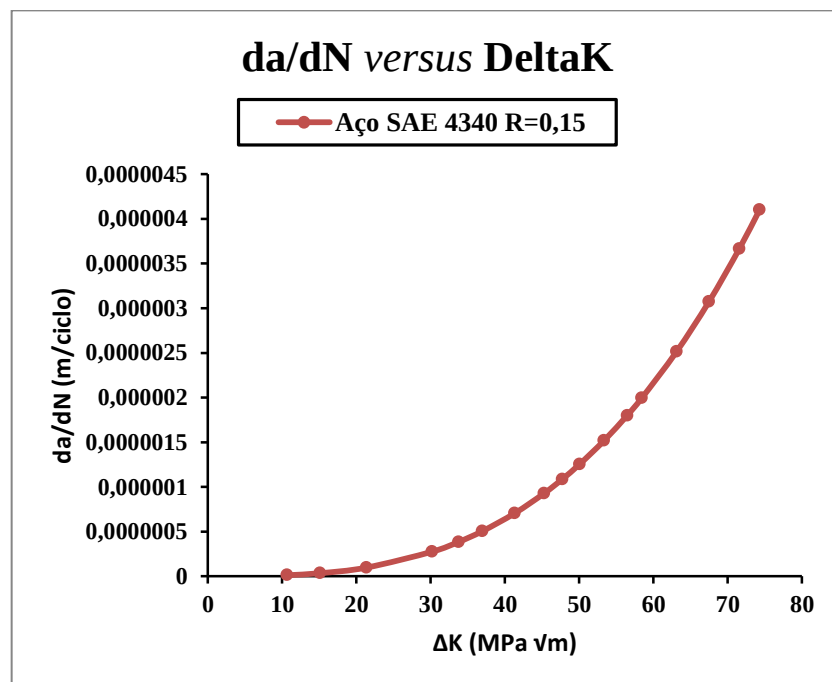
Os dados obtidos nessa análise estão nos Anexos B, cada um deles para um intervalo de tensão diferente e com as respectivas razões de tensão: $R=0$, $R=0,15$, $R=0,25$ e $R=0,35$. Apartir desses dados foram gerados os Gráficos 11, 12, 13 e 14:

Gráfico 11- da/dN versus a variação do fator de intensidade de tensão para $R=0$ do Aço SAE 4340.



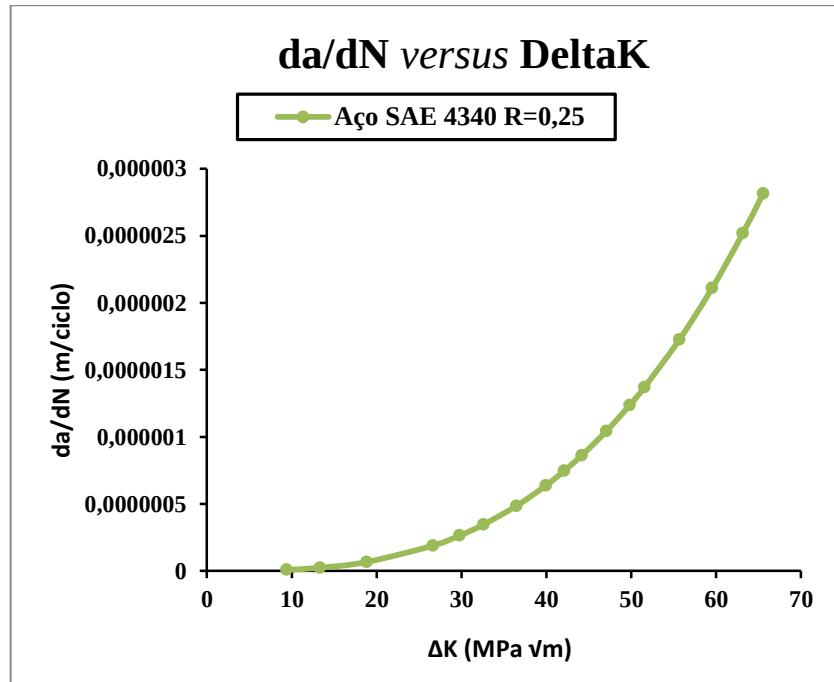
FONTE: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)

Gráfico 12- da/dN versus a variação do fator de intensidade de tensão para $R=0,15$ do Aço SAE 4340.



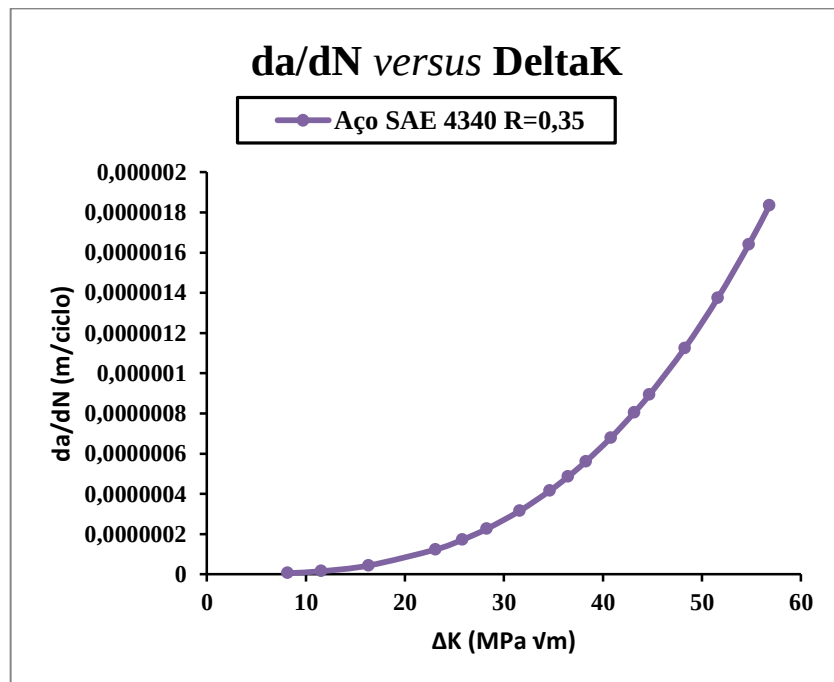
FONTE: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)

Gráfico 13- da/dN versus a variação do fator de intensidade de tensão para $R=0,25$ do Aço SAE 4340.



FONTE: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)

Gráfico 14- da/dN versus a variação do fator de intensidade de tensão para $R=0,35$ do Aço SAE 4340.



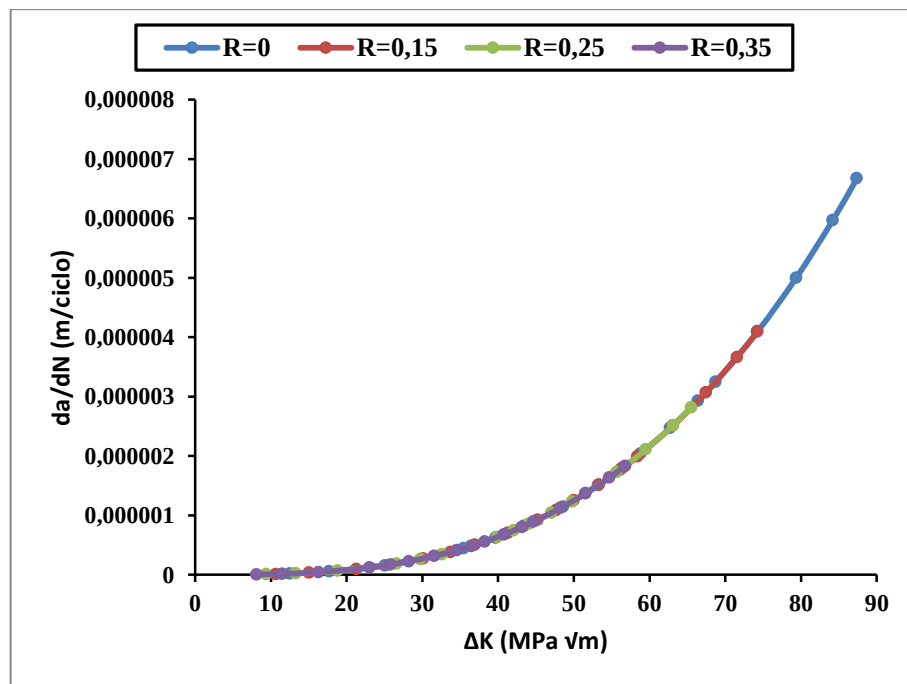
FONTE: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018)

Na análise 1 feita para o Aço SAE 4340, vimos que ela teve uma maior taxa de propagação de fadiga em relação aos outros duas simulações, isso se deve a uma alta variação de seus fator de intensidade de tensões, com um $R=0$.

Este mesmo comportamento foi observado no Aço SAE 4140, comprovando que o comportamento da forma da curva não varia com o material.

É importante observar que quanto maior o R , menor será a taxa de propagação de fadiga para o aço SAE 4340. A comprovação esta no Gráfico 15 que mostra as curvas das análises 1,2,3 e 4 lado a lado.

Gráfico 15- Comparativo das curvas de propagação da trinca para diferentes razões de tensão do Aço SAE 4340.



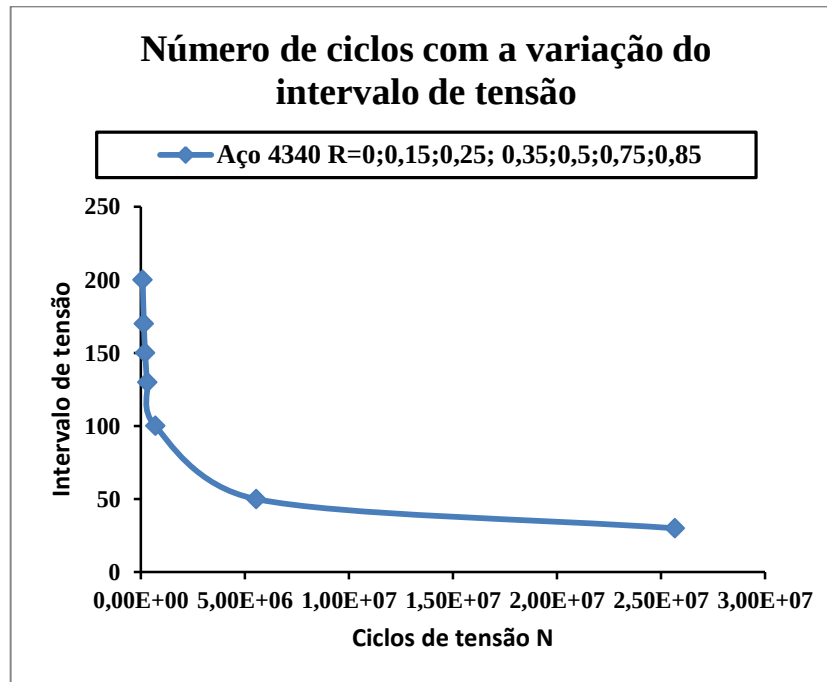
FONTE: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018).

Após definirmos as curvas de propagação de trinca mostradas acima, fizemos um estudo de como número de ciclos, para as análises descritas na Tabela 5, se comportará quando variarmos o intervalo de tensão, ou seja, iremos plotar um gráfico com os seguintes intervalos de tensão: 200-0; 200-30; 200-50; 200-70; 200-100; 200-150 e 200-170; e o número de ciclos referente a cada intervalo.

É importante lembrar que os outros parâmetros utilizados foram os mesmos adotados para as análises iniciais, como o tamanho inicial da trinca de $0,001m$ e $\beta = 1,12$.

Os resultados obtidos nessa análise serão exibidos no Gráfico 16:

Gráfico 16- Número de ciclos pela variação dos intervalos de tensão para o Aço SAE 4340.



FONTE: (AUTORIA PRÓPRIA, 2018).

5 CONCLUSÃO

A análise apresentada nesse trabalho se mostrou satisfatória visto que os resultados obtidos foram como a literatura previa. Apesar disso, os fatores necessários aos cálculos, como o fator de modificação da intensidade de tensão, são limitados a configurações básicas de um componente, dificultando essa metodologia de outras situações.

Podemos então tirar conclusões sobre a diferença entre os resultados dos materiais estudados, já que foram analisados sob os mesmos parâmetros, dessa forma, os resultados obtidos no estudo da propagação de trincas de fadiga para o Aço SAE 4140 e o Aço SAE 4340 apontam para as seguintes conclusões:

Os resultados mostraram que o Aço SAE 4340, tem as melhores condições para trabalhar em fadiga do que o Aço SAE 4140. Esse resultado já era esperado visto que a tenacidade à fratura do 4340 possui valor mais elevado.

A análise foi feita considerando uma trinca na superfície, por isso, destacamos aqui a importância de um bom acabamento superficial. Os prejuízos causados por uma trinca na superfície do componente foram dimensionados, e a partir da análise feita para diferentes comprimentos iniciais de trinca podemos concluir que quanto maior a trinca inicial menor o número de ciclos de vida.

A curva do comprimento inicial da trinca pelo número de ciclos não varia linearmente, mostrando que o tamanho inicial da trinca pode causar grandes prejuízos a vida útil de um componente submetido a esforços cíclicos.

As estimativas de propagação obtidas segundo a metodologia apresentada pode ser útil na elaboração de planos de manutenção para a substituição programada de peças trincadas, minimizando as ocorrências de quebras acidentais de componentes industriais e de riscos para a segurança de pessoas e equipamentos ou em projetos de componentes mecânicos que tenham solicitações dinâmicas, requerendo uma avaliação mais precisas do material.

REFERENCIAS

BORGES, Marcelo Lopes Martins. **ANÁLISE DE PROPAGAÇÃO DE TRINCAS POR MEIO DA MECÂNICA DA FRATURA**. 2010. 178 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal De Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J. Keith. **Elementos de máquinas de Shigley**: Projeto de engenharia mecânica. 8. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011. João Batista de Aguiar.

CALLISTER., Junior William D. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 7. ed. Eua: John Wiley & Sons, Inc., 2007.

DIETER, George E. **Metalurgia Mecânica**. Quarta edição Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.

Griffith, AA “The phenomenon of rupture and flow in solids”, Philosophical Trans-actions of the Royal Society series A, v.221, p.163-198, 1920.

J. W. Fischer and B. T. Yen, Design, Structural Details, and Discontinuities in Steel, Safety and Reliability of Metal Structures, ASCE, Nov. 2, 1972.

J. M. Barsom, Fatigue-Crack Propagation in Steels of Various Yield Strengths. Trans. ASME, J. Eng. Ind., **Series B**(4): p. 1190, 1971.

NORTON, Robert L.. Projeto de máquinas: Uma abordagem integrada. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. Tradução de Konstantinos Dimitriou Stavropoulos.

PEREIRA, Hélder Filipe Sousa Gomes. **COMPORTAMENTO À FADIGA DE COMPONENTES ESTRUTURAIS SOB A ACÇÃO DE SOLICITAÇÕES DE AMPLITUDE VARIÁVEL**. 2006. 225 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2006.

ROSA, Edison da. **Análise de resistência mecânica**. Santa Catarina: Granti, 2002.

RUCHERT, Cassius. **MECÂNICA DA FRATURA E FADIGA DOS MATERIAIS**. São Carlos: Sonoro-video, 2014. 50 slides, color.

ZAVANELLI, Ricardo Alexandre. Resistencia a fadiga do titanio comercialmente puro e de liga Ti-6Al-4V em diferentes meios de armazenagem. 1999. 126p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Odontologia de Piracicaba, Piracicaba, SP. Disponível em: <<http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/289184>>. Acesso em: 25 jul. 2018.

ANEXOS

Anexo A - Fatores de intensidade de tensão, taxa de propagação de trinca e número de ciclos, para aço 4140.

AÇO SAE 4140 R=0					
Comprimento da trinca	$K_i \text{ mín}$	$K_i \text{ máx}$	ΔK	da/dN	N
0,001	0	12,55199745	12,55199745	1,9776E-08	0
0,002	0	17,75120503	17,75120503	5,5935E-08	29621,07293
0,004	0	25,1039949	25,1039949	1,58208E-07	50566,33446
0,008	0	35,50241006	35,50241006	4,4748E-07	65376,87092
0,01	0	39,69290113	39,69290113	6,25372E-07	69151,71096
0,012	0	43,48139464	43,48139464	8,22073E-07	71938,18211
0,014	0	46,96527398	46,96527398	1,03593E-06	74103,82623
0,016	0	50,2079898	50,2079898	1,26566E-06	75849,50169
0,018	0	53,25361509	53,25361509	1,51024E-06	77295,47026
0,02	0	56,13423911	56,13423911	1,76882E-06	78518,71668
0,022	0	58,87408666	58,87408666	2,04067E-06	79571,11146
0,024	0	61,49197801	61,49197801	2,32517E-06	80489,04932
0,026	0	64,00287994	64,00287994	2,62179E-06	81298,92076
0,028	0	66,41892742	66,41892742	2,93005E-06	82020,39096
0,03	0	68,75012145	68,75012145	3,24953E-06	82668,45423
0,032	0	71,00482012	71,00482012	3,57984E-06	83254,76992
0,034	0	73,19009332	73,19009332	3,92064E-06	83788,55929
0,035702353	0	75	75	4,21875E-06	84207,10889
AÇO SAE 4140 R=0,15					
Comprimento da trinca	$K_i \text{ mín}$	$K_i \text{ máx}$	ΔK	da/dN	N
0,001	1,882799618	12,55199745	10,66919783	1,21449E-08	0
0,002	2,662680754	17,75120503	15,08852428	3,43511E-08	48232,97037
0,004	3,765599235	25,1039949	21,33839567	9,71595E-08	82338,83079
0,008	5,325361509	35,50241006	30,17704855	2,74809E-07	106455,316
0,01	5,953935169	39,69290113	33,73896596	3,84057E-07	112602,0125
0,012	6,522209196	43,48139464	36,95918545	5,04856E-07	117139,3155
0,014	7,044791097	46,96527398	39,92048288	6,36191E-07	120665,7052
0,016	7,53119847	50,2079898	42,67679133	7,77276E-07	123508,2462
0,018	7,988042263	53,25361509	45,26557283	9,27479E-07	125862,7645
0,02	8,420135866	56,13423911	47,71410324	1,08628E-06	127854,617
0,022	8,831112999	58,87408666	50,04297366	1,25323E-06	129568,2662
0,024	9,223796702	61,49197801	52,26818131	1,42795E-06	131062,9747
0,026	9,60043199	64,00287994	54,40244794	1,61011E-06	132381,7151
0,028	9,962839113	66,41892742	56,45608831	1,79942E-06	133556,5088
0,03	10,31251822	68,75012145	58,43760324	1,99562E-06	134611,7716
0,032	10,65072302	71,00482012	60,3540971	2,19847E-06	135566,4888
0,034	10,978514	73,19009332	62,21157932	2,40776E-06	136435,6756
0,035702353	11,25	75	63,75	2,59084E-06	137117,2137

AÇO SAE 4140 R=0,25					
Comprimento da trinca	$K_i \text{ mín}$	$K_i \text{ máx}$	ΔK	da/dN	N
0,001	3,137999363	12,55199745	9,413998088	8,343E-09	0
0,002	4,437801257	17,75120503	13,31340377	2,35976E-08	70212,91361
0,004	6,275998725	25,1039949	18,82799618	6,6744E-08	119860,9409
0,008	8,875602515	35,50241006	26,62680754	1,88781E-07	154967,3977
0,01	9,923225282	39,69290113	29,76967585	2,63829E-07	163915,1667
0,012	10,87034866	43,48139464	32,61104598	3,46812E-07	170520,1354
0,014	11,74131849	46,96527398	35,22395548	4,37033E-07	175653,514
0,016	12,55199745	50,2079898	37,65599235	5,33952E-07	179791,4114
0,018	13,31340377	53,25361509	39,94021132	6,37134E-07	183218,8925
0,02	14,03355978	56,13423911	42,10067933	7,46221E-07	186118,4395
0,022	14,71852166	58,87408666	44,15556499	8,60907E-07	188613,0049
0,024	15,3729945	61,49197801	46,11898351	9,80933E-07	190788,8577
0,026	16,00071998	64,00287994	48,00215995	1,10607E-06	192708,5529
0,028	16,60473186	66,41892742	49,81419557	1,23612E-06	194418,7045
0,03	17,18753036	68,75012145	51,56259109	1,3709E-06	195954,8545
0,032	17,75120503	71,00482012	53,25361509	1,51024E-06	197344,6398
0,034	18,29752333	73,19009332	54,89256999	1,65402E-06	198609,9183
0,035702353	18,75	75	56,25	1,77979E-06	199602,0359

AÇO SAE 4140 R=0,35					
Comprimento da trinca	$K_i \text{ mín}$	$K_i \text{ máx}$	ΔK	da/dN	N
0,001	4,393199108	12,55199745	8,158798343	5,43098E-09	0
0,002	6,21292176	17,75120503	11,53828327	1,53611E-08	107860,0744
0,004	8,786398215	25,1039949	16,31759669	4,34479E-08	184128,6644
0,008	12,42584352	35,50241006	23,07656654	1,22889E-07	238058,7016
0,01	13,89251539	39,69290113	25,80038573	1,71743E-07	251804,1364
0,012	15,21848812	43,48139464	28,26290652	2,25762E-07	261950,5948
0,014	16,43784589	46,96527398	30,52742809	2,84492E-07	269836,4178
0,016	17,57279643	50,2079898	32,63519337	3,47583E-07	276192,9966
0,018	18,63876528	53,25361509	34,61484981	4,14751E-07	281458,244
0,02	19,64698369	56,13423911	36,48725542	4,85762E-07	285912,4868
0,022	20,60593033	58,87408666	38,26815633	5,60419E-07	289744,6025
0,024	21,5221923	61,49197801	39,96978571	6,38551E-07	293087,1163
0,026	22,40100798	64,00287994	41,60187196	7,2001E-07	296036,1247
0,028	23,2466246	66,41892742	43,17230282	8,04666E-07	298663,2352
0,03	24,06254251	68,75012145	44,68757895	8,92402E-07	301023,0468
0,032	24,85168704	71,00482012	46,15313308	9,83113E-07	303158,0152
0,034	25,61653266	73,19009332	47,57356066	1,07671E-06	305101,7179
0,035702353	26,25	75	48,75	1,15857E-06	306625,7948

Anexo B - Fatores de intensidade de tensão, taxa de propagação de trinca e número de ciclos, para aço 4340.

AÇO SAE 4340 R=0					
Comprimento da trinca	$K_i \text{ mín}$	$K_i \text{ máx}$	ΔK	da/dN	N
0,001	0	12,55199745	12,55199745	1,9776E-08	0
0,002	0	17,75120503	17,75120503	5,5935E-08	29621,07293
0,004	0	25,1039949	25,1039949	1,58208E-07	50566,33446
0,008	0	35,50241006	35,50241006	4,4748E-07	65376,87092
0,01	0	39,69290113	39,69290113	6,25372E-07	69151,71096
0,012	0	43,48139464	43,48139464	8,22073E-07	71938,18211
0,015	0	48,61367709	48,61367709	1,14888E-06	75020,32609
0,018	0	53,25361509	53,25361509	1,51024E-06	77295,47026
0,02	0	56,13423911	56,13423911	1,76882E-06	78518,71668
0,022	0	58,87408666	58,87408666	2,04067E-06	79571,11146
0,025	0	62,75998725	62,75998725	2,472E-06	80906,13514
0,028	0	66,41892742	66,41892742	2,93005E-06	82020,39096
0,03	0	68,75012145	68,75012145	3,24953E-06	82668,45423
0,035	0	74,25861836	74,25861836	4,09487E-06	84038,12783
0,04	0	79,38580226	79,38580226	5,00298E-06	85142,18994
0,045	0	84,20135866	84,20135866	5,96977E-06	86056,70076
0,048483859	0	87,4	87,4	6,67628E-06	86608,44692

AÇO SAE 4340 R=0,15					
Comprimento da trinca	$K_i \text{ mín}$	$K_i \text{ máx}$	ΔK	da/dN	N
0,001	1,882799618	12,55199745	10,66919783	1,21449E-08	0
0,002	2,662680754	17,75120503	15,08852428	3,43511E-08	48232,97037
0,004	3,765599235	25,1039949	21,33839567	9,71595E-08	82338,83079
0,008	5,325361509	35,50241006	30,17704855	2,74809E-07	106455,316
0,01	5,953935169	39,69290113	33,73896596	3,84057E-07	112602,0125
0,012	6,522209196	43,48139464	36,95918545	5,04856E-07	117139,3155
0,015	7,292051563	48,61367709	41,32162552	7,05557E-07	122158,0722
0,018	7,988042263	53,25361509	45,26557283	9,27479E-07	125862,7645
0,02	8,420135866	56,13423911	47,71410324	1,08628E-06	127854,617
0,022	8,831112999	58,87408666	50,04297366	1,25323E-06	129568,2662
0,025	9,413998088	62,75998725	53,34598917	1,51812E-06	131742,1293
0,028	9,962839113	66,41892742	56,45608831	1,79942E-06	133556,5088
0,03	10,31251822	68,75012145	58,43760324	1,99562E-06	134611,7716
0,035	11,13879275	74,25861836	63,1198256	2,51476E-06	136842,0563
0,04	11,90787034	79,38580226	67,47793192	3,07245E-06	138639,8371
0,045	12,6302038	84,20135866	71,57115486	3,66618E-06	140128,9652
0,048483859	13,11	87,4	74,29	4,10007E-06	141027,3917

AÇO SAE 4340 R=0,25					
Comprimento da trinca	$K_i \text{ mín}$	$K_i \text{ máx}$	ΔK	da/dN	N
0,001	3,137999363	12,55199745	9,413998088	8,343E-09	0
0,002	4,437801257	17,75120503	13,31340377	2,35976E-08	70212,91361
0,004	6,275998725	25,1039949	18,82799618	6,6744E-08	119860,9409
0,008	8,875602515	35,50241006	26,62680754	1,88781E-07	154967,3977
0,01	9,923225282	39,69290113	29,76967585	2,63829E-07	163915,1667
0,012	10,87034866	43,48139464	32,61104598	3,46812E-07	170520,1354
0,015	12,15341927	48,61367709	36,46025782	4,84685E-07	177825,9581
0,018	13,31340377	53,25361509	39,94021132	6,37134E-07	183218,8925
0,02	14,03355978	56,13423911	42,10067933	7,46221E-07	186118,4395
0,022	14,71852166	58,87408666	44,15556499	8,60907E-07	188613,0049
0,025	15,68999681	62,75998725	47,06999044	1,04288E-06	191777,5055
0,028	16,60473186	66,41892742	49,81419557	1,23612E-06	194418,7045
0,03	17,18753036	68,75012145	51,56259109	1,3709E-06	195954,8545
0,035	18,56465459	74,25861836	55,69396377	1,72753E-06	199201,4882
0,04	19,84645056	79,38580226	59,53935169	2,11063E-06	201818,5243
0,045	21,05033966	84,20135866	63,15101899	2,51849E-06	203986,2536
0,048483859	21,85	87,4	65,55	2,81655E-06	205294,0964

AÇO SAE 4340 R=0,35					
Comprimento da trinca	$K_i \text{ mín}$	$K_i \text{ máx}$	ΔK	da/dN	N
0,001	4,393199108	12,55199745	8,158798343	5,43098E-09	0
0,002	6,21292176	17,75120503	11,53828327	1,53611E-08	107860,0744
0,004	8,786398215	25,1039949	16,31759669	4,34479E-08	184128,6644
0,008	12,42584352	35,50241006	23,07656654	1,22889E-07	238058,7016
0,01	13,89251539	39,69290113	25,80038573	1,71743E-07	251804,1364
0,012	15,21848812	43,48139464	28,26290652	2,25762E-07	261950,5948
0,015	17,01478698	48,61367709	31,59889011	3,15512E-07	273173,6954
0,018	18,63876528	53,25361509	34,61484981	4,14751E-07	281458,244
0,02	19,64698369	56,13423911	36,48725542	4,85762E-07	285912,4868
0,022	20,60593033	58,87408666	38,26815633	5,60419E-07	289744,6025
0,025	21,96599554	62,75998725	40,79399171	6,78873E-07	294605,863
0,028	23,2466246	66,41892742	43,17230282	8,04666E-07	298663,2352
0,03	24,06254251	68,75012145	44,68757895	8,92402E-07	301023,0468
0,035	25,99051642	74,25861836	48,26810193	1,12455E-06	306010,4791
0,04	27,78503079	79,38580226	51,60077147	1,37394E-06	310030,7326
0,045	29,47047553	84,20135866	54,73088313	1,63945E-06	313360,7674
0,048483859	30,59	87,4	56,81	1,83347E-06	315369,8568

Anexo C- Fatores de intensidade de tensão, taxa de propagação de trinca e número de ciclos, para aço 4140, com diferentes comprimentos de trinca inicial.

AÇO SAE 4140 R=0					
Comprimento da trinca	Kimáx	Kimin	DeltaK	da/dN	N
0,001	0	12,55199745	12,55199745	1,9776E-08	0
0,002	0	17,75120503	17,75120503	5,5935E-08	29621,07293
0,004	0	25,1039949	25,1039949	1,58208E-07	50566,33446
0,008	0	35,50241006	35,50241006	4,4748E-07	65376,87092
0,01	0	39,69290113	39,69290113	6,25372E-07	69151,71096
0,012	0	43,48139464	43,48139464	8,22073E-07	71938,18211
0,014	0	46,96527398	46,96527398	1,03593E-06	74103,82623
0,016	0	50,2079898	50,2079898	1,26566E-06	75849,50169
0,018	0	53,25361509	53,25361509	1,51024E-06	77295,47026
0,02	0	56,13423911	56,13423911	1,76882E-06	78518,71668
0,022	0	58,87408666	58,87408666	2,04067E-06	79571,11146
0,024	0	61,49197801	61,49197801	2,32517E-06	80489,04932
0,026	0	64,00287994	64,00287994	2,62179E-06	81298,92076
0,028	0	66,41892742	66,41892742	2,93005E-06	82020,39096
0,03	0	68,75012145	68,75012145	3,24953E-06	82668,45423
0,032	0	71,00482012	71,00482012	3,57984E-06	83254,76992
0,034	0	73,19009332	73,19009332	3,92064E-06	83788,55929
0,035702353	0	75	75	4,21875E-06	84207,10889
AÇO SAE 4140 R=0					
Comprimento da trinca	Kimáx	Kimin	DeltaK	da/dN	N
0,002	0	17,75120503	17,75120503	5,5935E-08	0
0,004	0	25,1039949	25,1039949	1,58208E-07	20945,26153
0,008	0	35,50241006	35,50241006	4,4748E-07	35755,798
0,01	0	39,69290113	39,69290113	6,25372E-07	39530,63803
0,012	0	43,48139464	43,48139464	8,22073E-07	42317,10918
0,014	0	46,96527398	46,96527398	1,03593E-06	44482,7533
0,016	0	50,2079898	50,2079898	1,26566E-06	46228,42876
0,018	0	53,25361509	53,25361509	1,51024E-06	47674,39733
0,02	0	56,13423911	56,13423911	1,76882E-06	48897,64375
0,022	0	58,87408666	58,87408666	2,04067E-06	49950,03853
0,024	0	61,49197801	61,49197801	2,32517E-06	50867,9764
0,026	0	64,00287994	64,00287994	2,62179E-06	51677,84783
0,028	0	66,41892742	66,41892742	2,93005E-06	52399,31804
0,03	0	68,75012145	68,75012145	3,24953E-06	53047,3813
0,032	0	71,00482012	71,00482012	3,57984E-06	53633,697
0,034	0	73,19009332	73,19009332	3,92064E-06	54167,48636
0,035702353	0	75	75	4,21875E-06	54586,03596

AÇO SAE 4140 R=0					
Comprimento da trinca	Kimáx	Kimín	DeltaK	da/dN	N
0,004	0	25,1039949	25,1039949	1,58208E-07	0
0,008	0	35,50241006	35,50241006	4,4748E-07	14810,53646
0,01	0	39,69290113	39,69290113	6,25372E-07	18585,3765
0,012	0	43,48139464	43,48139464	8,22073E-07	21371,84765
0,014	0	46,96527398	46,96527398	1,03593E-06	23537,49177
0,016	0	50,2079898	50,2079898	1,26566E-06	25283,16723
0,018	0	53,25361509	53,25361509	1,51024E-06	26729,1358
0,02	0	56,13423911	56,13423911	1,76882E-06	27952,38222
0,022	0	58,87408666	58,87408666	2,04067E-06	29004,777
0,024	0	61,49197801	61,49197801	2,32517E-06	29922,71486
0,026	0	64,00287994	64,00287994	2,62179E-06	30732,5863
0,028	0	66,41892742	66,41892742	2,93005E-06	31454,0565
0,03	0	68,75012145	68,75012145	3,24953E-06	32102,11977
0,032	0	71,00482012	71,00482012	3,57984E-06	32688,43546
0,034	0	73,19009332	73,19009332	3,92064E-06	33222,22483
0,035702353	0	75	75	4,21875E-06	33640,77443

AÇO SAE 4140 R=0					
Comprimento da trinca	Kimáx	Kimín	DeltaK	da/dN	N
0,003	0	21,74069732	21,74069732	1,02759E-07	0
0,004	0	25,1039949	25,1039949	1,58208E-07	7822,639165
0,008	0	35,50241006	35,50241006	4,4748E-07	22633,17563
0,01	0	39,69290113	39,69290113	6,25372E-07	26408,01566
0,012	0	43,48139464	43,48139464	8,22073E-07	29194,48681
0,014	0	46,96527398	46,96527398	1,03593E-06	31360,13093
0,016	0	50,2079898	50,2079898	1,26566E-06	33105,8064
0,018	0	53,25361509	53,25361509	1,51024E-06	34551,77496
0,02	0	56,13423911	56,13423911	1,76882E-06	35775,02138
0,022	0	58,87408666	58,87408666	2,04067E-06	36827,41616
0,024	0	61,49197801	61,49197801	2,32517E-06	37745,35403
0,026	0	64,00287994	64,00287994	2,62179E-06	38555,22546
0,028	0	66,41892742	66,41892742	2,93005E-06	39276,69567
0,03	0	68,75012145	68,75012145	3,24953E-06	39924,75894
0,032	0	71,00482012	71,00482012	3,57984E-06	40511,07463
0,034	0	73,19009332	73,19009332	3,92064E-06	41044,86399
0,035702353	0	75	75	4,21875E-06	41463,41359

AÇO SAE 4140 R=0					
Comprimento da trinca	Kimáx	Kimín	DeltaK	da/dN	N
0,005	0	28,06711955	28,06711955	2,21102E-07	0
0,006	0	30,74598901	30,74598901	2,90647E-07	3940,665294
0,008	0	35,50241006	35,50241006	4,4748E-07	9472,106494
0,01	0	39,69290113	39,69290113	6,25372E-07	13246,94653
0,012	0	43,48139464	43,48139464	8,22073E-07	16033,41768
0,014	0	46,96527398	46,96527398	1,03593E-06	18199,0618
0,016	0	50,2079898	50,2079898	1,26566E-06	19944,73726
0,018	0	53,25361509	53,25361509	1,51024E-06	21390,70583
0,02	0	56,13423911	56,13423911	1,76882E-06	22613,95225
0,022	0	58,87408666	58,87408666	2,04067E-06	23666,34703
0,024	0	61,49197801	61,49197801	2,32517E-06	24584,28489
0,026	0	64,00287994	64,00287994	2,62179E-06	25394,15633
0,028	0	66,41892742	66,41892742	2,93005E-06	26115,62653
0,03	0	68,75012145	68,75012145	3,24953E-06	26763,6898
0,032	0	71,00482012	71,00482012	3,57984E-06	27350,00549
0,034	0	73,19009332	73,19009332	3,92064E-06	27883,79486
0,035702353	0	75	75	4,21875E-06	28302,34446

Anexo D- Fatores de intensidade de tensão, taxa de propagação de trinca e número de ciclos, para aço 4340, com diferentes comprimentos de trinca inicial.

AÇO SAE 4340 R=0					
Comprimento da trinca	Kimáx	Kimín	DeltaK	da/dN	N
0,001	0	12,55199745	12,55199745	1,9776E-08	0
0,002	0	17,75120503	17,75120503	5,5935E-08	29621,07293
0,004	0	25,1039949	25,1039949	1,58208E-07	50566,33446
0,008	0	35,50241006	35,50241006	4,4748E-07	65376,87092
0,01	0	39,69290113	39,69290113	6,25372E-07	69151,71096
0,012	0	43,48139464	43,48139464	8,22073E-07	71938,18211
0,015	0	48,61367709	48,61367709	1,14888E-06	75020,32609
0,018	0	53,25361509	53,25361509	1,51024E-06	77295,47026
0,02	0	56,13423911	56,13423911	1,76882E-06	78518,71668
0,022	0	58,87408666	58,87408666	2,04067E-06	79571,11146
0,025	0	62,75998725	62,75998725	2,472E-06	80906,13514
0,028	0	66,41892742	66,41892742	2,93005E-06	82020,39096
0,03	0	68,75012145	68,75012145	3,24953E-06	82668,45423
0,035	0	74,25861836	74,25861836	4,09487E-06	84038,12783
0,04	0	79,38580226	79,38580226	5,00298E-06	85142,18994
0,045	0	84,20135866	84,20135866	5,96977E-06	86056,70076
0,048483859	0	87,4	87,4	6,67628E-06	86608,44692

AÇO SAE 4340 R=0					
Comprimento da trinca	Kimáx	Kimín	DeltaK	da/dN	N
0,002	0	17,75120503	17,75120503	5,5935E-08	0
0,004	0	25,1039949	25,1039949	1,58208E-07	20945,26153
0,008	0	35,50241006	35,50241006	4,4748E-07	35755,798
0,01	0	39,69290113	39,69290113	6,25372E-07	39530,63803
0,012	0	43,48139464	43,48139464	8,22073E-07	42317,10918
0,015	0	48,61367709	48,61367709	1,14888E-06	45399,25316
0,018	0	53,25361509	53,25361509	1,51024E-06	47674,39733
0,02	0	56,13423911	56,13423911	1,76882E-06	48897,64375
0,022	0	58,87408666	58,87408666	2,04067E-06	49950,03853
0,025	0	62,75998725	62,75998725	2,472E-06	51285,06221
0,028	0	66,41892742	66,41892742	2,93005E-06	52399,31804
0,03	0	68,75012145	68,75012145	3,24953E-06	53047,3813
0,035	0	74,25861836	74,25861836	4,09487E-06	54417,05491
0,04	0	79,38580226	79,38580226	5,00298E-06	55521,11701
0,045	0	84,20135866	84,20135866	5,96977E-06	56435,62783
0,048484	0	87,40012699	87,40012699	6,67631E-06	56987,3951

AÇO SAE 4340 R=0					
Comprimento da trinca	Kimáx	Kimín	DeltaK	da/dN	N
0,003	0	21,74069732	21,74069732	1,02759E-07	0
0,004	0	25,1039949	25,1039949	1,58208E-07	7822,639165
0,006	0	30,74598901	30,74598901	2,90647E-07	17101,73443
0,008	0	35,50241006	35,50241006	4,4748E-07	22633,17563
0,01	0	39,69290113	39,69290113	6,25372E-07	26408,01566
0,012	0	43,48139464	43,48139464	8,22073E-07	29194,48681
0,015	0	48,61367709	48,61367709	1,14888E-06	32276,63079
0,018	0	53,25361509	53,25361509	1,51024E-06	34551,77496
0,02	0	56,13423911	56,13423911	1,76882E-06	35775,02138
0,022	0	58,87408666	58,87408666	2,04067E-06	36827,41616
0,025	0	62,75998725	62,75998725	2,472E-06	38162,43984
0,028	0	66,41892742	66,41892742	2,93005E-06	39276,69567
0,03	0	68,75012145	68,75012145	3,24953E-06	39924,75894
0,035	0	74,25861836	74,25861836	4,09487E-06	41294,43254
0,04	0	79,38580226	79,38580226	5,00298E-06	42398,49464
0,045	0	84,20135866	84,20135866	5,96977E-06	43313,00546
0,048484	0	87,40012699	87,40012699	6,67631E-06	43864,77273

AÇO SAE 4340 R=0					
Comprimento da trinca	Kimáx	Kimin	DeltaK	da/dN	N
0,004	0	25,1039949	25,1039949	1,58208E-07	0
0,006	0	30,74598901	30,74598901	2,90647E-07	9279,095263
0,008	0	35,50241006	35,50241006	4,4748E-07	14810,53646
0,01	0	39,69290113	39,69290113	6,25372E-07	18585,3765
0,012	0	43,48139464	43,48139464	8,22073E-07	21371,84765
0,015	0	48,61367709	48,61367709	1,14888E-06	24453,99163
0,018	0	53,25361509	53,25361509	1,51024E-06	26729,1358
0,02	0	56,13423911	56,13423911	1,76882E-06	27952,38222
0,022	0	58,87408666	58,87408666	2,04067E-06	29004,777
0,025	0	62,75998725	62,75998725	2,472E-06	30339,80068
0,028	0	66,41892742	66,41892742	2,93005E-06	31454,0565
0,03	0	68,75012145	68,75012145	3,24953E-06	32102,11977
0,035	0	74,25861836	74,25861836	4,09487E-06	33471,79337
0,04	0	79,38580226	79,38580226	5,00298E-06	34575,85548
0,045	0	84,20135866	84,20135866	5,96977E-06	35490,3663
0,048484	0	87,40012699	87,40012699	6,67631E-06	36042,13357

AÇO SAE 4340 R=0					
Comprimento da trinca	Kimáx	Kimin	DeltaK	da/dN	N
0,005	0	28,06711955	28,06711955	2,21102E-07	0
0,006	0	30,74598901	30,74598901	2,90647E-07	3940,665294
0,008	0	35,50241006	35,50241006	4,4748E-07	9472,106494
0,01	0	39,69290113	39,69290113	6,25372E-07	13246,94653
0,012	0	43,48139464	43,48139464	8,22073E-07	16033,41768
0,015	0	48,61367709	48,61367709	1,14888E-06	19115,56166
0,018	0	53,25361509	53,25361509	1,51024E-06	21390,70583
0,02	0	56,13423911	56,13423911	1,76882E-06	22613,95225
0,022	0	58,87408666	58,87408666	2,04067E-06	23666,34703
0,025	0	62,75998725	62,75998725	2,472E-06	25001,37071
0,028	0	66,41892742	66,41892742	2,93005E-06	26115,62653
0,03	0	68,75012145	68,75012145	3,24953E-06	26763,6898
0,035	0	74,25861836	74,25861836	4,09487E-06	28133,3634
0,04	0	79,38580226	79,38580226	5,00298E-06	29237,42551
0,045	0	84,20135866	84,20135866	5,96977E-06	30151,93633
0,048484	0	87,40012699	87,40012699	6,67631E-06	30703,7036