

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Otávio Baumgratz Delgado Oliveira Pires**

**Caracterização microestrutural da propagação de trincas em  
aços estruturais.**

**Projeto de Graduação**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia  
Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Marcos Venicius Soares Pereira  
Coorientador: Thiago Abreu Pereira Peixoto

Rio de Janeiro  
Dezembro de 2018

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a meus pais, Virgílio Pires e Flávia Baumgratz, minha irmã, Nara Pires e meu irmão, Gustavo Pires, pelo amor, incentivo e apoio incondicional em todos os momentos, e incentivo a estudar e perseguir meus sonhos.

Ao corpo docente do departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio, ao meu orientador Marcos Venicius Pereira e ao meu coorientador Thiago Peixoto, pelo apoio, confiança, transmissão de conhecimento, entrega e disponibilidade para realizar este trabalho.

Ao Asafe Bittencourt, Adrian e Marques e toda equipe dos laboratórios de Metalografia e Tratamentos Térmicos, de Ensaio Mecânicos e de Estruturas e Materiais da PUC-Rio.

Aos meus amigos e minha namorada, que sempre me apoiaram e estiveram presentes em todos os momentos ao longo desta jornada, com muita parceria e paciência.

A Pontifícia Universidade Católica por proporcionar um ambiente amigável, acolhedor e de extremo incentivo ao estudo e preparo para vida profissional.

Aos meus colegas de curso que sempre me auxiliaram durante a jornada da graduação em Engenharia mecânica.

E a Deus, que me sustentou e me deu forças para enfrentar todos os desafios dessa longa e vitoriosa caminhada.

## RESUMO

Dois aços estruturais com composições químicas diferentes e propriedades mecânicas similares foram selecionados para a pesquisa, visando serem alternativas para a fabricação de eixo virabrequim (aço DIN 34CrNiMo6) de motores Diesel e gás natural de usinas termelétricas. Corpos de prova do tipo CT foram usinados em aços SAE 4140 e 4340 e submetidos a ensaios de propagação de trinca de fadiga, para levantamento das respectivas curvas  $da/dN$  versus  $\Delta K$ . Após os ensaios, as trincas de fadiga foram indicadas nas superfícies dos corpos de prova com líquidos penetrantes. Amostras da região de propagação de trinca, com ênfase para o limiar de propagação (threshold -  $\Delta K_{th}$ ), foram retiradas dos corpos de prova e analisadas por microscopia ótica, numa tentativa de correlacionar  $\Delta K_{th}$  e a propagação das trincas com características microestruturais e heterogeneidades metalúrgicas dos materiais, como por exemplo, inclusões, vazios e partículas de segunda fase.

Palavras chaves: Fadiga; Trinca; Curva  $da/dN$  versus  $\Delta K$ ; threshold; microestrutura; Aço SAE 4140; Aço SAE 4340, Eixo virabrequim.

## ABSTRACT

Two structural steels with different chemical compositions and similar mechanical properties were selected for the research, aiming to be alternatives for the manufacture of crankshaft (DIN 34CrNiMo6 steel) of Diesel and natural gas engines of thermoelectric plants. CT-type test specimens were machined in SAE 4140 and 4340 steels and subjected to fatigue crack propagation tests, in order to obtain the respective curves of  $da/dN$  versus  $\Delta K$ . After the tests, the fatigue cracks were indicated on the specimens' surfaces by means of penetrating liquid. Samples from the crack propagation region, with emphasis on the threshold ( $\Delta K_{th}$ ), were removed from the specimens and analyzed by optical microscopy, in an attempt to correlate  $\Delta K_{th}$  and the crack propagation with microstructural characteristics and metallurgical heterogeneities of the materials, such as inclusions, voids and second phase particles.

Key words: Fatigue; Crack;  $da/dN$  versus  $\Delta K$  curve; threshold; microstructure; SAE 4140 Steel; SAE 4340 Steel; crankshaft.

## Lista de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Experiência de Paris.....   | 17 |
| Figura 2 - Curva de Propagação de trincas por fadiga típica.....   | 17 |
| Figura 3 - Variação do $\Delta K_{th}$ com R para diferentes características dos aços....  | 20 |
| Figura 4 - Efeito do R no ferro puro.....  | 21 |
| Figura 5 - Efeito do R na microestrutura ferrita-perlita.....  | 21 |
| Figura 6 - Efeito do R na microestrutura ferrita-martensita.....   | 22 |
| Figura 7 - Efeito do R na microestrutura austenítica.....  | 22 |
| Figura 8 - Geometria do CP tipo C(T) .....   | 27 |
| Figura 9 – Corpo de Prova C(T) – Aço SAE 4140.....   | 28 |
| Figura 10 – Corpo de Prova C(T) – Aço SAE 4340.....  | 28 |
| Figura 11 – Representação esquemática do ciclo de carregamento.....  | 29 |
| Figura 12 - Máquina INSTRON utilizada nos ensaios de fadiga.....   | 30 |
| Figura 13 – Painel eletrônico da Máquina INSTRON utilizada para fornecer as cargas determinadas pelo instrumentador e o número de ciclos do ensaio de propagação de trinca por fadiga..... | 30 |
| Figura 14 - Máquina INSTRON com o corpo de prova fixado.....   | 31 |
| Figura 15 – Kit para END por líquido penetrante.....   | 32 |
| Figura 16 – Corpo de prova do aço SAE 4340 após aplicação de LP .....  | 32 |
| Figura 17 – Corpo de prova do aço SAE 4340 após aplicação de LP .....  | 33 |
| Figura 18 – Corpos de prova do aço SAE 4340 após aplicação do spray revelador.....   | 33 |
| Figura 19 – Corpos de prova do aço SAE 4140 após aplicação do spray revelador.....   | 34 |
| Figura 20 – Amostra do corpo de prova de aço 4140.....   | 34 |
| Figura 21 – Amostra do corpo de prova de aço 4340.....   | 35 |
| Figura 22 – Microscópio Ótico Zeiss Discovery V8.....  | 36 |
| Figura 23 – Microscópio Ótico Zeiss Discovery V8.....  | 36 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 24 – Trinca de fadiga medida microscopicamente sob efeito do LP na amostra do aço SAE 4140..... | 37 |
| Figura 25 – Trinca de fadiga medida microscopicamente na amostra do aço SAE 4140.....                  | 37 |
| Figura 26 – Trinca de fadiga medida microscopicamente sob efeito do LP na amostra do aço SAE 4340..... | 38 |
| Figura 27 – Trinca por fadiga medida microscopicamente na amostra do aço SAE 4340.....                 | 38 |
| Figura 28 – Primeira lixa utilizada para lixamento da superfície das amostras.                         | 39 |
| Figura 29 – Máquina Arotec Aropol 2V.....  | 39 |
| Figura 30 – Amostra do aço SAE 4140 durante o processo de lixamento.....                               | 40 |
| Figura 31 – Máquina Struers DPU-10 para polimento com pasta de 6 $\mu$ m.....                          | 40 |
| Figura 32 – Máquina Arotec Aropol VV para polimento com pasta de 3 $\mu$ m.....                        | 41 |
| Figura 33 – Máquina Arotec Aropol VV para polimento com pasta de 1 $\mu$ m .....                       | 41 |
| Figura 34 – Amostras em banho de ultrassom na máquina GUIMIS.....                                      | 42 |
| Figura 35 – Microscópio Ótico Carl Zeiss AXIO Lab.A1.....  | 43 |
| Figura 36 – Microscópio Ótico Carl Zeiss AXIO Lab.A1.....  | 43 |
| Figura 37 – Gráfico $da/dN$ versus $\Delta K$ – Aço 4140.....  | 47 |
| Figura 38 – Gráfico $da/dN$ versus $\Delta K$ – Aço 4340.....  | 47 |
| Figura 39 – Microestrutura do aço SAE 4140 na região de threshold.....                                 | 49 |
| Figura 40 – Inclusões no aço SAE 4140 na região de threshold.....                                      | 49 |
| Figura 41 – Inclusões no aço SAE 4140 na região de threshold.....                                      | 50 |
| Figura 42 – Microestrutura do aço SAE 4340 na região de threshold.....                                 | 51 |
| Figura 43 – Desvio de trinca em barreiras microestruturais aço SAE 4340 na região de threshold.....    | 51 |
| Figura 44 – Microestrutura do aço SAE 4340 na região de threshold.....                                 | 52 |

## Lista de Tabelas

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Composição química dos aços.....   | 26 |
| Tabela 2 - Dimensão dos corpos de prova.....  | 27 |
| Tabela 3 – Dados referentes ao ensaio de propagação de trinca por fadiga no SAE 4140..... | 44 |
| Tabela 4 – Dados referentes ao ensaio de propagação de trinca por fadiga no SAE 4340..... | 45 |
| Tabela 5 – Valores de $\Delta K_{th}$ .....   | 48 |

## Lista de Símbolos

|                    |  |
|--------------------|--|
| $S_e$              | Resistência ao escoamento              |
| $S_{Rt}$           | Resistência à ruptura por tração       |
| $S_{Rc}$           | Resistência à ruptura por compressão   |
| $S_R$              | Resistência à ruptura                  |
| $\varepsilon_{pl}$ | Componente plástica da deformação      |
| E                  | Módulo de elasticidade ou de Young     |
| G                  | Módulo de elasticidade ao cisalhamento |
| HR                 | Dureza Rockwell                        |
| HB                 | Dureza Brinell                         |
| HV                 | Dureza Vickers                         |
| $d_0$              | Diâmetro inicial                       |
| $d_f$              | Diâmetro final                         |
| $\Delta\sigma$     | Varição de tensão                      |
| $\sigma_{max}$     | Tensão máxima                          |
| $\sigma_1$         | Tensão Principal na direção 1          |
| $\sigma_2$         | Tensão Principal na direção 2          |

|                     |  |
|---------------------|--|
| $\sigma_3$          | Tensão Principal na direção 3                        |
| $\sigma_x$          | Tensão na direção x                                  |
| $\sigma_y$          | Tensão na direção y                                  |
| $\tau_{xy}$         | Tensão cisalhante                                    |
| $\Delta\varepsilon$ | Varição de deformação                                |
| N                   | Número de ciclos                                     |
| $\Delta K$          | Varição do fator de intensidade de tensão            |
| $\Delta K_{th}$     | Limiar de propagação de trinca                       |
| $K_{max}$           | Fator de intensidade de tensão máximo                |
| $K_{min}$           | Fator de intensidade de tensão mínimo                |
| $K_C$               | Tenacidade a fratura                                 |
| R                   | Razão de tensão ( $K_{min}/K_{max}$ )                |
| $a$                 | Comprimento de trinca                                |
| $a_c$               | Comprimento crítico da trinca                        |
| $\Delta a$          | Propagação de trinca                                 |
| $da/dN$             | Taxa de crescimento de trincas pelo número de ciclos |

### **Lista de Abreviaturas e Siglas:**

|                |   |
|----------------|---|
| CP             | Corpo de prova  |
| RA             | Redução de área   |
| H              | Dureza  |
| A              | Área  |
| F              | Força   |
| END            | Ensaio não destrutivo   |
| LP             | Líquido Penetrante  |
| AISI           | American Iron and Steel Institute                                   |
| ASTM           | American Society for Testing and Materials                          |
| C(T)           | Tipo do corpo de prova para ensaios de fadiga                       |
| DIN            | Deutsches Institut für Normung - Instituto Alemão para Normatização |
| $ZP_{cíclica}$ | Zona plástica cíclica   |
| $d_{grão}$     | diâmetro do grão  |

# Sumário

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. Introdução .....</b>   | <b>10</b> |
| <b>1.1. Motivação.....</b>   | <b>10</b> |
| <b>1.2. Objetivo.....</b>  | <b>10</b> |
| <b>1.3. Considerações Iniciais .....</b>                               | <b>10</b> |
| <b>2. Revisão Bibliográfica .....</b>                                  | <b>11</b> |
| <b>2.1. Propriedades Mecânicas .....</b>                               | <b>11</b> |
| <b>2.2. Tipos de Falhas .....</b>                                      | <b>12</b> |
| <b>2.3. Falha por Fadiga.....</b>                                      | <b>13</b> |
| <b>2.3.1. Os métodos tradicionais de dimensionamento à Fadiga.....</b> | <b>15</b> |
| <b>2.3.2. Tipos de Ensaio de Fadiga.....</b>                           | <b>23</b> |
| <b>2.4. Ensaio não destrutivos.....</b>                                | <b>23</b> |
| <b>2.4.1. Ensaio Por Líquidos Penetrantes.....</b>                     | <b>24</b> |
| <b>3. Metodologia Experimental .....</b>                               | <b>25</b> |
| <b>3.1. Materiais e Corpos de Prova .....</b>                          | <b>25</b> |
| <b>3.2. Procedimento Experimental.....</b>                             | <b>29</b> |
| <b>3.2.1. Ensaio de Fadiga .....</b>                                   | <b>29</b> |
| <b>3.2.2. Líquidos Penetrantes .....</b>                               | <b>31</b> |
| <b>3.2.3. Análise Microestrutural do material.....</b>                 | <b>35</b> |
| <b>4. Resultados e Discussões.....</b>                                 | <b>44</b> |
| <b>5. Conclusão .....</b>  | <b>52</b> |
| <b>6. Sugestões para trabalhos futuros.....</b>                        | <b>52</b> |
| <b>7. Referências Bibliográficas.....</b>                              | <b>53</b> |

## **1. Introdução**

### **1.1. Motivação**

Eixos virabrequins de motores Diesel e gás natural de unidades geradoras de usinas termelétricas, quando fabricados com o aço estrutural DIN 34CrNiMo6 vem apresentando falhas por fadiga com baixo número de ciclos de carregamento. Essas falhas apresentadas podem ter correlação com heterogeneidades metalúrgicas do material. A motivação deste trabalho consiste em correlacionar resistência à propagação de trincas de fadiga com aspectos microestruturais de materiais estruturais.

### **1.2. Objetivo**

O objetivo deste projeto consiste em correlacionar a propagação de trincas de fadiga em dois aços estruturais com seus aspectos microestruturais e heterogeneidades metalúrgicas. Com base nos resultados obtidos, selecionar a melhor alternativa de material para a fabricação de eixos de virabrequins de motores Diesel ou gás natural de turbinas de usinas termelétricas.

### **1.3. Considerações Iniciais**

A fadiga é um tipo de falha mecânica decorrente de carregamentos cíclicos. Esse tipo de falha depende do estado de tensão atuante, geometria e material do componente. O estudo da iniciação de trincas em materiais estruturais é requisito fundamental para evitar falhas catastróficas que em engenharia podem levar a perdas de vidas, recursos materiais e tempo.

Um estudo prévio pode evitar que se utilizem fatores de segurança exagerados, fazendo com que o projeto seja confiável e economicamente viável. A influência de algumas características microestruturais na fase I de propagação da trinca de fadiga, pode ser de fácil explicação. Como por exemplo, obstáculos no caminho da trinca como vazios ou inclusões podem ancorar ou cegar a ponta de uma trinca, dificultando assim o seu progresso e, conseqüentemente, aumentando  $\Delta K_{th}$ .

Por outro lado, os obstáculos também podem funcionar como concentradores de tensão nas cargas mais altas, aumentando a taxa de propagação da trinca. Portanto, quanto maior o valor de  $\Delta K_{th}$ , maior é quantidade de ciclos que a estrutura suporta antes da trinca se propagar de fato, visto que as trincas na região do Threshold são incipientes.

## 2. Revisão Bibliográfica

### 2.1. Propriedades Mecânicas

Conforme Ashby e Jones [2, 3], a maioria dos materiais, quando em serviço, são suscetíveis a forças ou cargas. Nessas circunstâncias, é importante compreender as características do material e então criar um componente de modo que, as deformações resultantes não excedam o esperado visando evitar falhas mecânicas.

As propriedades mecânicas dos materiais quantificam as diversas respostas do material às cargas que lhe são impostas. Entre essas propriedades destacam-se: rigidez, resistência ao escoamento, à ruptura, ductilidade, tenacidade e dureza do material.

A rigidez dos materiais estruturais, medida em GPa, relaciona tensões e deformações elásticas que atuam na peça. Além disso, a energia de ligação entre os átomos é a causa física da rigidez dos materiais. Ou seja, os materiais rígidos possuem ligações atômicas fortes e elevados módulos de elasticidade  $E$  (tração) e  $G$  (cisalhamento).

A resistência ao escoamento ( $S_e$ ), medida em MPa, quantifica a resistência do material ao início da deformação plástica.  $S_e$  é obtida através de um teste de tração uniaxial. Já a resistência à ruptura por tração ( $S_{Rt}$ ), ou por compressão ( $S_{Rc}$ ), quantificam a resistência do material até sua falha e são medidas através da divisão entre a maior força suportada pelo corpo de prova pela sua área original. É importante citar que as resistências tendem a diminuir quando a temperatura aumenta.

A ductilidade do material indica sua capacidade em tolerar deformações plásticas ( $\epsilon_{pl}$ ) antes de romper. Uma das formas de se medir a ductilidade é através da redução de área experimentada pelo corpo de provas, vide equação abaixo:

$$RA = (d_0^2 - d_f^2) / d_0^2 \quad (\text{Eq.1})$$

Em geral, os materiais considerados dúcteis possuem  $RA > 5\%$ .

A tenacidade quantifica a resistência do material a propagação de trincas e pode ser medida pela energia necessária para propagá-las. No caso das ligas metálicas, a tenacidade depende muito da ductilidade do material. Os testes mais usados para quantificar, ainda que indiretamente, a tenacidade dos materiais na prática são os testes de Charpy e de Izod.

A dureza (H) quantifica a resistência a penetração e é medida pela razão entre a força F aplicada através de um penetrador padronizado muito duro e a área A da impressão residual por ele deixada na peça,  $H=F/A$ . Em mecânica, prefere-se utilizar a dureza Vickers (HV), onde o penetrador é uma pirâmide especial de diamante, a dureza Brinell (HB) onde o penetrador é uma esfera de aço duro e a dureza Rockwell (HR), medida pela profundidade da penetração residual de um cone de diamante ou esferas de aço.

O comportamento mecânico de qualquer material utilizado em engenharia é função de sua estrutura interna e de sua aplicação em projeto, por isso, na indústria mecânica, estas propriedades são de fundamental importância para a escolha correta do material para um eventual projeto de engenharia.

## 2.2. Tipos de Falhas

Segundo Castro e Meggiolaro [4], chama-se de “falha” a perda parcial ou terminal da funcionalidade ou da capacidade operacional de qualquer equipamento. Chama-se de “mecanismo de dano”, qualquer processo que possa contribuir para a falha, agindo de forma independente ou concomitante. As falhas podem ser divididas nos seguintes grupos: quebra, distorção excessiva, desgaste excessivo e obsolescência.

As duas primeiras podem ser evitadas pelo dimensionamento e modo de operação corretos, mas o desgaste e a obsolescência são inevitáveis e só podem ser retardados por manutenção apropriada. As falhas também podem ser didaticamente separadas por suas causas primárias, como por exemplo: mecânicas, de materiais, químicas ou eletroquímicas, eletro-eletrônicas, econômicas e humanas.

Os principais mecanismos de dano são:

- 1) Deflexão Excessiva: quando a rigidez da estrutura é insuficiente para resistir às cargas ou sobrecargas operacionais elásticas, plásticas ou de fluência.
- 2) Flambagem: é o mecanismo de falha mecânica associada à instabilidade estrutural causada por tensões compressivas. Dominante nas estruturas esbeltas (cujo comprimento é muito maior que a menor dimensão transversal).
- 3) Fluência: é um mecanismo de falha que causa a variação contínua das deformações numa estrutura sob carga (mesmo constante), e pode levá-la a fratura. Nos metais, essas deformações são causadas por

micromecanismos como escalada de discordâncias e deslizamento dos contornos dos grãos, crescem ao longo do tempo e dependem da tensão ( $\sigma$ ) e temperatura ( $\theta$ ), ou seja, a deformação por fluência é função da tensão, temperatura e tempo. A fluência pode ser o mecanismo de falha dominante quando as temperaturas de trabalho são altas.

- 4) Desgaste: provoca perda de matéria superficial, e é causado pelo deslizamento ou pelo rolamento relativo entre duas ou mais superfícies que transmitam cargas de contato compressivas, com ou sem abrasivos entre elas. Como a fluência, o desgaste também é um tipo de falha mecânica paulatina, isto é, que progride ao longo do tempo, e pode ser dividido em: adesivo, abrasivo, fadiga superficial e erosivo.
- 5) Fratura: os principais micromecanismos de fraturamento são a clivagem, associada à fratura frágil, e a geração de coalescência de microcavidades, associada à fratura dúctil. Macroscopicamente, as fraturas ocorrem por propagação brusca de trincas nas estruturas frágeis, ou por esgotamento da ductilidade nas estruturas tenazes. Materiais que apresentam uma extensa zona plástica à frente da ponta do defeito (trincas) são dúcteis, em contrapartida, àqueles cujos tamanhos da zona plástica é pequeno são conhecidos como frágeis. A propagação estável ocorre enquanto o tamanho da trinca não atinge o  $a_c$ . A partir desse momento, a trinca passa a se propagar de maneira instável. O que ocorre é que em materiais frágeis, rapidamente o valor de  $a_c$  é alcançado, ou seja, a trinca muda o seu regime de propagação.
- 6) Fadiga: é o tipo de falha mecânica induzida primariamente pelas cargas variáveis atuantes na peça, provoca a geração e/ou a propagação de uma trinca até a eventual quebra da estrutura. Este, em geral, é o mecanismo de falha dominante nas estruturas mecânicas.

Como em geral as máquinas e equipamentos trabalham sob cargas dinâmicas que induzem tensões variáveis relevantes ao longo da sua vida operacional, a fadiga é o mais importante dentre todos os vários mecanismos indutores de falhas mecânicas, pois ela afeta a grande maioria das falhas estruturais causadas na prática.

### **2.3. Falha por Fadiga**

Fadiga é o tipo de falha mecânica causada primariamente pela aplicação repetida de cargas variáveis, cuja principal característica é gerar e/ou propagar paulatinamente uma trinca, até a eventual fratura da peça. As falhas por fadiga são localizadas, progressivas e acumulativas. Logo, a modelagem do

“trincamento”, que significa o crescimento estável da trinca, pode ser tratada como um problema local, que pouco depende das tensões na peça como um todo. A iniciação da trinca depende dos detalhes da geometria e do material do ponto crítico da peça, e das tensões e deformações que nele atua. Já a propagação da trinca, que é paulatina e estável, depende da história dos fatores de intensidade de tensões que a solicita em serviço, mas a fratura final da peça pode ser brusca, quase instantânea. A grande maioria das falhas estruturais que ocorrem na prática envolve problemas de fadiga.

A fratura por fadiga ocorre porque a tensão máxima do ciclo excede o limite de fadiga, mesmo que esse valor esteja bem abaixo da tensão de escoamento do material obtido em um ensaio de tração.

Três são os fatores considerados causadores da fratura por fadiga:

- 1- Carregamentos que produzem tensões de tração suficientemente altas;
- 2- Variações ou flutuações da tensão de tração suficientemente grande;
- 3- Número de ciclos ou tempo de atuação da carga suficientemente longo.

A fratura por fadiga é causada pela ação simultânea de tensões cíclicas, tensões de tração e deformações plásticas, mesmo que localizadas, atuando durante certo tempo relativamente longo. Se um desses três fatores não estiver presente, uma trinca por fadiga não se inicia e, conseqüentemente, não se propaga.

Trincas de fadiga iniciam-se sob ação de tensões cíclicas e se propagam sob ação de tensões de tração. Tensões de compressão não causam fratura por fadiga.

A modelagem das falhas por fadiga precisa ser precisa e confiável, já que a geração e a propagação paulatina e irreversível de uma trinca em geral não provocam mudanças evidentes no comportamento global da estrutura. Isto porque o dano gerado pelo surgimento e propagação da trinca fica quase sempre restrito à região crítica da peça, e não tende a gerar avisos prévios de falha iminente. Assim, as fraturas das peças fadigadas podem ocorrer de forma brusca e inesperada, e por isso tem que ser evitadas a qualquer custo nas estruturas potencialmente perigosas. Portanto, o controle das falhas por fadiga nessas estruturas deve ser feito através de um plano de garantia da segurança que inclua um programa periódico de inspeções e de avaliações de integridade estrutural baseado na modelagem precisa do processo de propagação da trinca.

Nas peças inicialmente não trincadas, as falhas por fadiga começam pela geração de uma trinca no seu ponto mais solicitado, quase sempre a raiz de um entalhe que atua como concentrador de tensão. Quando a variação das tensões cíclicas que solicitam aquele ponto crítico é pequena em relação à resistência ao escoamento macroscópico do material daquele ponto, a geração por fadiga é

lenta (no sentido de requerer muitos ciclos de carga), e muito influenciada pelas características locais, ou pelos detalhes: (i) das propriedades mecânicas do material; (ii) do acabamento superficial; (iii) do gradiente de tensões atuantes; e (iv) do estado das tensões residuais lá atuantes.

Nestes casos, nos quais a vida à fadiga é relativamente longa, a resistência ao crescimento estável da trinca do ponto crítico aumenta com: (i) a resistência (localizada) do material a ruptura,  $S_R$ ; (ii) a melhoria do acabamento superficial; (iii) o aumento do gradiente de tensões; e (iv) a presença de tensões residuais compressivas.

Os detalhes do ponto crítico têm menos importância quando as cargas que lá atuam são altas o suficiente para induzirem (pelo menos localmente) escoamento macroscópico cíclico. Nestes casos, a vida de iniciação é curta, e a propriedade controladora da resistência à fadiga é a ductilidade do material. A chamada vida de iniciação finda quando se pode detectar uma pequena trinca no ponto crítico, mas a vida total à fadiga pode ser dominada pela sua propagação até a fratura final das grandes estruturas.

### 2.3.1. Os métodos tradicionais de dimensionamento à Fadiga

A iniciação das trincas por fadiga é um fenômeno gerado por deformações plásticas cíclicas, as quais são associadas ao movimento cíclico de discordâncias nos metais, e controladas pelas tensões de Tresca (eq. 2) ou von Mises (eq.3).

$$\sigma_{Tresca} = \sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}}{2} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$\sigma_{Mises} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}{2}} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \quad (\text{Eq. 3})$$

As metodologias tradicionais de projeto à fadiga (isto é, baseada em rotinas bem estabelecidas e consagradas na prática) podem ser divididas em três grupos [4 e 5]:

#### 1- Método S-N ou de Wöhler:

A metodologia S-N, desenvolvida a partir dos trabalhos pioneiros de Wöhler em meados do século XIX, correlaciona as variações de tensões  $\Delta\sigma$  e tensões máximas ( $\sigma_{max}$ ) das tensões elásticas cíclicas que atuam nos pontos críticos, em geral raízes de entalhes, com o número de ciclos  $N$  que lá iniciam uma macrotrinca por fadiga. Este método não quantifica explicitamente qualquer efeito plástico nem reconhece a presença das trincas, e em princípio só deve ser usado para evitar ou prever a iniciação de trincas por fadiga quando as tensões atuantes no ponto crítico da peça são

menores que a resistência ao escoamento cíclico do material, as quais são associadas a vidas longas. Mas como a grande maioria das peças. Máquinas e estruturas são projetadas para trabalhar sob tensões elásticas e ter vidas longas, o SN ainda é o método mais usado na prática.

## 2- Método $\epsilon$ -N ou de Coffin-Manson:

A metodologia  $\epsilon$ -N, que é muito mais recente e poderoso do que o S-N correlaciona as variações  $\Delta\epsilon$  das deformações elastoplásticas macroscópicas cíclicas que atuam no ponto crítico com o número de ciclos N necessários para lá iniciar uma macrotrinca por fadiga. O dimensionamento à fadiga pela rotina  $\epsilon$ -N tradicional reconhece o escoamento localizado, considerando o amolecimento ou endurecimento cíclico do material no ponto crítico da peça, mas não a transição a partir da curva tensão x deformação ( $\sigma\epsilon$ ) monotônica, pois usa propriedades obtidas numa única curva  $\sigma\epsilon$  cíclica estabilizada. Suas grandes vantagens são prever qualquer vida de iniciação, quantificar os efeitos plásticos induzidos por sobrecargas, e também as tensões residuais geradas por descargas após escoamentos localizados, em particular, nas raízes dos entalhes. A sua principal desvantagem é precisar de equações não-lineares e não-inversíveis, que só são solucionadas numericamente, um problema nada trivial no caso de cargas complexas. As equações  $\epsilon$ -N devem ser usadas sequencialmente, para reconhecer e preservar os efeitos de memória. Além disso, como na metodologia S-N, o método  $\epsilon$ -N também não reconhece a presença das trincas.

## 3- Método $da/dN$ ou de Paris:

Através de estudos de Paris, Gomez e Anderson em [20], o método  $da/dN$  ou de Paris (Eq. 4) é usado para prever a vida residual à fadiga de estruturas trincadas em função da variação do fator de intensidade de tensões ( $\Delta K$ ) e do máximo valor ( $K_{max}$ ) que atinge a tenacidade à fratura da peça,  $K_C$  ou  $K_{Ic}$ . Os parâmetros  $A$  e  $m$  da equação de Paris, dependem do material.

$$\frac{da}{dN} = A \Delta K^m \quad (\text{Eq. 4})$$

A trinca é o ponto crítico da peça, mas como tem um raio de ponta muito pequeno, idealmente nulo, ela só pode ser bem modelada pelos conceitos da Mecânica da fratura.

No início da década de 60, Paris mostrou convincentemente ser o  $\Delta K$ , e não a tensão, o parâmetro que controla a propagação das trincas por fadiga, como pode ser observado na Figura 1:

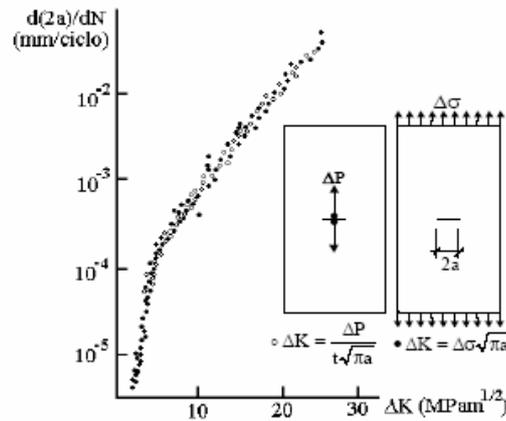


Figura 3 - Experiência de Paris [5].

Num clássico experimento, Paris usou duas chapas idênticas, feitas do mesmo material e com uma trinca central de mesmo comprimento. A chapa 1 foi carregada pelas bordas enquanto a chapa 2 foi carregada pelas faces da trinca, mantendo a mesma variação de tensão nas duas chapas. Apesar disso, a trinca acelerava na chapa 1 e desacelerava na chapa 2. Como ambas trabalhavam sob o mesmo intervalo de tensões ( $\Delta\sigma$ ), a tensão não podia estar controlando a propagação das trincas. Entretanto, devido à maneira da aplicação da carga, na chapa 1  $\Delta K$  aumentava à medida que a trinca crescia, enquanto na chapa 2  $\Delta K$  decrescia à medida que a trinca crescia.

Assim, Paris sugeriu que era  $\Delta K$  que controlava a propagação, e mostrou que quando se relacionava a taxa de propagação da trinca ( $da/dN$ ) com  $\Delta K$ , os pontos experimentais gerados tanto na chapa 1 quanto na chapa 2 coincidiam.

Plotando  $da/dN$  versus  $\Delta K$ , na forma logarítmica, tipicamente obtém-se uma curva com 3 fases bem distintas, como apresentado na Figura 2.

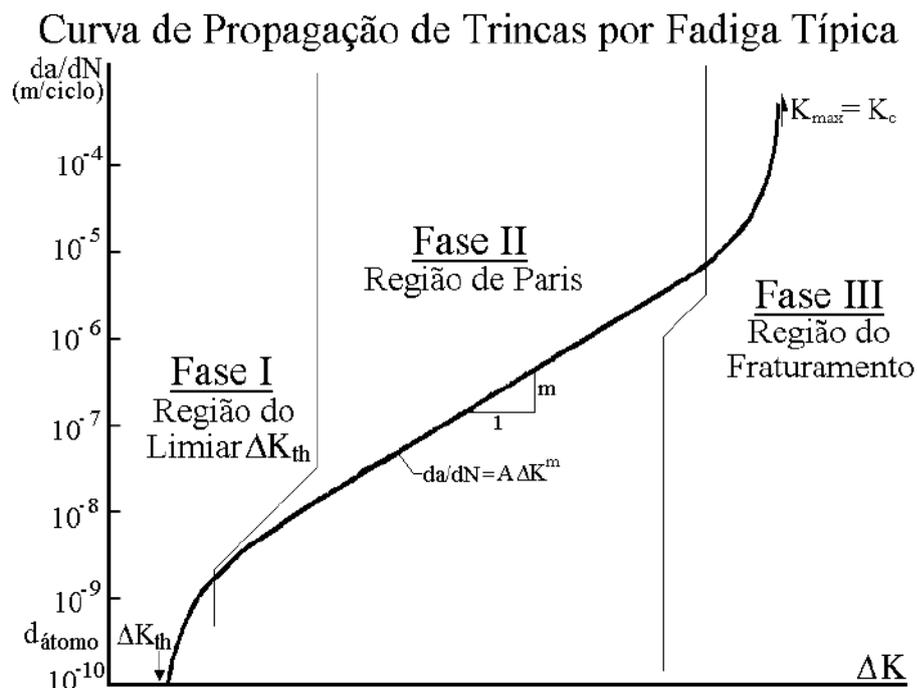


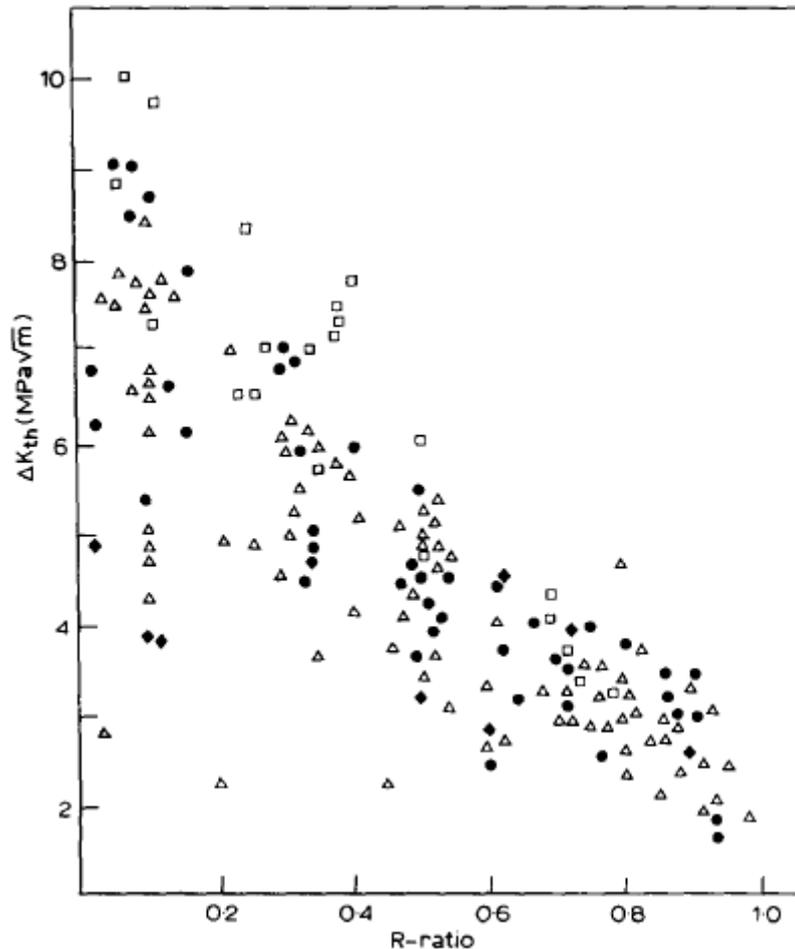
Figura 4 - Curva de Propagação de trincas por fadiga típica [5].

Esta curva é de grande importância na prática, pois com esse tipo de informação pode-se fazer previsões sobre a vida residual das estruturas trincadas. As três fases são apresentadas a seguir:

- Fase I: Tem como principal característica um limiar de propagação, principal assunto no estudo desse projeto em questão, abaixo do qual os carregamentos não causam danos à peça trincada e a trinca tem uma propagação muitíssimo lenta. Este limiar recebe o nome de limiar de propagação de trincas por fadiga, e é caracterizado por um fator de intensidade de tensões limiar ( $\Delta K_{th}$  - *threshold*).  $\Delta K_{th}$  é muito influenciado por heterogeneidades no material (como vazios e inclusões) e pelo fechamento das trincas de fadiga. O fechamento ocorre porque as trincas se propagam cortando um material previamente deformado pelas zonas plásticas que (sempre) as acompanham. As faces das trincas de fadiga ficam embutidas num envelope de deformações residuais trativas, que as comprimem quando completamente descarregadas, e só se abrem paulatinamente ao serem carregadas. A fase I vai do limiar  $\Delta K_{th}$  até taxas de  $10^{-10} \sim 10^{-9}$  m/ciclo, isto é, até taxas da ordem de um espaçamento atômico por ciclo (diâmetro atômico de aproximadamente 0,3 nm). A zona plástica é definida pelo intervalo onde  $ZP_{cíclica} < d_{grão}$  ( $d_{grão}$  é tipicamente de 10 a 100 mm nas ligas estruturais metálicas). O crescimento da trinca é descontínuo, gerado por micro-mecanismos intragranulares sensíveis à carga média, à microestrutura do material, ao meio ambiente e à carga de abertura da trinca. Abaixo do limiar  $\Delta K_{th}$  as trincas são incipientes, de modo que para a trinca atingir o tamanho de 1 mm são necessários cerca de  $10^{10}$  ciclos.
- Fase II: Nesta fase as taxas vão de  $10^{-10} \sim 10^{-9}$  até  $10^{-6} \sim 10^{-4}$  m/ciclo, ou de cerca de um espaçamento atômico até da ordem de um tamanho de grão por ciclo. A zona plástica cíclica é definida pelo intervalo onde  $ZP_{cíclica} > d_{grão}$ . O crescimento da trinca é aproximadamente contínuo ao longo da sua frente, como indicado pelas estrias observadas nas faces das trincas quando observadas num microscópio eletrônico de varredura (as estrias são a característica fratográfica mais importante das trincas de fadiga). A regra de propagação  $da/dN$  é controlada pelas deformações cíclicas que acompanham as pontas das trincas de fadiga, e é pouco sensível à microestrutura, à carga média, ao meio ambiente e à espessura da peça. Nesta fase a gama das deformações cíclicas depende principalmente de  $\Delta K$ , e tanto a carga de abertura da trinca  $K_{ab}$  quanto à tenacidade do material  $K_C$  ou  $KIc_c$  possuem pouca influência nas taxas de propagação.

- Fase III: Esta fase tem como característica principal a propagação instável da trinca (ou fratura da peça). Os mecanismos de fratura podem ser dúcteis (cavitação e coalescência de vazios) ou frágeis (clivagem), e superpõem-se aos de “trincamento” (crescimento estável da trinca). Esta fase depende de  $K_{max}$  e de  $K_C$ , logo é sensível à carga média e aos fatores que afetam a tenacidade do material, como a microestrutura, o meio ambiente e a espessura da peça.  $K_C$  depende não apenas do material, mas também da geometria, a menos que  $ZP_{cíclica}$  seja bem menor que todas as dimensões da peça).

Diversos fatores mecânicos que afetam significativamente as características da extensão da trinca por fadiga em uma grande variedade de materiais de engenharia são alvos de estudos recentes. Entre esses fatores, destacam-se a microestrutura do material e a carga de tensão  $R$ , definida como a razão entre a carga mínima sobre a carga máxima utilizada durante os ciclos do ensaio de fadiga [21-22]. Bulloch realizou estudos [21-22] para analisar o comportamento de  $\Delta K_{th}$  em função de  $R$  (relação entre a tensão máxima e mínima) para diferentes microestruturas, como pode ser visto na Figura 3.



●, Ferrite-Pearlite; □, Pearlite; ◆, Austenite. △, Tempered Structures

Figura 3 - Variação do  $\Delta K_{th}$  com  $R$  para diferentes características dos aços [21].

Conclui-se que, para diferentes microestruturas, o valor de  $\Delta K_{th}$  é maior quando o ensaio de fadiga é realizado com menores valores de  $R$ , ou seja, o limiar de propagação de trincas por fadiga tende a diminuir quando a carga estática aumenta. A diminuição de  $\Delta K_{th}(R)$  à medida que  $R$  cresce não é surpreendente, pois as cargas médias trativas ajudam a separar as faces das trincas e, conseqüentemente, a aumentar as taxas de propagação  $da/dN$ . Já as cargas médias compressivas, por sua vez, ajudam a manter as trincas de fadiga fechadas e, portanto, tendem a retardar sua propagação. [5]

Por isso, deve-se seguir uma norma para o ensaio de propagação de trinca por fadiga. Para este trabalho de conclusão de curso, a norma a ser utilizada é a ASTM E 647-15 [6], onde a razão  $R$  é igual a 0,1.

O formato da curva obtida através do ensaio  $da/dN$  realizado por Bulloch em [22], como previsto, também sofre alterações bem perceptíveis para diferentes valores de  $R$  e condições microestruturais, como se observa nas Figuras 4 – 7.

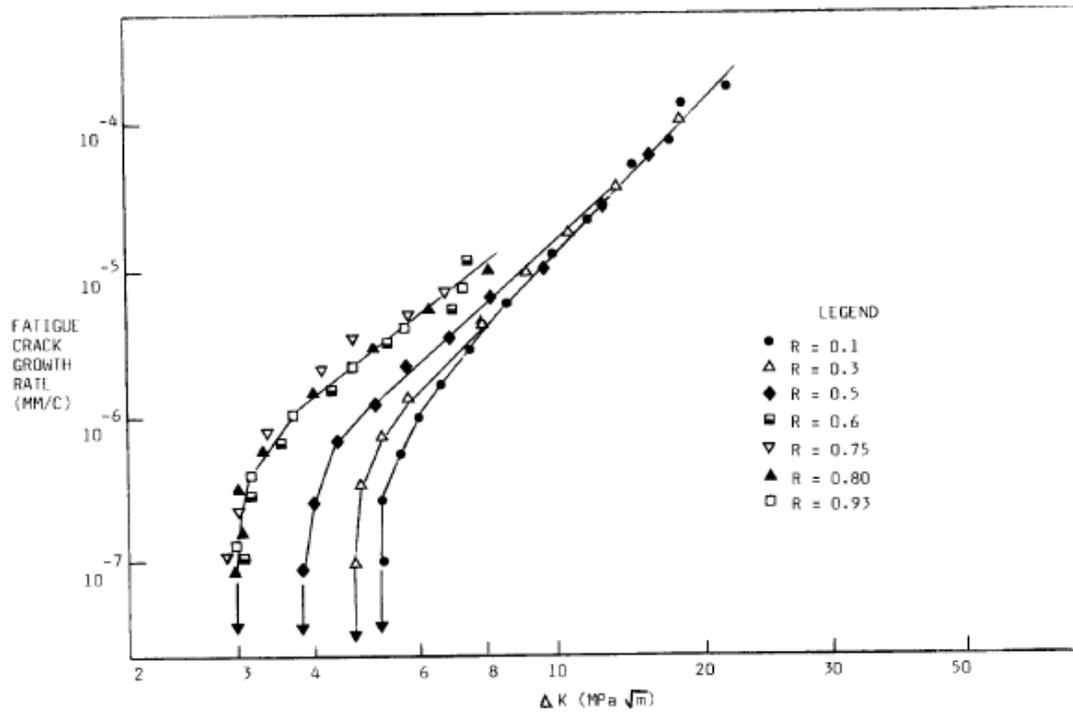


Figura 4 - Efeito do R no ferro puro [22].

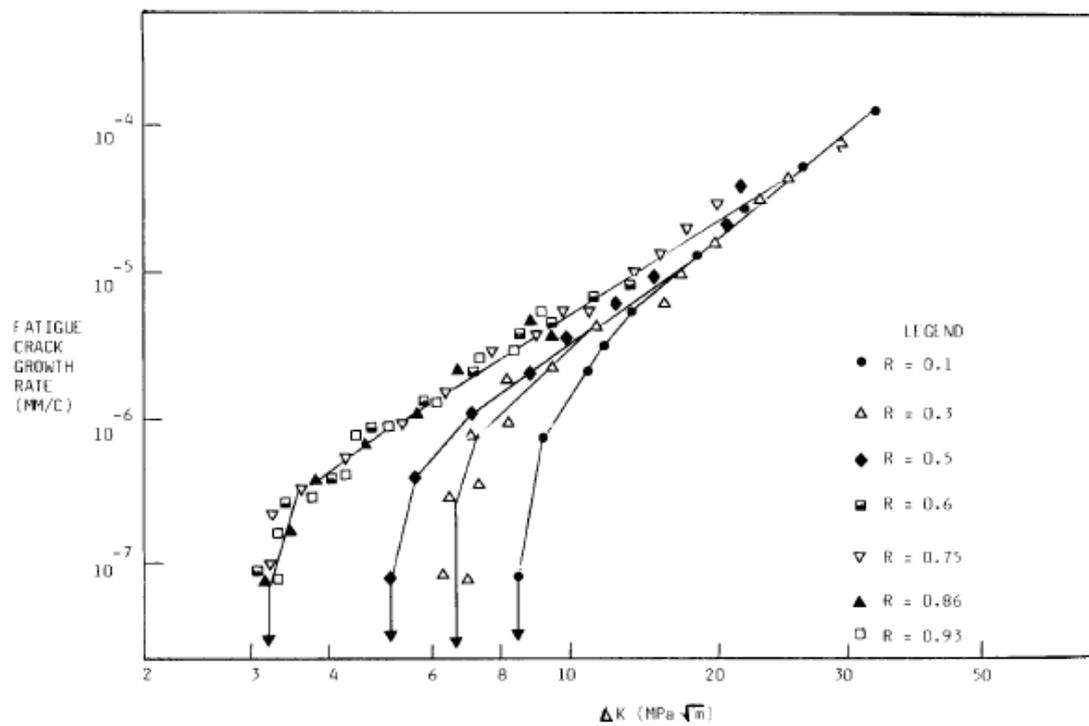


Figura 5 - Efeito do R na microestrutura ferrita-perlita [22].

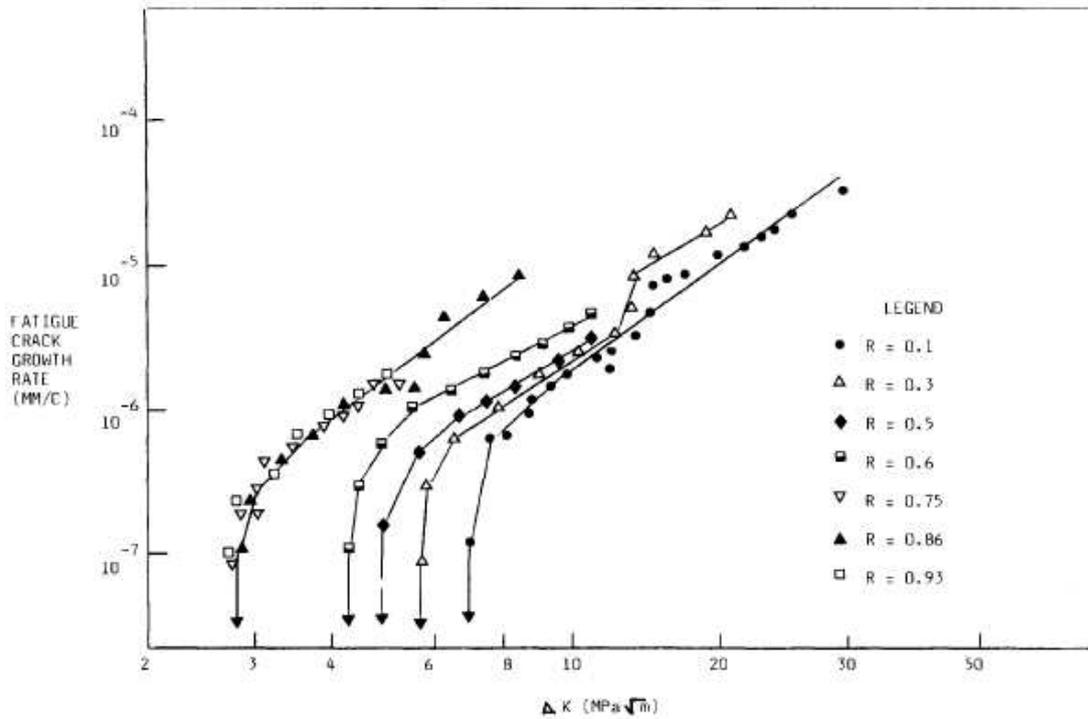


Figura 6 - Efeito do R na microestrutura ferrita-martensita [22].

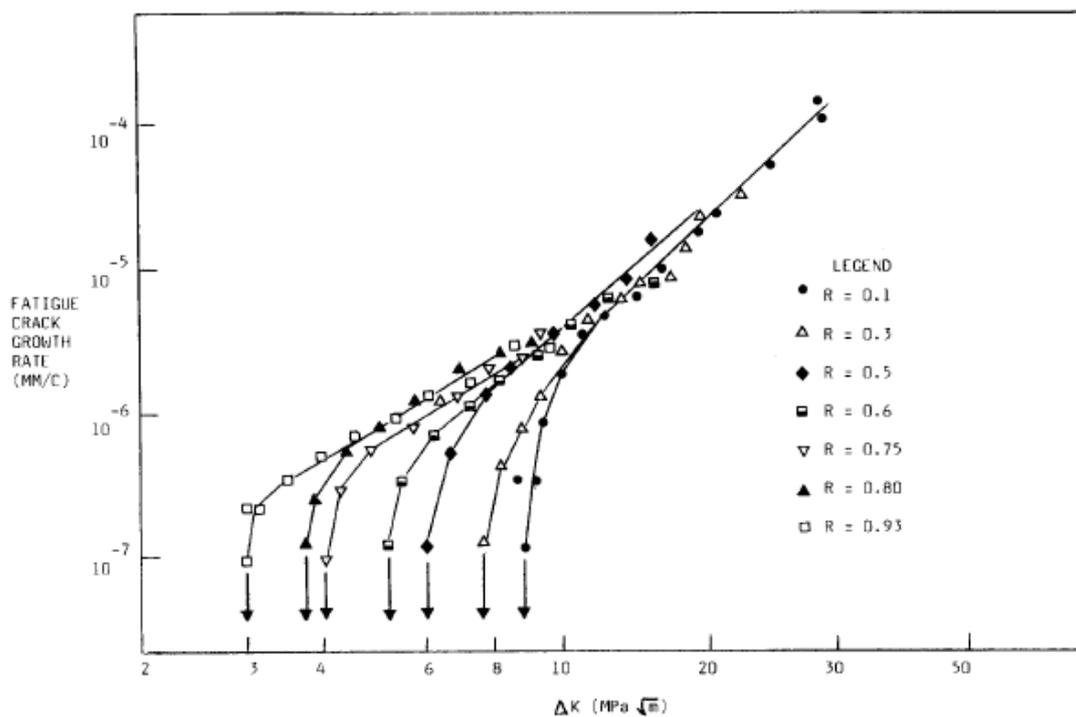


Figura 7 - Efeito do R na microestrutura austenítica [22].

O limiar de propagação da trinca  $\Delta K_{th}$  é influenciado tanto pela carga média (quantificada por  $R$ ), quanto pela microestrutura do material, que altera as propriedades mecânicas do material, como por exemplo, o valor da resistência a ruptura  $S_R$ .

A influência de algumas características microestruturais na fase I das curvas de propagação de trincas por fadiga pode ser de fácil explicação. Por exemplo, heterogeneidades no caminho do defeito como vazios ou inclusões podem ancorar ou cegar a ponta da trinca de fadiga nas taxas de propagação muito baixas, dificultando assim o seu progresso e, conseqüentemente, aumentando  $\Delta K_{th}$ . Por outro lado, estas heterogeneidades podem funcionar como concentradores de tensão nas cargas mais altas, aumentando a taxa de propagação (em relação à do material mais “limpo”, com menos inclusões). [5, 22]

### **2.3.2. Tipos de Ensaio de Fadiga**

Os aparelhos de ensaio de fadiga são constituídos por um sistema de aplicação de cargas, que permite alterar a intensidade e o sentido do esforço, e por um contador de número de ciclos. O teste é interrompido assim que o corpo de prova se rompe.

O ensaio é realizado de diversas maneiras, de acordo com o tipo de solicitação que se deseja aplicar:

- Torção;
- Tração-compressão;
- Flexão;
- Flexão rotativa;

### **2.4. Ensaios não destrutivos**

Como o próprio nome já diz, Ensaios Não Destrutivos (END) são técnicas utilizadas na inspeção de materiais e equipamentos sem destruir ou danificá-los, sendo executadas nas etapas de fabricação, construção, montagem e manutenção.

Os END estão entre as principais ferramentas do controle da qualidade e monitoramento de materiais e componentes e são amplamente utilizados nos mais variados setores industriais. Também contribuem para o monitoramento da qualidade dos bens e serviços, redução de custos, preservação da vida e do meio ambiente, sendo fator de competitividade para as empresas que os utilizam. Comumente são usados para guiar estudos que tem como objetivo principal a elevação dos índices de confiabilidade dos equipamentos industriais. Além de incluir métodos capazes de proporcionar informações a respeito do teor de defeitos de um determinado produto, das características tecnológicas de um material, ou ainda, da monitoração da degradação em serviço de componentes, equipamentos e estruturas. [9 - 10]

- Emissão Acústica
- Radiografia, Radioscopia e Gamagrafia
- Ensaio Visual

- Estanqueidade
- Líquido Penetrante
- Partículas Magnéticas
- Ultrassom
- Corrente de Foucault (ou corrente parasita)
- Ultrassom
- Termografia

Dentre as técnicas citadas acima, será especificado o ensaio não destrutivo por líquido penetrante, pois o mesmo será utilizado no trabalho de conclusão de curso em questão.

#### **2.4.1. Ensaio Por Líquidos Penetrantes**

O ensaio por líquidos penetrantes (LP) é um método desenvolvido para a detecção de descontinuidades essencialmente superficiais, abertas na superfície do material. O método começou a ser utilizado antes da primeira guerra mundial, principalmente pela indústria ferroviária na inspeção de eixos. Nessa época, o método consistia em aplicar querosene ou óleo sobre a superfície da peça e removê-lo após várias horas. Em seguida, era aplicada uma mistura de solvente com pó de giz sobre a superfície, que ao secar absorvia de dentro das trincas o querosene ou óleo aplicado anteriormente. Evidentemente, este processo permitia apenas a observação de grandes defeitos abertos sobre a superfície da peça.

O método de ensaio por LP, como conhecemos hoje, tomou impulso em 1942, nos EUA, quando foi desenvolvido o método de penetrantes fluorescentes, destinado a inspeção de componentes para a área aeronáutica. O método vem-se desenvolvendo através da pesquisa e do aprimoramento de novos produtos utilizados no ensaio, até seu estágio atual.

Este consiste em fazer penetrar na abertura da descontinuidade um líquido; após a remoção do excesso de líquido da superfície, faz-se o líquido retido sair da descontinuidade por meio de um revelador. A imagem da descontinuidade fica então delineada sobre a superfície. [8,12-18]

Existem seis etapas essenciais no emprego deste método de ensaio:

- (1) Preparação e limpeza da superfície;
- (2) Aplicação do líquido penetrante;
- (3) Remoção do excesso de penetrante;
- (4) Aplicação do Revelador;
- (5) Inspeção;
- (6) Limpeza;

A “**NBR 16450 de 02/2016 – Ensaios não destrutivos — Líquido penetrante — Qualificação de procedimento**” estabelece os requisitos mínimos de uma sistemática de qualificação do procedimento de ensaio não destrutivo por líquido penetrante. [9]

### **Vantagens e Limitações do Ensaio: [17]**

#### Vantagens:

- Simplicidade do método;
- Utilizando a fotografia do defeito, é mais fácil avaliar os resultados;
- Não há limitação de tamanho e forma das peças a ensaiar;
- O método é capaz de detectar descontinuidades (trincas) extremamente finas, da ordem de 0,001mm de abertura.

#### Limitações:

- Só detecta descontinuidades abertas para a superfície;
- A superfície do material não pode ser porosa ou absorvente, pois ocorre o mascaramento de resultados;
- Temperatura da superfície recomendada para realização dos testes: de 10 a 50° C;
- Em alguns casos é necessária uma limpeza mais rigorosa (caso de soldagem posterior ou equipamento que será utilizado na indústria alimentícia).

## **3. Metodologia Experimental**

### **3.1. Materiais e Corpos de Prova**

No presente trabalho, foram usinados dois corpos de prova do tipo C(T), dos aços SAE 4140 e SAE 4340, para serem submetidos a ensaio de propagação de trinca por fadiga para obtenção das curvas *da/dN versus ΔK*. Em seguida, o valor do  $\Delta K_{th}$  desses aços foram comparados com o DIN 34CrNiMo6, material original do eixo do virabrequim.

O aço SAE 4140, também conhecido como aço-cromo-molibdênio, é classificado como aço médio carbono ligado para tratamentos térmicos de tempera e revenimento. Este assume teores de carbono entre 0,3% e 0,5% em massa, explicando a classificação de ser considerado um aço de médio carbono. O aço SAE 4140 é empregado em peças que exigem elevada dureza, resistência e tenacidade, sendo de uso recorrente na fabricação de automóveis, aviões, virabrequins, bielas, eixos, engrenagens, armas, parafusos, equipamentos para a indústria do petróleo, dentre outros. (Rocha, 2004) [25].

Já o aço SAE 4340, é um aço com elevada temperabilidade, conhecido como aço cromo-níquel-molibdênio, também classificado como aço de médio carbono, utilizado na fabricação de diferentes componentes mecânicos, inclusive com seções espessas, quando se deseja uma combinação de resistência mecânica média e resistência à fratura e também possui elevada resistência à fadiga. Suas principais aplicações são em componentes para sistemas mecânicos, principalmente estruturais, onde se necessita uma homogeneidade de dureza ao longo da seção transversal em pequenas ou grandes seções. Entre elas, destacam-se: eixos, engrenagens, engrenagens planetárias, colunas, mangas e cilindros. [26]

O aço DIN 34CrNiMo6, é classificado como aço baixa liga e alta resistência com elevada tenacidade à fratura. Também possui boa temperabilidade, de forma que este tenha alta dureza não só na parte mais externa de sua estrutura, mas também em profundidades mais interiores. Geralmente muito utilizado em componentes mecânicos, como eixos e virabrequins.

As composições químicas dos aços citados acima, são apresentadas na Tabela 1 a seguir: [27 – 30]

|                                   | Elemento Químico | SAE 4140    | SAE 4340    | DIN 34CrNiMo6 |
|-----------------------------------|------------------|-------------|-------------|---------------|
| Composição Química<br>(% em peso) | Carbono (C)      | 0,38 - 0,43 | 0,38 - 0,43 | 0,30 – 0,38   |
|                                   | Cromo (Cr)       | 0,80 - 1,1  | 0,70 - 0,90 | 1,40 – 1,70   |
|                                   | Níquel (Ni)      | -           | 1,65 - 2,00 | 1,40 – 1,70   |
|                                   | Molibdênio (Mo)  | 0,15 - 0,25 | 0,2 - 0,3   | 0,15 – 0,30   |
|                                   | Manganês (Mn)    | 0,75 - 1,00 | 0,60 - 0,80 | 0,50 – 0,80   |
|                                   | Silício (Si)     | 0,20 - 0,35 | 0,20 - 0,35 | ≤ 0,04        |
|                                   | Enxofre (S)      | ≤ 0,04      | ≤ 0,04      | ≤ 0,035       |
|                                   | Fósforo (P)      | ≤ 0,04      | ≤ 0,04      | ≤ 0,035       |

Tabela 1 – Composição química dos aços.

- Elementos de Liga nos aços: [28,29]

**C:** aumenta a temperabilidade, forma carbonetos duros e dificultam a soldagem. Quanto mais carbono, maior dureza e resistência mecânica, menor ductilidade e maior facilidade de ocorrer trincas;

**Cr:** aumenta a temperabilidade e as resistências à corrosão, à temperatura e ao desgaste

**Ni:** aumenta a temperabilidade e a tenacidade, estabiliza a austenita;

**Mn:** aumenta a temperabilidade e a tenacidade, estabiliza a austenita, controla o efeito deletério do S (Enxofre);

**Mo:** aumenta a temperabilidade e a tenacidade e à resistência à temperatura, refina o grão;

**Si:** aumenta a temperabilidade, tenacidade, a resistência à corrosão e a permeabilidade magnética, desoxidante;

**P:** endurece a ferrita, mas em geral é impureza (com teor limitado a 0,04%);

**S:** aumenta a usinabilidade, mas em geral é impureza (com teor limitado a 0,05%), fragiliza a quente, reduz a soldabilidade, a tenacidade e a ductilidade.

Corpos de prova do tipo C(T) para ensaios de propagação de trincas foram usinados de acordo com a norma ASTM E 647 – 15 [18]. Sua geometria pode ser vista nas Figuras 8 – 10, enquanto que a Tabela 2 apresenta suas dimensões.

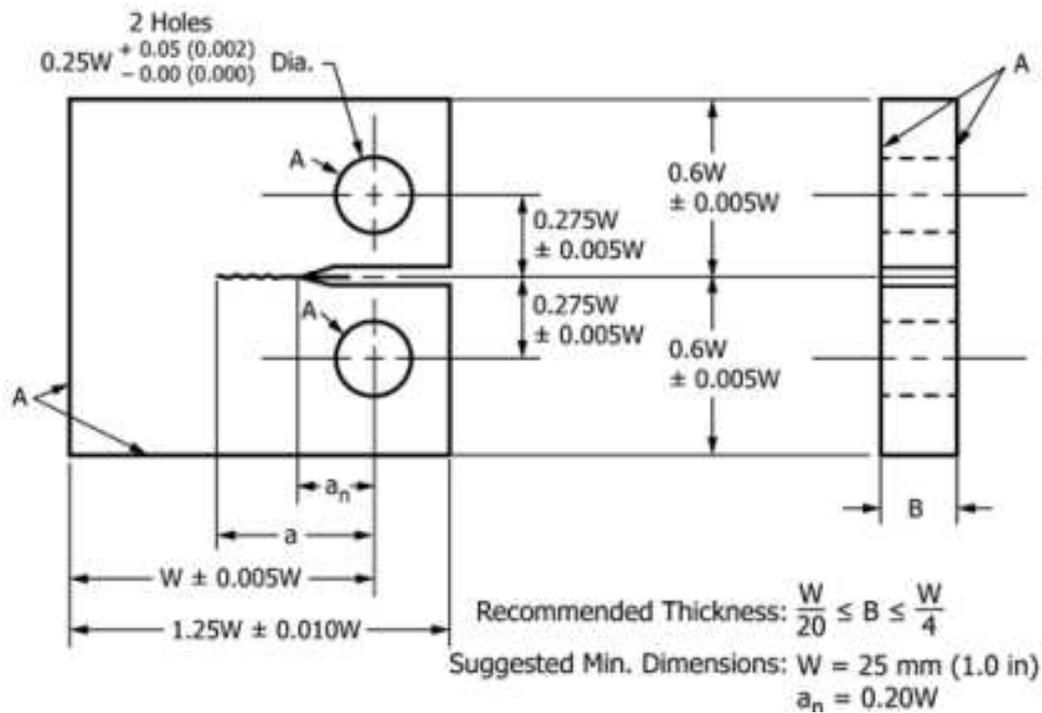


Figura 8 - Geometria do CP tipo C(T) [18].

| Material | W<br>[mm] | B<br>[mm] | $a_0$<br>[mm] | $b_0$<br>[mm] | $B W^{1/2}$<br>[mm <sup>3/2</sup> ] | $B W^{1/2}$<br>[m <sup>3/2</sup> ] |
|----------|-----------|-----------|---------------|---------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| SAE 4140 | 40,00     | 10,00     | 8,00          | 32,00         | 63,246                              | 0,0020                             |
| SAE 4340 | 40,00     | 10,00     | 8,00          | 32,00         | 63,246                              | 0,0020                             |

Tabela 2 - Dimensão dos corpos de prova.



Figura 9 – Corpo de Prova C(T) – Aço SAE 4140.



Figura 10 – Corpo de Prova C(T) – Aço SAE 4340.

A equação utilizada para obter o valor de  $\Delta K$  apresentada pela norma ASTM E 647-15 é apresentada na Equação 5.

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{(2+\alpha)}{(1-\alpha)^{3/2}} (0,866 + 4,64\alpha - 13,32\alpha^2 + 14,72\alpha^3 - 5,6\alpha^4) \quad (\text{Eq. 5})$$

Nesta equação,  $\Delta P$  é a diferença das cargas aplicadas a cada ciclo,  $B$  é a espessura do corpo de prova,  $W$  é a largura do corpo de prova e  $\alpha$  é a razão entre o tamanho da trinca e a largura do CP.

$$\Delta P = P_{m\acute{a}x} - P_{m\acute{i}n} \quad (\text{Eq. 6})$$

$$\alpha = \frac{a}{W} \quad (\text{Eq. 7})$$

### 3.2. Procedimento Experimental

#### 3.2.1. Ensaio de Fadiga

O ensaio de propagação de trinca por fadiga foi realizado com intuito de obter as curvas  $da/dN$  versus  $\Delta K$  e avaliar o crescimento das trincas quando aplicadas tensões alternadas na forma senoidal (Figura 11) com razão de carga ( $R$ ) fixada em 0,1.

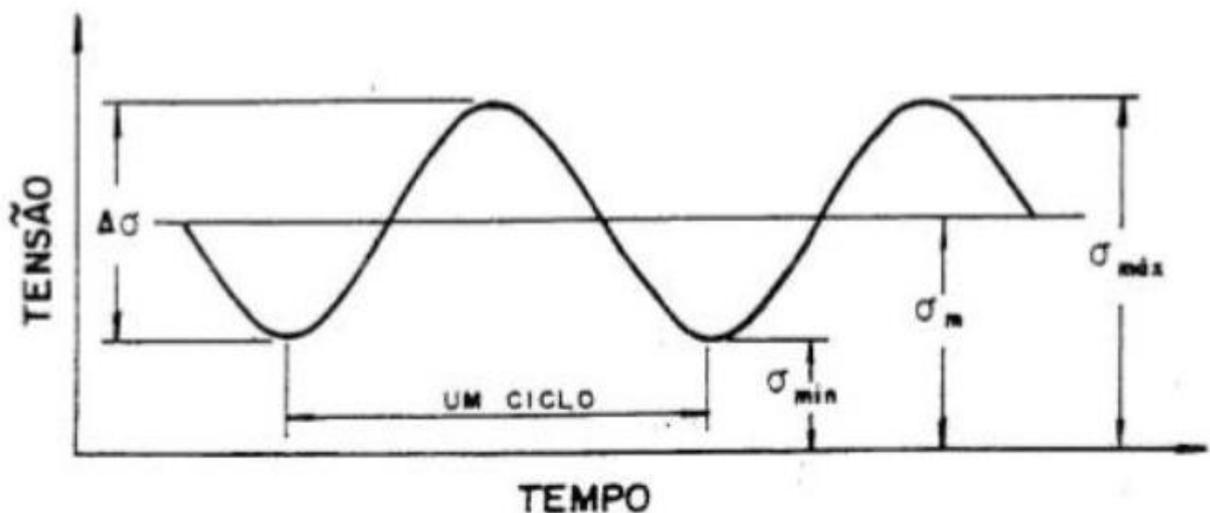


Figura 11 – Representação esquemática do ciclo de carregamento [4].

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaio Mecânicos (LEM) da PUC-Rio, na temperatura ambiente (25 ° C) utilizando a máquina INSTRON 8874, com carga máxima de 25 kN (Figuras 12 – 13). A frequência do ensaio foi fixada em 5 Hz e reduzida para 1 Hz para realizações das medidas do tamanho da trinca com auxílio do micrômetro e do microscópio (Figura 14). A cada medida realizada, as cargas mínimas e máximas eram reduzidas 5% a cada 6500 ciclos, em média, conforme especificado na norma ASTM E 647-15.



Figura 12 - Máquina INSTRON utilizada nos ensaios de fadiga.



Figura 13 – Painel eletrônico da Máquina INSTRON utilizada para fornecer as cargas determinadas pelo instrumentador e o número de ciclos do ensaio de propagação de trinca por fadiga.



Figura 14 - Máquina INSTRON com o corpo de prova fixado.

Para o acompanhamento do crescimento da trinca, foi utilizado um microscópio ótico e um micrometro de 0,02 mm de incerteza (Figura 14). As medidas foram realizadas a cada 6500 ciclos de carga, em média, variando a quantidade de ciclos quando necessário, para uma melhor análise do crescimento da trinca, e então utilizadas para preencher a tabela de cálculos para posteriormente plotar a curva  $da/dN$  de cada CP ensaiado.

### 3.2.2. Líquidos Penetrantes

Após a realização do ensaio de propagação de trinca por fadiga, o END por LP foi utilizado para uma melhor visualização da trinca nos corpos de prova ensaiados.

O ensaio por LP foi realizado no LEM, na temperatura ambiente (25 °C) e seguindo as instruções especificadas pela norma NBR 16450 – 2016.



Figura 15 – Kit para END por líquido penetrante.

Primeiramente, foi necessário limpar a superfície dos corpos de prova utilizando água e o limpador da Spotcheck (Figura 15). Após limpar e secar totalmente as peças, foi aplicado o líquido penetrante por 15 minutos para que o líquido penetrasse totalmente na peça trincada por fadiga, como apresentado nas Figuras 16 e 17.



Figura 16 – Corpo de prova do aço SAE 4340 após aplicação de LP.



Figura 17 – Corpo de prova do aço SAE 4140 após aplicação de LP.

Após 15 minutos, os corpos de prova foram submetidos a lavagem em água e remoção do excesso do líquido penetrante. Depois de secos, os corpos de prova foram submetidos a aplicação do spray revelador por 10 minutos, com o objetivo de tornar a trinca mais visível na superfície (Figuras 19 e 20).



Figura 18 – Corpos de prova do aço SAE 4340 após aplicação do spray revelador.



Figura 19 – Corpos de prova do aço SAE 4140 após aplicação do spray revelador.

Após a aplicação do revelador, as trincas de fadiga ficaram mais visíveis a olho nu. Os corpos de prova foram cortados em amostras no Laboratório de Metalografia e Tratamentos Térmicos (LMTT) da PUC-Rio, deixando apenas a região das trincas (região de interesse) para análise microestrutural por microscopia ótica (Figuras 21 e 22).

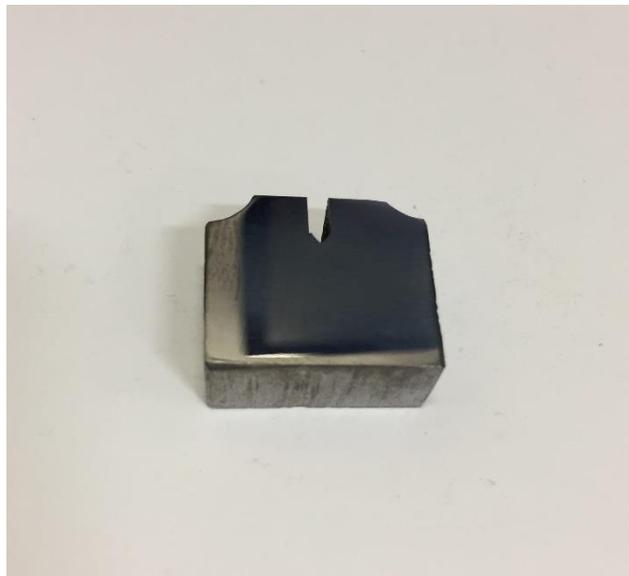


Figura 20 – Amostra do corpo de prova do aço 4140.



Figura 21 – Amostra do corpo de prova do aço 4340.

### **3.2.3. Análise Microestrutural do material**

Após a análise da região de interesse dos corpos de prova foi realizada por microscopia ótica no LMTT, com o objetivo de correlacionar a propagação de trincas de fadiga com aspectos microestruturais dos materiais.

Primeiramente, através do microscópio ZEISS SteREO Discovery V8 (Figuras 22 – 23), foram feitas imagens para uma melhor observação das trincas de fadiga e sua medição mais precisa, como pode ser visto nas Figuras 25 – 28.

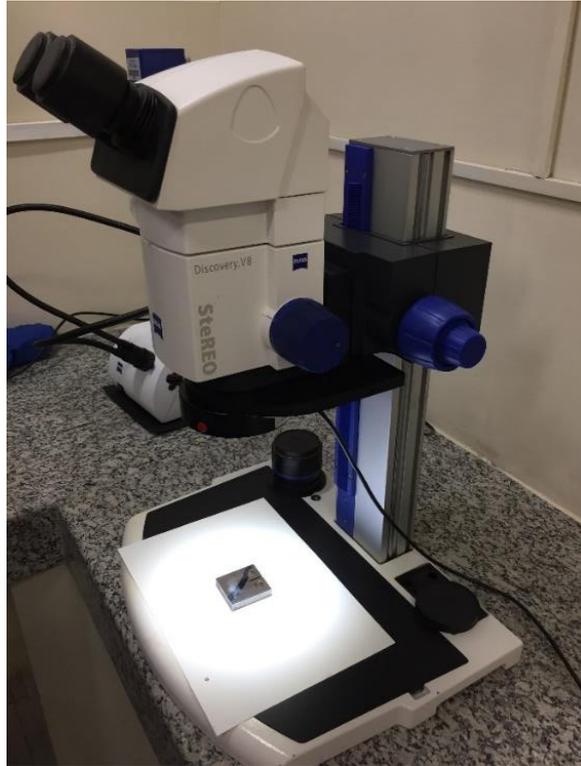


Figura 22 – Microscópio Ótico Zeiss Discovery V8.



Figura 23 – Microscópio Ótico Zeiss Discovery V8.

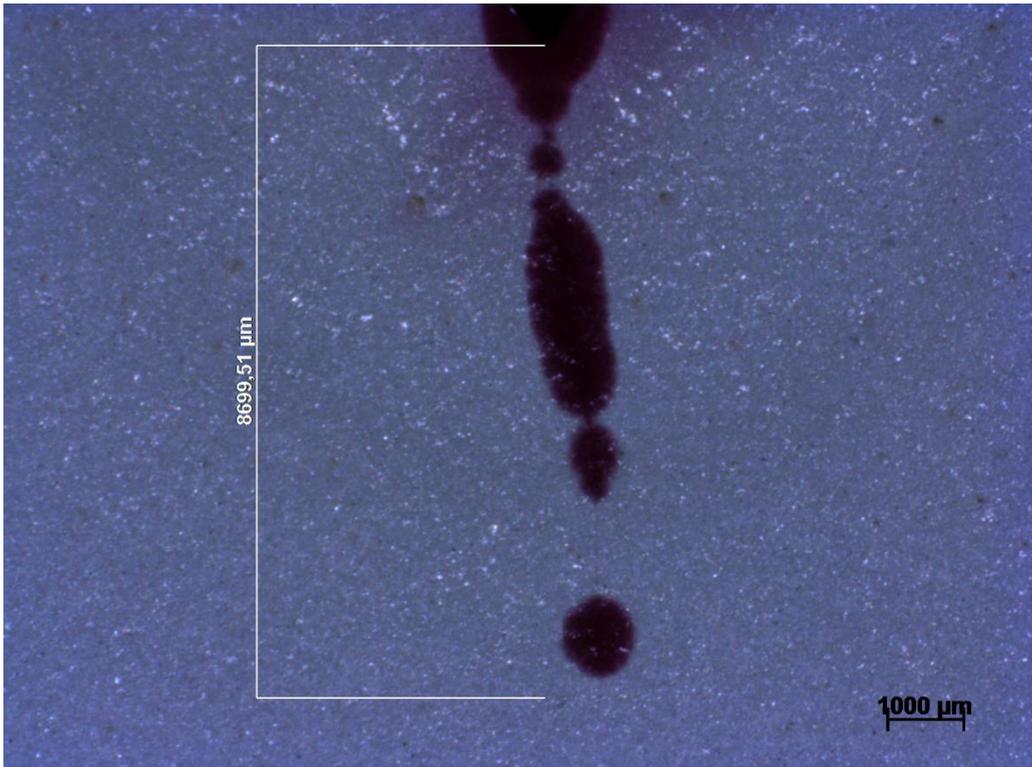


Figura 24 – Trinca de fadiga medida microscopicamente sob efeito do LP na amostra do aço SAE 4140.



Figura 25 – Trinca de fadiga medida microscopicamente na amostra do aço SAE 4140.

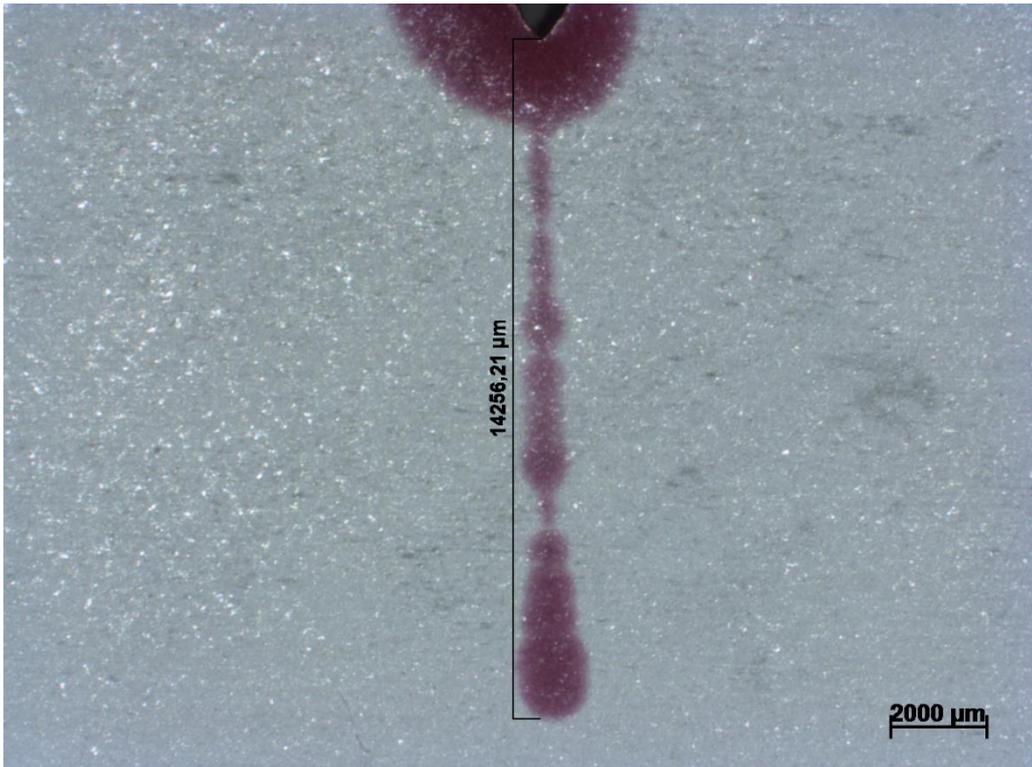


Figura 26 – Trinca por fadiga medida microscopicamente sob efeito do LP na amostra do aço SAE 4340.

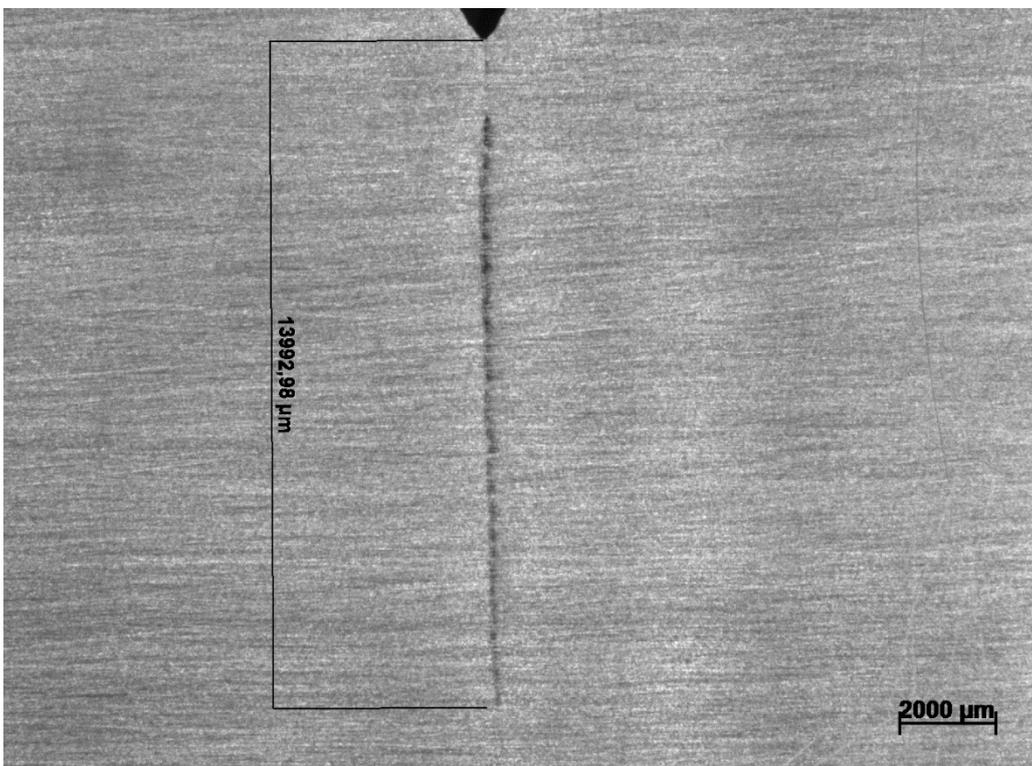


Figura 27 – Trinca por fadiga medida microscopicamente na amostra do aço SAE 4340.

Após a medição das trincas por fadiga por microscopia ótica, foi dado início a preparação das amostras para análise e correlação do limiar de

propagação  $\Delta K_{th}$  com as características microestruturais e heterogeneidades metalúrgicas dos aços SAE 4140 e 4340.

Para isso, também no LMTT, foi necessário submeter as amostras aos seguintes procedimentos:

I- Três fases de lixamento das superfícies dos aços utilizando as lixas Norton T223 Advance 400, 600 e 1200 na máquina Arotec Aropol 2V (Figuras 29 – 31).



Figura 28 – Primeira lixa utilizada para lixamento da superfície das amostras.



Figura 29 – Máquina Arotec Aropol 2V.



Figura 30 – Amostra do aço SAE 4140 durante o processo de lixamento.

II- Após o lixamento, as amostras foram submetidas a três fases de polimento com diferentes pastas de diamante com tamanhos de grão de  $6\mu\text{m}$ ,  $3\mu\text{m}$  e  $1\mu\text{m}$ , utilizando as máquinas Struers DPU-10 e duas Arotec Aropol VV, respectivamente (Figuras 32 – 34).



Figura 31 – Máquina Struers DPU-10 para polimento com pasta de  $6\mu\text{m}$ .

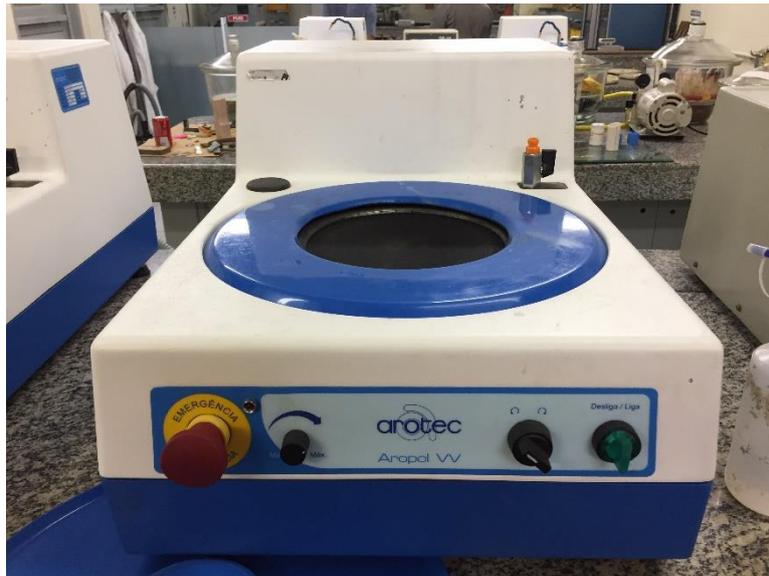


Figura 32 – Máquina Arotec Aropol VV para polimento com pasta de 3 $\mu$ m.

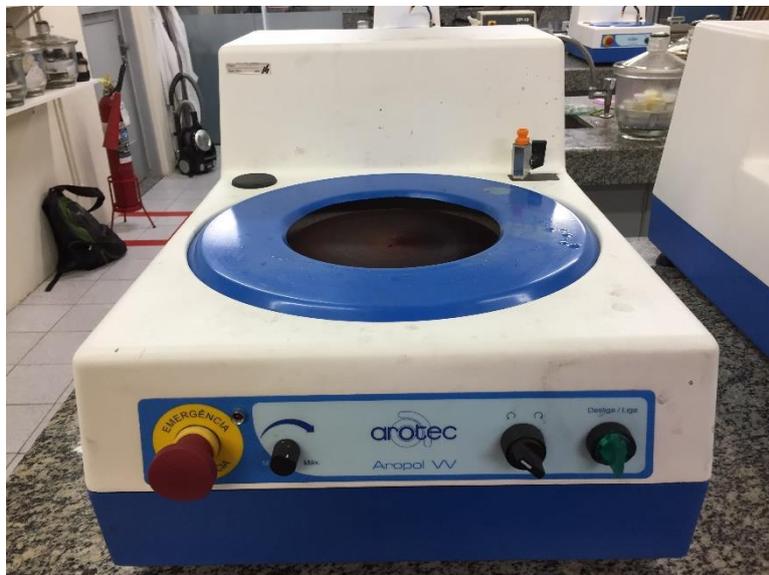


Figura 33 – Máquina Arotec Aropol VV para polimento com pasta de 1 $\mu$ m.

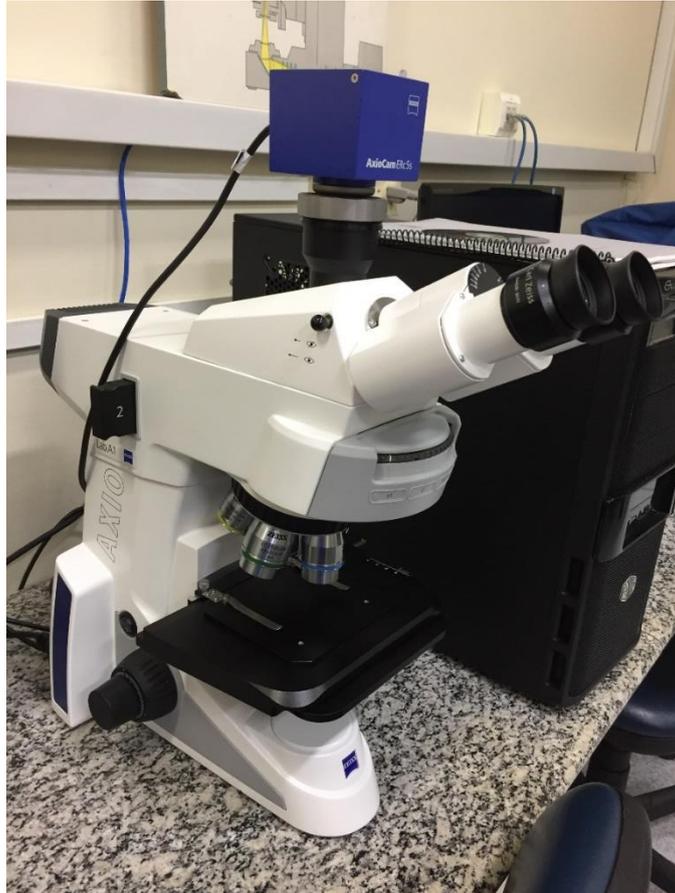
Os processos de lixamento e polimento geram tensões residuais de compressão nas superfícies das amostras, podendo ocasionar em fechamento das trincas de fadiga. Portanto, antes de dar continuidade na preparação das amostras, foi necessário observar as superfícies, visando garantir a presença das trincas nos aços ensaiados e felizmente, as trincas não foram fechadas e foi possível prosseguir com a preparação das superfícies.

III- Após a etapa de polimento, as amostras foram submetidas a um banho de ultrassom em acetona e atacadas com reagente Nital 2% durante 15 minutos (Figura 36). Este procedimento final visou limpar a trinca e preparar as amostras para a análise microestrutural.



Figura 34 – Amostras em banho de ultrassom na máquina GUIMIS.

Por fim, após o banho em ultrassom e o ataque por Nital 2%, as amostras foram submetidas a análise microestrutural, desta vez, utilizando o Microscópio Ótico Carl Zeiss AXIO Lab.A1 (Figuras 37 e 38), pois este possui uma maior resolução e uma melhor qualidade de imagem.



**Figura 35 – Microscópio Ótico Carl Zeiss AXIO Lab.A1.**



**Figura 36 – Microscópio Ótico Carl Zeiss AXIO Lab.A1.**

#### 4. Resultados e Discussões

Neste projeto foram ensaiados corpos de prova do tipo C(T) dos aços SAE 4140 e SAE 4340 para a determinação da curva de propagação de trincas por fadiga. Uma grande quantidade de pontos experimentais foram obtidos nos ensaios desses materiais, a fim de determinar com maior eficácia a região do threshold. Por fim, as curvas destes aços foram comparadas com a curva do material original do virabrequim citado na motivação do trabalho.

Ao iniciar os ensaios de propagação de trincas por fadiga, após a preparação da máquina foi possível obter todos os parâmetros e valores necessários e com o auxílio do software Microsoft Excel, efetuar os cálculos para posteriormente traçar as curvas  $da/dN$  versus  $\Delta K$  para os CP's de aço 4140 e 4340.

As Tabelas 3 – 4 apresentam os dados dos ensaios de propagação de trinca:

| $P_{\text{máx}}$<br>(N) | $P_{\text{mín}}$<br>(N) | $N_i$ | $N_f$ | $a_0$<br>(mm) | $a_f$<br>(mm) | $\alpha$<br>( $a/W$ ) | $\Delta K$ (MPa $\sqrt{\text{m}}$ ) | delta N | delta $a$ | $da / dN$   |
|-------------------------|-------------------------|-------|-------|---------------|---------------|-----------------------|-------------------------------------|---------|-----------|-------------|
| 13300                   | 1480                    | 0     | 5000  | 1,50          | 2             | 0,2375                | 28,12345209                         | 5000    | 0,50      | 0,0001      |
| 12610                   | 1260                    | 5600  | 10700 | 2,00          | 2,45          | 0,25                  | 27,94740838                         | 5100    | 0,45      | 8,82353E-05 |
| 11930                   | 1190                    | 11200 | 16200 | 2,45          | 2,85          | 0,26125               | 27,26057593                         | 5000    | 0,40      | 0,00008     |
| 11100                   | 1138                    | 16400 | 21500 | 2,85          | 3,25          | 0,27125               | 25,96858181                         | 5100    | 0,40      | 7,84314E-05 |
| 10420                   | 1060                    | 22000 | 29500 | 3,25          | 3,6           | 0,28125               | 25,05126795                         | 7500    | 0,35      | 4,66667E-05 |
| 10070                   | 1010                    | 29950 | 37000 | 3,60          | 3,9           | 0,29                  | 24,80966772                         | 7050    | 0,30      | 4,25532E-05 |
| 9527                    | 961                     | 37500 | 45000 | 3,90          | 4,2           | 0,2975                | 23,91880309                         | 7500    | 0,30      | 0,00004     |
| 9083                    | 910                     | 45300 | 52800 | 4,20          | 4,55          | 0,305                 | 23,26876575                         | 7500    | 0,35      | 4,66667E-05 |
| 8500                    | 840                     | 52900 | 60400 | 4,55          | 4,85          | 0,31375               | 22,30582711                         | 7500    | 0,30      | 0,00004     |
| 8090                    | 810                     | 60800 | 68300 | 4,85          | 5,2           | 0,32125               | 21,61201528                         | 7500    | 0,35      | 4,66667E-05 |
| 7660                    | 760                     | 0     | 7490  | 5,20          | 5,55          | 0,33                  | 20,94912397                         | 7490    | 0,35      | 4,6729E-05  |
| 7300                    | 726                     | 7600  | 15000 | 5,55          | 5,85          | 0,33875               | 20,41230359                         | 7400    | 0,30      | 4,05405E-05 |
| 7000                    | 700                     | 15500 | 22900 | 5,85          | 6,1           | 0,34625               | 19,94155747                         | 7400    | 0,25      | 3,37838E-05 |
| 6600                    | 667                     | 23000 | 30500 | 6,10          | 6,35          | 0,3525                | 19,08375723                         | 7500    | 0,25      | 3,33333E-05 |
| 6313                    | 640                     | 30980 | 38500 | 6,35          | 6,55          | 0,35875               | 18,54319343                         | 7520    | 0,20      | 2,65957E-05 |
| 5997                    | 598                     | 39000 | 46250 | 6,55          | 6,7           | 0,36375               | 17,87646496                         | 7250    | 0,15      | 2,06897E-05 |
| 5697                    | 570                     | 46740 | 54000 | 6,70          | 6,85          | 0,3675                | 17,14102233                         | 7260    | 0,15      | 2,06612E-05 |
| 5413                    | 550                     | 54700 | 62000 | 6,85          | 7,05          | 0,37125               | 16,41686762                         | 7300    | 0,20      | 2,73973E-05 |
| 5112                    | 517                     | 62500 | 70000 | 7,05          | 7,25          | 0,37625               | 15,71453712                         | 7500    | 0,20      | 2,66667E-05 |
| 4866                    | 491                     | 70360 | 77450 | 7,25          | 7,45          | 0,38125               | 15,15797453                         | 7090    | 0,20      | 2,82087E-05 |
| 4625                    | 471                     | 78000 | 85000 | 7,45          | 7,6           | 0,38625               | 14,58128088                         | 7000    | 0,15      | 2,14286E-05 |
| 4390                    | 431                     | 0     | 8500  | 7,60          | 7,85          | 0,39                  | 14,03388622                         | 8500    | 0,25      | 2,94118E-05 |
| 4130                    | 420                     | 9000  | 16500 | 7,85          | 8             | 0,39625               | 13,36904747                         | 7500    | 0,15      | 0,00002     |
| 3900                    | 383                     | 16500 | 24000 | 8,00          | 8,1           | 0,4                   | 12,79964667                         | 7500    | 0,10      | 1,33333E-05 |
| 3705                    | 365                     | 24500 | 32000 | 8,10          | 8,2           | 0,4025                | 12,23619511                         | 7500    | 0,10      | 1,33333E-05 |
| 3520                    | 350                     | 32230 | 38900 | 8,20          | 8,25          | 0,405                 | 11,69069735                         | 6670    | 0,05      | 7,49625E-06 |

| $P_{\text{máx}}$<br>(N) | $P_{\text{min}}$<br>(N) | $N_i$  | $N_f$  | $a_0$<br>(mm) | $a_f$<br>(mm) | $\alpha$<br>( $a/W$ ) | $\Delta K$ (MPa $\sqrt{\text{m}}$ ) | delta N | delta $a$ | da / dN  |
|-------------------------|-------------------------|--------|--------|---------------|---------------|-----------------------|-------------------------------------|---------|-----------|----------|
| 3343                    | 335                     | 39600  | 47100  | 8,25          | 8,25          | 0,40625               | 11,13018221                         | 7500    | 0,00      | 0        |
| 3343                    | 335                     | 48000  | 98000  | 8,25          | 8,3           | 0,40625               | 11,13018221                         | 50000   | 0,05      | 1E-06    |
| 3300                    | 330                     | 98500  | 199000 | 8,30          | 8,3           | 0,4075                | 11,02620347                         | 100500  | 0,00      | 0        |
| 3560                    | 340                     | 0      | 20000  | 8,30          | 8,3           | 0,4075                | 11,95433507                         | 20000   | 0,00      | 0        |
| 3560                    | 340                     | 20000  | 30000  | 8,30          | 8,3           | 0,4075                | 11,95433507                         | 10000   | 0,00      | 0        |
| 3560                    | 340                     | 30000  | 40000  | 8,30          | 8,35          | 0,4075                | 11,95433507                         | 10000   | 0,05      | 5E-06    |
| 3560                    | 340                     | 40000  | 50000  | 8,35          | 8,4           | 0,40875               | 11,9942305                          | 10000   | 0,05      | 5E-06    |
| 3560                    | 340                     | 50000  | 60000  | 8,40          | 8,4           | 0,41                  | 12,03431136                         | 10000   | 0,00      | 0        |
| 3560                    | 340                     | 60000  | 70000  | 8,40          | 8,42          | 0,41                  | 12,03431136                         | 10000   | 0,02      | 2E-06    |
| 3560                    | 340                     | 70000  | 80000  | 8,42          | 8,45          | 0,4105                | 12,05039604                         | 10000   | 0,03      | 3E-06    |
| 3560                    | 340                     | 80000  | 90000  | 8,45          | 8,48          | 0,41125               | 12,07457951                         | 10000   | 0,03      | 3E-06    |
| 3560                    | 340                     | 90000  | 100000 | 8,48          | 8,53          | 0,412                 | 12,09883106                         | 10000   | 0,05      | 5E-06    |
| 3560                    | 340                     | 100000 | 130000 | 8,53          | 8,53          | 0,41325               | 12,13940274                         | 30000   | 0,00      | 0        |
| 3730                    | 370                     | 0      | 10000  | 8,53          | 8,55          | 0,41325               | 12,66720286                         | 10000   | 0,02      | 2E-06    |
| 3730                    | 370                     | 10000  | 20000  | 8,55          | 8,57          | 0,41375               | 12,68419316                         | 10000   | 0,02      | 2E-06    |
| 3730                    | 370                     | 20000  | 30000  | 8,57          | 8,58          | 0,41425               | 12,70121567                         | 10000   | 0,01      | 1E-06    |
| 3730                    | 370                     | 30000  | 40000  | 8,58          | 8,6           | 0,4145                | 12,70973905                         | 10000   | 0,02      | 2E-06    |
| 3730                    | 370                     | 40000  | 50000  | 8,60          | 8,61          | 0,415                 | 12,72681012                         | 10000   | 0,01      | 1E-06    |
| 3730                    | 370                     | 50000  | 60000  | 8,61          | 8,63          | 0,41525               | 12,73535784                         | 10000   | 0,02      | 2E-06    |
| 3730                    | 370                     | 60000  | 70000  | 8,63          | 8,65          | 0,41575               | 12,75247775                         | 10000   | 0,02      | 2E-06    |
| 3730                    | 370                     | 70000  | 80000  | 8,65          | 8,85          | 0,41625               | 12,76963039                         | 10000   | 0,20      | 2E-05    |
| 3730                    | 370                     | 80000  | 90000  | 8,85          | 9             | 0,42125               | 12,9429854                          | 10000   | 0,15      | 0,000015 |
| 3730                    | 370                     | 90000  | 100000 | 9,00          | 9,2           | 0,425                 | 13,0752375                          | 10000   | 0,20      | 2E-05    |
| 3730                    | 370                     | 100000 | 110000 | 9,20          | 9,3           | 0,43                  | 13,25466465                         | 10000   | 0,10      | 1E-05    |

Tabela 3 – Dados referentes ao ensaio de propagação de trinca por fadiga no SAE 4140.

| $P_{\text{máx}}$<br>(N) | $P_{\text{min}}$<br>(N) | $N_i$ | $N_f$ | $a_0$<br>(mm) | $a_f$<br>(mm) | $\alpha$<br>( $a/W$ ) | $\Delta K$ (MPa $\sqrt{\text{m}}$ ) | delta N | delta $a$ | da / dN     |
|-------------------------|-------------------------|-------|-------|---------------|---------------|-----------------------|-------------------------------------|---------|-----------|-------------|
| 13100                   | 1410                    | 0     | 5723  | 1,20          | 1,7           | 0,23                  | 27,23878453                         | 5723    | 0,50      | 8,73668E-05 |
| 12630                   | 1246                    | 6000  | 13000 | 1,70          | 2,35          | 0,2425                | 27,46232772                         | 7000    | 0,65      | 9,28571E-05 |
| 12000                   | 1210                    | 13500 | 20200 | 2,35          | 2,95          | 0,25875               | 27,20435848                         | 6700    | 0,60      | 8,95522E-05 |
| 11400                   | 1170                    | 20600 | 27400 | 2,95          | 3,6           | 0,27375               | 26,84421551                         | 6800    | 0,65      | 9,55882E-05 |
| 10790                   | 1080                    | 27600 | 33000 | 3,60          | 4,25          | 0,29                  | 26,58961077                         | 5400    | 0,65      | 0,00012037  |
| 10400                   | 1030                    | 33000 | 39500 | 4,25          | 4,98          | 0,30625               | 26,76291153                         | 6500    | 0,73      | 0,000112308 |
| 9850                    | 970                     | 40000 | 46500 | 4,98          | 5,63          | 0,3245                | 26,58281375                         | 6500    | 0,65      | 1E-04       |
| 9330                    | 940                     | 46500 | 53000 | 5,63          | 6,33          | 0,34075               | 26,18496546                         | 6500    | 0,70      | 0,000107692 |
| 8900                    | 840                     | 53000 | 59500 | 6,33          | 6,84          | 0,35825               | 26,31162687                         | 6500    | 0,51      | 7,84615E-05 |
| 8420                    | 830                     | 60000 | 66500 | 6,84          | 7,5           | 0,371                 | 25,60629292                         | 6500    | 0,66      | 0,000101538 |
| 8050                    | 805                     | 67000 | 73500 | 7,50          | 8,13          | 0,3875                | 25,51451415                         | 6500    | 0,63      | 9,69231E-05 |
| 7550                    | 760                     | 74100 | 80600 | 8,13          | 8,68          | 0,40325               | 24,92489467                         | 6500    | 0,55      | 8,46154E-05 |

| $P_{\text{máx}}$<br>(N) | $P_{\text{min}}$<br>(N) | $N_i$  | $N_f$  | $a_0$<br>(mm) | $a_f$<br>(mm) | $\alpha$<br>( $a/W$ ) | $\Delta K$ (MPa $\sqrt{m}$ ) | delta N | delta $a$ | $da / dN$   |
|-------------------------|-------------------------|--------|--------|---------------|---------------|-----------------------|------------------------------|---------|-----------|-------------|
| 7190                    | 715                     | 80700  | 87200  | 8,68          | 9,11          | 0,417                 | 24,65784253                  | 6500    | 0,43      | 6,61538E-05 |
| 6770                    | 670                     | 88000  | 94500  | 9,11          | 9,68          | 0,42775               | 23,91613522                  | 6500    | 0,57      | 8,76923E-05 |
| 6440                    | 650                     | 94800  | 101300 | 9,68          | 10,08         | 0,442                 | 23,60892416                  | 6500    | 0,40      | 6,15385E-05 |
| 6155                    | 628                     | 0      | 6500   | 10,08         | 10,4          | 0,452                 | 23,17670074                  | 6500    | 0,32      | 4,92308E-05 |
| 5852                    | 580                     | 6780   | 13000  | 10,40         | 10,7          | 0,46                  | 22,61548993                  | 6220    | 0,30      | 4,82315E-05 |
| 5521                    | 553                     | 13350  | 19400  | 10,70         | 10,95         | 0,4675                | 21,77621879                  | 6050    | 0,25      | 4,13223E-05 |
| 5242                    | 522                     | 19500  | 26500  | 10,95         | 11,15         | 0,47375               | 21,06901871                  | 7000    | 0,20      | 2,85714E-05 |
| 4987                    | 485                     | 27000  | 33500  | 11,15         | 11,4          | 0,47875               | 20,39354175                  | 6500    | 0,25      | 3,84615E-05 |
| 4735                    | 480                     | 34500  | 42500  | 11,40         | 11,65         | 0,485                 | 19,63590365                  | 8000    | 0,25      | 0,00003125  |
| 4461                    | 465                     | 42900  | 50000  | 11,65         | 11,85         | 0,49125               | 18,79044895                  | 7100    | 0,20      | 2,8169E-05  |
| 4213                    | 418                     | 50400  | 56870  | 11,85         | 12            | 0,49625               | 18,11856473                  | 6470    | 0,15      | 2,31839E-05 |
| 4000                    | 400                     | 57000  | 64500  | 12,00         | 12,2          | 0,5                   | 17,38634154                  | 7500    | 0,20      | 2,66667E-05 |
| 3860                    | 380                     | 64700  | 71200  | 12,20         | 12,35         | 0,505                 | 17,06879534                  | 6500    | 0,15      | 2,30769E-05 |
| 3630                    | 363                     | 71700  | 78200  | 12,35         | 12,55         | 0,50875               | 16,21276706                  | 6500    | 0,20      | 3,07692E-05 |
| 3450                    | 347                     | 78600  | 85100  | 12,55         | 12,75         | 0,51375               | 15,64342976                  | 6500    | 0,20      | 3,07692E-05 |
| 3230                    | 327                     | 85600  | 92100  | 12,75         | 13            | 0,51875               | 14,87008606                  | 6500    | 0,25      | 3,84615E-05 |
| 3070                    | 300                     | 93000  | 99500  | 13,00         | 13,15         | 0,525                 | 14,47768322                  | 6500    | 0,15      | 2,30769E-05 |
| 2920                    | 295                     | 99900  | 106400 | 13,15         | 13,3          | 0,52875               | 13,88862901                  | 6500    | 0,15      | 2,30769E-05 |
| 2800                    | 270                     | 107000 | 113500 | 13,30         | 13,5          | 0,5325                | 13,55210726                  | 6500    | 0,20      | 3,07692E-05 |
| 2660                    | 260                     | 0      | 10000  | 13,50         | 13,65         | 0,5375                | 13,07108442                  | 10000   | 0,15      | 0,000015    |
| 2527                    | 250                     | 10000  | 20000  | 13,65         | 13,8          | 0,54125               | 12,55826225                  | 10000   | 0,15      | 0,000015    |
| 2400                    | 240                     | 20000  | 30000  | 13,80         | 13,9          | 0,545                 | 12,06521762                  | 10000   | 0,10      | 1E-05       |
| 2280                    | 230                     | 30000  | 40500  | 13,90         | 14,03         | 0,5475                | 11,54886869                  | 10500   | 0,13      | 1,2381E-05  |
| 2166                    | 220                     | 40500  | 50500  | 14,03         | 14,13         | 0,55075               | 11,08606444                  | 10000   | 0,10      | 1E-05       |
| 2058                    | 206                     | 50500  | 60500  | 14,13         | 14,22         | 0,55325               | 10,64220752                  | 10000   | 0,09      | 9E-06       |
| 1955                    | 195                     | 60500  | 70500  | 14,22         | 14,35         | 0,5555                | 10,19303985                  | 10000   | 0,13      | 1,3E-05     |
| 1860                    | 185                     | 70800  | 80800  | 14,35         | 14,5          | 0,55875               | 9,81185078                   | 10000   | 0,15      | 0,000015    |
| 1730                    | 167                     | 81500  | 91500  | 14,50         | 14,65         | 0,5625                | 9,277927148                  | 10000   | 0,15      | 0,000015    |
| 1630                    | 160                     | 92800  | 122800 | 14,65         | 14,83         | 0,56625               | 8,843410036                  | 30000   | 0,18      | 6E-06       |
| 1550                    | 155                     | 123000 | 223000 | 14,83         | 14,83         | 0,57075               | 8,529483628                  | 100000  | 0,00      | 0           |
| 1550                    | 155                     | 0      | 10000  | 14,83         | 14,83         | 0,57075               | 8,529483628                  | 10000   | 0,00      | 0           |
| 1550                    | 155                     | 10000  | 20000  | 14,83         | 14,83         | 0,57075               | 8,529483628                  | 10000   | 0,00      | 0           |
| 1550                    | 155                     | 20000  | 30000  | 14,83         | 14,83         | 0,57075               | 8,529483628                  | 10000   | 0,00      | 0           |
| 1550                    | 155                     | 30000  | 40000  | 14,83         | 14,85         | 0,57075               | 8,529483628                  | 10000   | 0,02      | 2E-06       |
| 1550                    | 155                     | 40000  | 50000  | 14,85         | 14,88         | 0,57125               | 8,544972501                  | 10000   | 0,03      | 3E-06       |
| 1550                    | 155                     | 50000  | 60000  | 14,88         | 15            | 0,572                 | 8,568296136                  | 10000   | 0,12      | 1,2E-05     |
| 1550                    | 155                     | 60000  | 70000  | 15,00         | 15,25         | 0,575                 | 8,662688192                  | 10000   | 0,25      | 0,000025    |
| 1550                    | 155                     | 70000  | 80000  | 15,25         | 15,5          | 0,58125               | 8,865147254                  | 10000   | 0,25      | 0,000025    |

Tabela 4 – Dados referentes ao ensaio de propagação de trinca por fadiga no SAE 4340.

Ainda utilizando o software Microsoft Excel e os dados apresentados nas Tabelas 3 e 4, foi possível traçar os gráficos abaixo e as linhas de tendência, referentes aos corpos de prova dos aços ensaiados e posteriormente analisá-los:

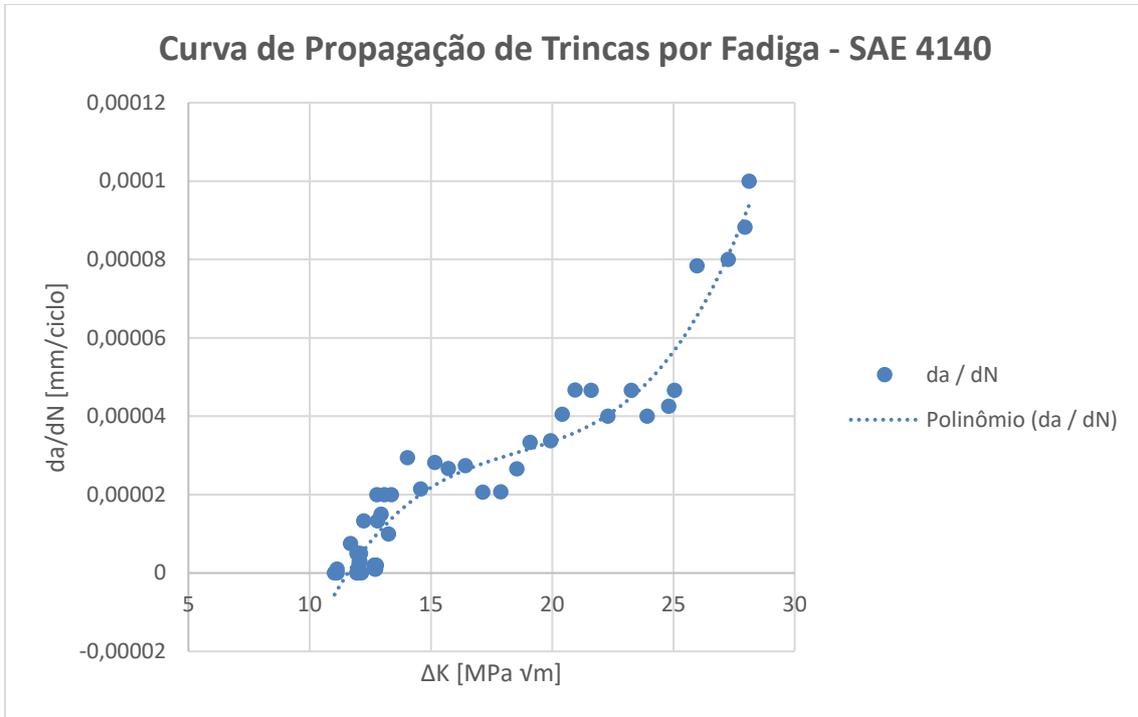


Figura 37 – Gráfico  $da/dN$  versus  $\Delta K$  – Aço 4140.

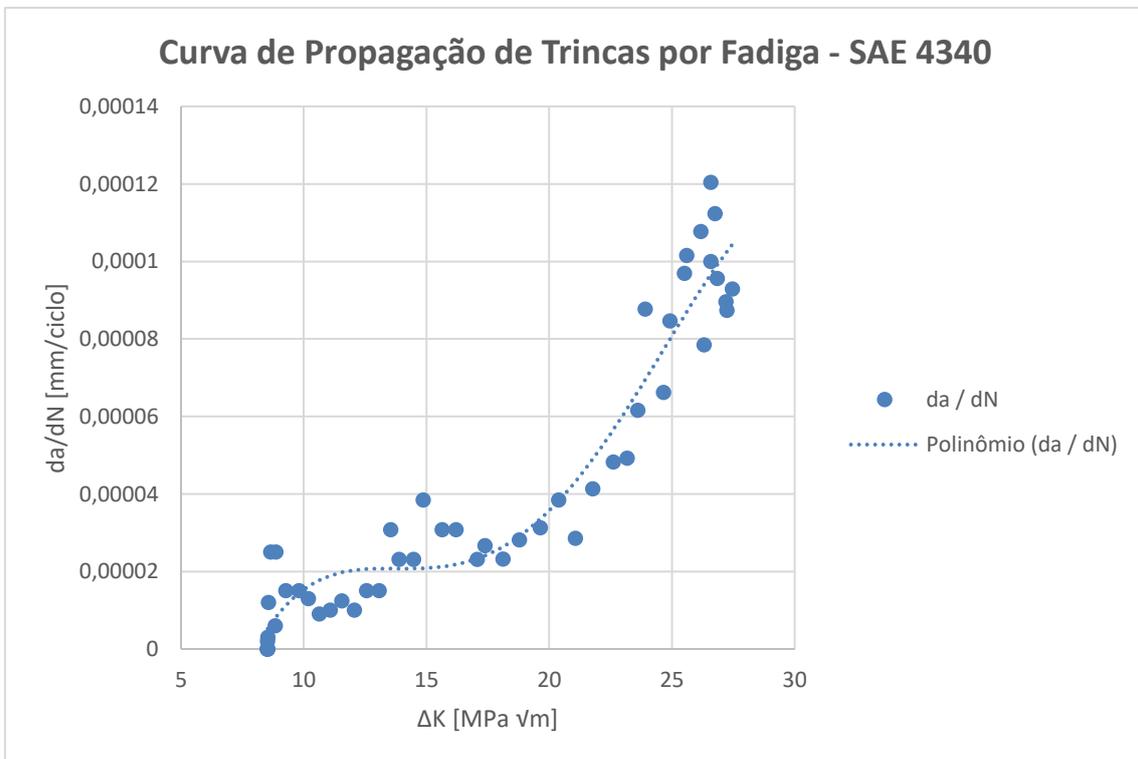


Figura 38 – Gráfico  $da/dN$  versus  $\Delta K$  – Aço 4340.

Ao analisar os gráficos, pode-se determinar os valores de  $\Delta K_{th}$  de cada material, parâmetro de fundamental importância, visto que quanto maior o limiar de propagação de trinca por fadiga, mais difícil da trinca se propagar no material. Para a determinação dos valores do  $\Delta K_{th}$ , as cargas do ensaio foram reduzidas até que não houve mais incremento no comprimento da trinca. Após essa situação ocorrer, o ensaio foi mantido até  $10^5$  ciclos, para que esse valor de threshold fosse confirmado (norma ASTM E-647).

| Aços           | $\Delta K_{th}$<br>(MPa $\sqrt{m}$ ) |
|----------------|--------------------------------------|
| SAE 4140       | 12,13                                |
| SAE 4340       | 8,53                                 |
| DIN 34CrNiMo 6 | 6,51                                 |

Tabela 5 – Valores de  $\Delta K_{th}$ .

O valor de  $\Delta K_{th}$  do aço DIN 34CrNiMo6 [31], material original do eixo virabrequim citado na motivação deste trabalho, foi fornecido e calculado seguindo o mesmo procedimento dos aços SAE 4140 e 4340 e apresentado na Tabela 5 para permitir comparação com os resultados obtidos neste trabalho.

As imagens geradas pelo Microscópio Ótico Carl Zeiss AXIO Lab.A1, apresentadas nas Figuras 40 – 45, mostram a microestrutura e heterogeneidades metalúrgicas dos aços SAE 4140 e SAE 4340 na região de threshold, facilitando correlacionar estes aspectos microestruturais com o limiar de propagação de trinca por fadiga de cada um dos materiais analisados neste trabalho.

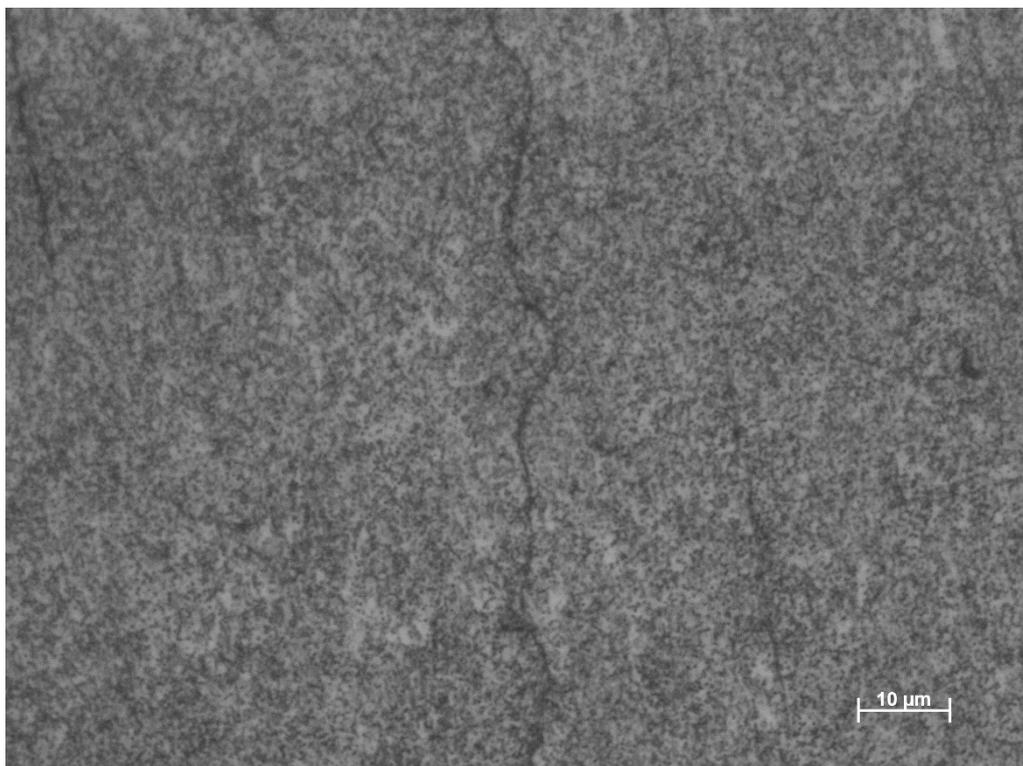


Figura 39 – Microestrutura do aço SAE 4140 na região de threshold.

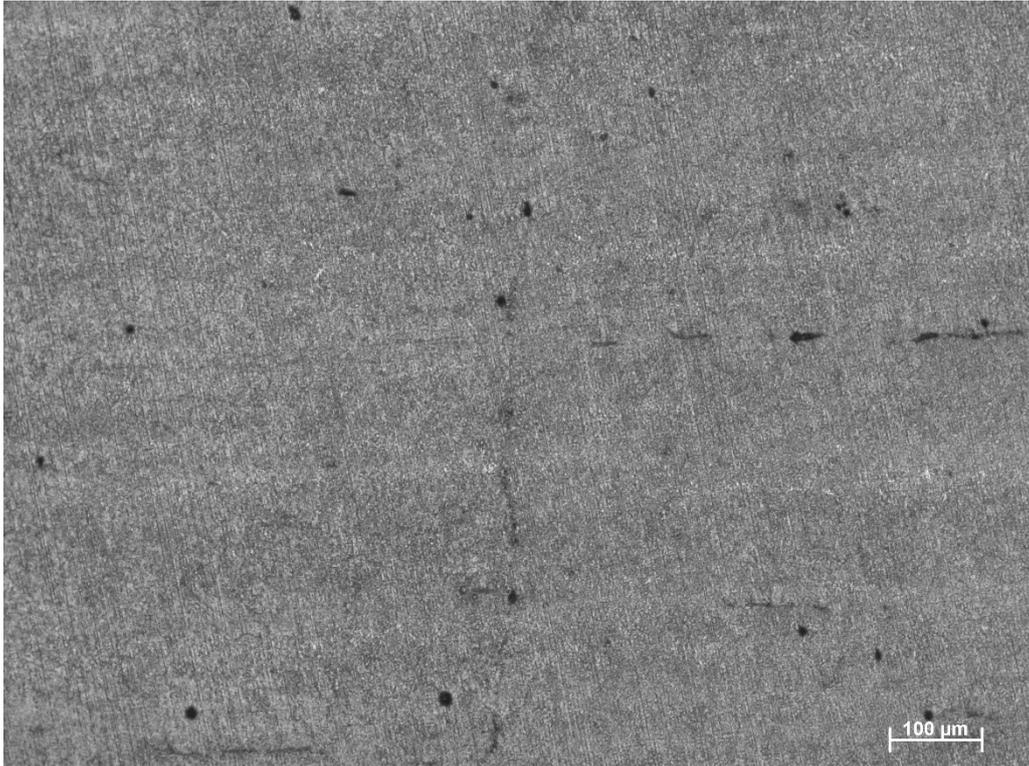


Figura 40 – Inclusões no aço SAE 4140 na região de threshold.

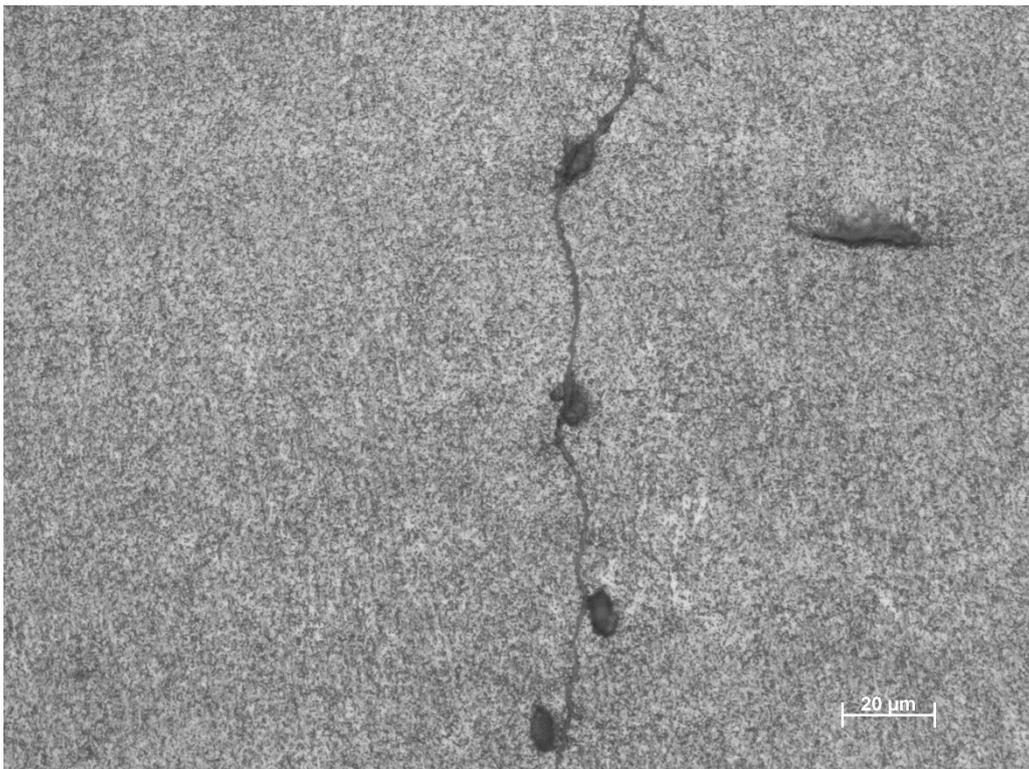
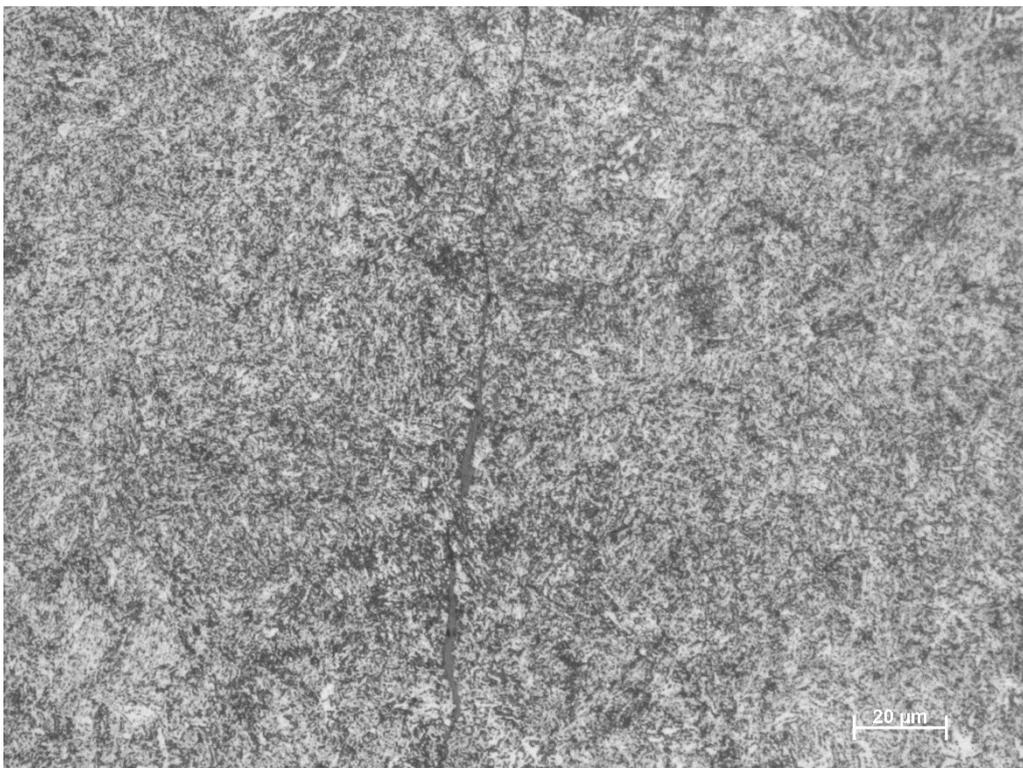


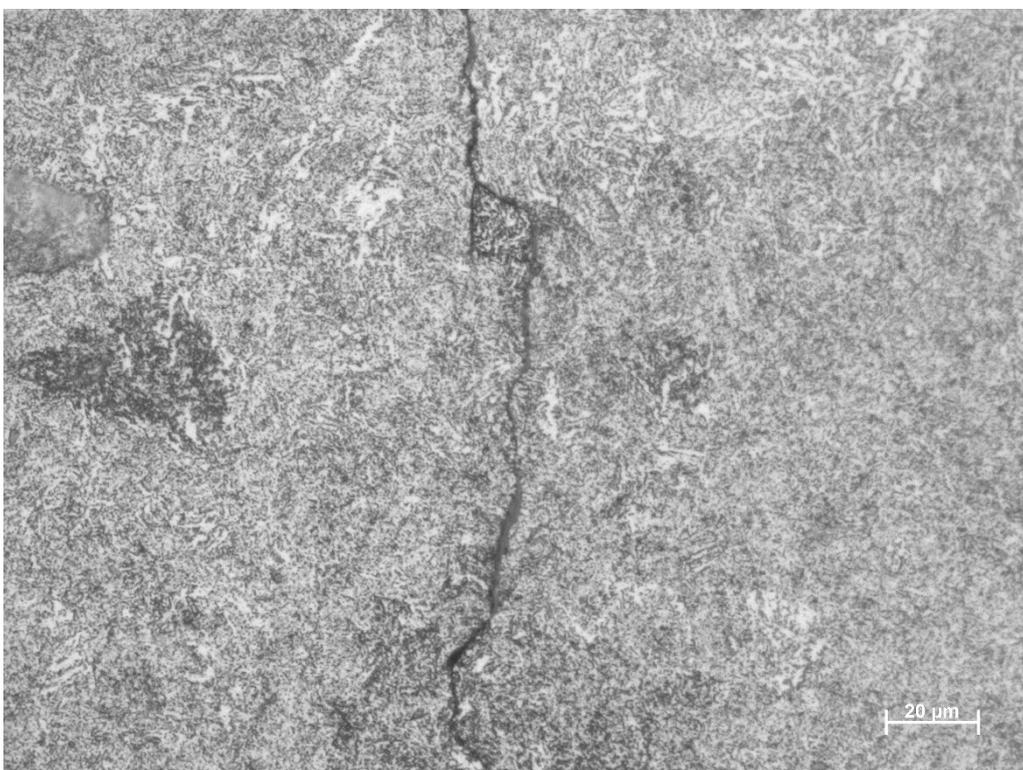
Figura 41 – Inclusões no aço SAE 4140 na região de threshold. Detalhamento da figura anterior.

Na microestrutura do aço SAE 4140 foi possível perceber que os grãos deste aço são muito finos e que o caminho que a trinca se propagou foi

influenciado pelas heterogeneidades metalúrgicas presentes no material, como ficou mais claro na Figura 43.



**Figura 42 – Microestrutura do aço SAE 4340 na região de threshold.**



**Figura 43 –Desvio de trinca em barreiras microestruturais aço SAE 4340 na região de threshold.**

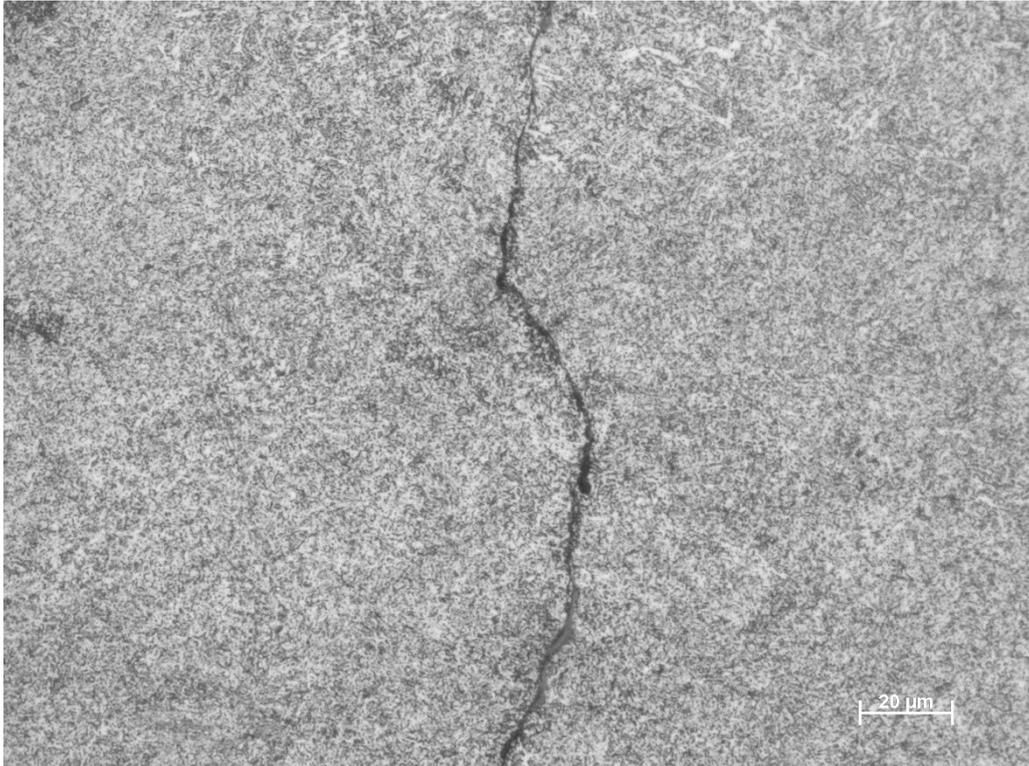


Figura 44 –Microestrutura do aço SAE 4140 na região de threshold. Detalhamento da figura anterior.

Já na microestrutura do aço SAE 4340, pode-se perceber que o ataque por ultrassom com Nital 2% não foi tão eficaz quanto no aço SAE 4140 e por isso, as heterogeneidades metalúrgicas não ficaram tão claras. Para este material, também foi possível perceber que as trincas tendem a se propagar sendo guiadas por essas heterogeneidades e em alguns momentos, como visto na Figura 45, o caminho da trinca se modifica bruscamente por causa de heterogeneidade microestrutural, responsável pela bifurcação da trinca, que posteriormente se uniu novamente.

## 5. Conclusão

O presente trabalho avaliou a relação entre limiar de propagação de trincas por fadiga e aspectos microestruturais nos aços SAE 4140 e SAE 4340. Os resultados obtidos nesse trabalho levam as seguintes conclusões:

- O aço SAE 4140 foi aquele que apresentou o maior valor de  $\Delta K_{th}$  (12.13 MPa  $\sqrt{m}$ ).
- Líquidos penetrantes indicaram para esse material um menor comprimento de trinca, quando comparado com o SAE 4340.
- Apesar do aço SAE 4340 apresentar um valor de  $\Delta K_{th}$  (8.53 MPa  $\sqrt{m}$ ) menor do que aquele encontrado para o aço SAE 4140, ainda assim foi um valor superior ao do material de referência aço DIN 34CrNiMo6, cujo  $\Delta K_{th}$  foi 6.51 MPa  $\sqrt{m}$ .
- Ensaio de microscopia ótica indicaram que heterogeneidades metalúrgicas estavam presentes no caminho de propagação das trincas de fadiga para os aços SAE 4140 e SAE 4340, mostrando assim que aspectos microestruturais influenciam na propagação das trincas.
- Com isso, no que se refere à iniciação de trincas de fadiga, o aço SAE 4140 se apresenta como a alternativa mais adequada para utilização na fabricação de um eixo virabrequim para motores de usinas termoeletricas, uma vez que apresentou o maior valor de  $\Delta K_{th}$ , além de possuir uma microestrutura com grãos de pequeno tamanho e bem refinados, com menor quantidade de heterogeneidades metalúrgicas.

## 6. Sugestões para trabalhos futuros

Fica como sugestão para trabalhos futuros, a realização de uma análise microestrutural mais completa e detalhada através do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) dos aços SAE 4140 e SAE 4340, buscando identificar de maneira mais clara as heterogeneidades metalúrgicas e outros aspectos microestruturais que possam influenciar a propagação da trinca de fadiga tanto na região de threshold como em outras regiões. Além disso, poderia ser viável uma análise mais completa de outros aços comumente usados em eixos virabrequins e motores Diesel e gás natural para ampliar as possibilidades de escolha.

## 7. Referências Bibliográficas

- [1] CALLISTER JR, W. D. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 7.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 705p.
- [2] Ashby, MF; Jones,DRH. Engineering Materials, Pergamon 1981.
- [3] Ashby, MF; Jones,DRH. Engineering Materials 2, Pergamon 1981.
- [4] Castro. J. T. P. D.; Meggiolaro. M. A.: “Fadiga – Técnicas e Práticas de Dimensionamento Estrutural sob Cargas Reais de Serviço. Volume I – Iniciação de Trincas.”
- [5] Castro. J. T. P. D.; Meggiolaro. M. A.: “Fadiga – Técnicas e Práticas de Dimensionamento Estrutural sob Cargas Reais de Serviço. Volume II – Propagação de Trincas, Efeitos Térmicos e Estocásticos.”
- [6] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E 647 – 15 Fatigue Crack Growth Rates - Standard Test Method for
- [7] Measurement of Fatigue Crack Growth Rates – EUA, 2016 - 49p.
- [8] <https://www.manutencaoemfoco.com.br/ensaios-nao-destrutivos-end/>
- [9] <https://engeteles.com.br/ensaios-nao-destrutivos/>
- [10] <https://russelservicos.com.br/blog/tipos-de-ensaios-nao-destrutivos/>
- [11] <http://wwwo.metallica.com.br/o-que-e-end-ensaio-nao-destrutivo>
- [12] <http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/ensaios-nao-destrutivos-e-mecanicos/217-ensaio-nao-destrutivo-liquidos-penetrantes.html>
- [13] <ftp://ftp.mecanica.ufu.br/LIVRE/Valtair%20-%20END/L%20CDQUIDO%20PENETRANTE.pdf>
- [14] <http://www.abnt.org.br/noticias/4597-ensaios-nao-destrutivos-liquido-penetrante-qualificacao-de-procedimento>
- [15] <http://www.engbrasil.eng.br/pp/em/aula14.pdf>
- [16] <http://essel.com.br/cursos/material/01/EnsaioMateriais/ensa19.pdf>
- [17] [http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2010\\_tn\\_sto\\_116\\_761\\_17564.pdf](http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2010_tn_sto_116_761_17564.pdf)
- [18] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E 1417, ASTM Internacional. Standard Practice for Liquid Penetrant Testing. Estados Unidos, 2005.

- [19] ANDREUCCI, R. Ensaio por líquidos penetrantes. ABENDE Associação Brasileira de Ensaio não Destrutivos. São Paulo, 2008. 68 p
- [20] Paris,PC; Gomez,MP; Anderson, WE “A rational analytic theory of fatigue”, The Trend in Engineering,1961
- [21] Bulloch, J.H., The influence of Mean Stress or R-Ratio on the Fatigue Crack Threshold Characteristics of Steels – A Review, Dublin, 1990.
- [22] Bulloch, J.H., Fatigue threshold in steels – Mean stress and microstructure influences, Dublin, 1993.
- [23] <https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/aco-sae-4140-propriedades-mecanicas.html>
- [24] <https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/aco-sae-4340-propriedades-mecanicas.html>
- [25] Rocha, M. A. C. (2004) Análise das propriedades Mecânicas do aço SAE 4140 com estrutura Bifásica. Dissertação de Mestrado.
- [26] <http://www.ggdmetals.com.br/produto/sae-4340/>
- [27][http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/maprot ec/catalogo\\_acos\\_gerdau.pdf](http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/maprot ec/catalogo_acos_gerdau.pdf)
- [28] Budinski,KG; Budinski,MK. Engeneering Materials,7th ed., Prentice Hall 2002
- [29] ASM Handbook v.1, Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys, ASM 1993
- [30] ASM Metals Handbook v.1, Properties and Selection of Metals, 8th ed ASM 1961
- [31] PEIXOTO, Thiago; “Interação Entre Aspectos Microestruturais e Iniciação de Trincas de Fadiga em Aços Estruturais”, Rio de Janeiro, Agosto 2018. Dissertação de Mestrado.