



Leticia Bueno Nogueira

**Estudo da influência de defeitos
microestruturais no limiar de fadiga de
aços estruturais**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química e de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Marcos Venicius Soares Pereira

Rio de Janeiro
Setembro de 2017



Leticia Bueno Nogueira

**Estudo da influência de defeitos
microestruturais no limiar de fadiga de
aços estruturais**

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção de grau de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia de Materiais e de
Processos Químicos e Metalúrgicos da PUC-
Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo
assinada

Prof. Marcos Venicius Soares Pereira

Orientador/Presidente

Departamento de Engenharia Química e de Materiais – PUC-Rio

Prof. Fathi Aref Ibrahim Darwish

Universidade Federal FluminenseUFF-RJ

DR Arnaldo Camarão

SAE Brasil

Prof. Márcio da Silveira de Carvalho

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico-PUC-Rio

Rio de Janeiro, 20 de setembro de 2017

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem a autorização da universidade, da autora e do orientador.

Leticia Bueno Nogueira

Graduou-se em Engenharia de Petróleo na PUC-Rio em 2010. Coursou pós-graduação no IBMEC-RIO (Instituto Brasileiro de Mercado de Capitais) em Gestão de Projetos em 2015. Atuou como Engenheira de campo na Argentina e atualmente é consultora de projetos de perfuração, completção e interveção de poços.

Ficha Catalográfica

Nogueira, Leticia Bueno

Estudo da influência de defeitos microestruturais no limiar de fadiga de aços estruturais / Leticia Bueno Nogueira ; orientador: Marcos Venicius Soares Pereira. – 2017.

79 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)—Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Química e de Materiais, 2017.

Inclui bibliografia

1. Engenharia de Materiais – Teses. 2. Engenharia Química – Teses. 3. Mecânica da Fratura Linear Elástica. 4. Curvas da/dN. 5. Iniciação de trincas. 6. Inclusões. I. Pereira, Marcos Venicius Soares. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Química e de Materiais. III. Título.

CDD: 620.11

Para minha filha Aimée, que um dia tenha
orgulho de sua mãe por tentar superar-se
a cada dia sem medo de cometer erros e
incansavelmente tentar corrigi-los

Agradecimentos

Primeiramente a Deus, que me guia, me sustenta e orienta meu caminho.

Ao meu orientador, Prof. Marcos Venicius Soares Pereira, pela competente orientação e parceria para realização deste trabalho.

A CAPES e a PUC-Rio, pelo auxílio concedido.

A todos os professores e funcionários do Departamento e dos laboratórios da PUC-Rio.

Aos meus pais, Alberto e Ademilde, por estarem ao meu lado e apoiarem minhas escolhas.

A minha amada irmã, Daiza, que sempre se dispôs a me ajudar e a cuidar da minha filha recém-nascida durante o período final da pós-graduação.

Aos meus colegas da PUC-RJ pela parceria durante o período que estivemos juntos.

Aos professores que participaram da Comissão Examinadora por disponibilizar seu precioso tempo e sapiência em virtude de minha defesa.

A todos os professores e funcionários do Departamento e dos laboratórios da PUC-Rio pela disponibilidade, competência e orientações.

A minha filha Aimée que, mesmo tão pequena, transformou minha vida e me ensina diariamente a dar o devido valor ao que realmente importa.

Resumo

NOGUEIRA, Leticia B. **Estudo da influência de defeitos microestruturais no limiar de fadiga de aços estruturais**. Rio de Janeiro, 2017. 79p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Química e de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A determinação do limiar de propagação de trincas de fadiga oferece uma gama de utilização dos materiais na engenharia, na aplicação a projetos que sejam tolerantes ao dano. ΔK_{th} é uma ferramenta que permite o estabelecimento de um critério de carregamento sob o qual as trincas não crescerão significativamente durante as operações de serviço do componente. Para sua determinação ser amplamente aplicada, foi necessário estabelecer e estudar os fatores que pudessem influenciá-lo positiva ou negativamente. Dentre os quais, a microestrutura apresentou grande importância porque precisou ser controlada desde a fabricação do material até a colocação em serviço do componente acabado. A finalidade do componente e os esforços a que são submetidos quando em serviço determinam a seleção do material. Assim, enumerou-se características básicas e requisitos mínimos que atenderam a segurança e reduziram a relação custo-benefício. Foram selecionados materiais (SAE 4340 e SAE 4140) cuja composição química e propriedades mecânicas fossem semelhantes ao 42CrMo4 para que pudessem servir de alternativa no emprego de eixos-virabrequim a fim de propor uma solução no problema prático o qual estes vinham rompendo muito abaixo do limite de vida em fadiga a que se propunham. Os resultados obtidos se mostraram satisfatórios pois nos ensaios de propagação de trinca de um dos materiais escolhidos (SAE 4140) obteve-se ΔK_{th} de 12,48 MPa \sqrt{m} e no material de referência, ΔK_{th} (médio) de 6,1 MPa \sqrt{m} . A observação da microestrutura do material de referência pode, com ressalvas, ser visto como indicativo de corroboração do resultado apresentado no ΔK_{th} , pois foram localizadas ocorrências de inclusões dispersas na matriz metálica.

Palavras-chave

Mecânica da Fratura Linear Elástica; Curvas da/dN; Iniciação de trincas; Inclusões

Abstract

NOGUEIRA, Leticia B. **Study of the influence of microstructural defects on the fatigue threshold of structural steels.** Rio de Janeiro, 2017.79p. Dissertação de Mestrado– Departamento de Engenharia Química e de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The determination of the fatigue crack propagation threshold offers a range of materials utilization in engineering, in application to projects that are tolerant to damage. ΔK_{th} is a tool that allows the establishment of a loading criterion under which the cracks will not grow significantly during the service operations of the component. For its determination to be widely applied, it was necessary to establish and study the factors that could influence it positively or negatively. Among them, the microstructure was of great importance because it had to be controlled from the material manufacturing to the placing putting into service of a finished component. The aim of the component and the stresses to which it is subjected when in service determine the material selection. Thus, basic characteristics and minimum requirements were listed which have attend the safety and has reduced cost-benefit ratio. Materials (SAE 4340 and SAE 4140) were selected whose chemical composition and mechanical properties that were similar to DIN 42CrMo4 so that they could serve as an alternative in the use of crankshafts to propose a solution in the practical problem which they were breaking well below the limit fatigue life that they proposed. The results obtained were satisfactory because in the fracture toughness tests of one of the chosen materials (SAE 4140) ΔK_{th} of 12.48 MPa \sqrt{m} was obtained and in the reference material, $\Delta K_{th(average)}$ of 6.1 MPa \sqrt{m} . The observation of the microstructure of the reference material may indicate, with restrictions, as a corroboration of the result presented in the ΔK_{th} , because occurrences of dispersed inclusions in the steel matrix.

Keywords

Linear Elastic Mechanic Fracture; da/dN Curves; Inclusions; crack initiation.

Sumário

1. Introdução.....	17
1.1 Motivação	17
1.2 Considerações gerais	17
1.3 Objetivos.....	18
2. Revisão Bibliográfica	19
2.1 Fadiga	19
2.1.1 Conceito.....	19
2.1.2 Filosofias de projeto	21
2.2 Iniciação de trincas de fadiga	21
2.2.1 Modos de fratura macroscópicos.....	22
2.2.2 Caracterização do crescimento de trinca	23
2.2.3 Crescimento de trincas de fadiga em sólidos dúcteis	23
2.2.4. Diferentes estágios de crescimento de trinca de fadiga.....	25
2.3 Limiar de propagação de trincas de fadiga.....	26
2.3.1 Limiares de iniciação.....	29
2.3.2 Influência do tamanho de grão	32
2.3.3 Influência de tensões residuais	33
2.4 Inclusões	33
2.4.2 Composição química	33
3. Materiais e Métodos	36
3.1 Caracterização dos materiais	36
3.1.1 Composição química	36
3.1.2 Tratamento térmico.....	37
3.1.3 Ensaio Mecânicos	37

3.1.3.1 Ensaio de Tração	37
3.1.3.2 Resumo do método	41
3.1.3.3 Procedimento	43
3.1.3.3 Equipamentos, configuração da amostra, tamanho e preparação	44
3.1.4 Microscopia Ótica.....	46
4. Resultados e discussões	49
4.1 Composição Química	49
4.2 Tratamento térmico.....	50
4.3 Ensaaios Mecânicos	51
4.3.1 Ensaio de tração.....	51
4.3.2 Ensaio de propagação de trinca	53
4.4 Microscopia ótica	54
4.4.1 Superfície de fratura:	55
4.4.2 Perfil da região de propagação de trinca	59
5. Conclusões.....	69
6. Sugestões para trabalhos futuros	71
7. Referências Bibliográficas.....	72
Anexo I	75
Anexo II.....	76
Anexo III	77
Anexo III	78
ANEXO IV	79

Lista de figuras

Figura 1- Ciclo de fadiga e parâmetros associados Fonte: https://goo.gl/images/JH2UeF acessado em 04 de maio de 2017.	20
Figura 2 - Três modos básicos de fratura, sendo (a), (b) e (c) Modos I, II e III, respectivamente Fonte: https://goo.gl/images/7N26ps Acessado em 02 de abril de 2017.	22
Figura 3 - Comportamento típico do crescimento de trinca em carregamento de fadiga com amplitude constante [Suresh].....	23
Figura 4 - Esquemas dos regimes de propagação de uma trinca de fadiga Fonte: https://goo.gl/images/N3Z2D7 acessado em 18 de março.	26
Figura 5 - Comportamento típico da propagação de trinca por fadiga em metais (adaptado de https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/94421/oliveira_lg_me_guara.pdf?sequence=1 acessado em 09 de julho de 2017).....	27
Figura 6 - Diagrama de Haigh Fonte: https://goo.gl/images/giSCgF acessado em 02 de fevereiro de 2017.	30
Figura 7 - Carregamento completamente reverso Fonte: http://slideplayer.com.br/slide/10732760/ acessado em 04 de maio de 2017.	31
Figura 8 - Esquema da geometria dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração Fonte: Adaptado de ASTM. ASTM E8M - 16a: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Material , ASTM International, West Conshohocken, 2016.	38
Figura 9 - Ensaio de tração	39
Figura 10 - Corpo de prova tipo CT	39
Figura 11 - Polimento das amostras: (a) Politriz DPU-10 com abrasivo de 6µm (b) Politriz Aropol VV com abrasivo de 1 µm.....	40
Figura 12 - Máquina Servo-hidráulica.....	41
Figura 13 Detalhes do Entalhe e pré-requisitos mínimos de pré-trincamento Fonte: ASTM - American society for testing materials. ASTM E45 - 13: Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel , ASTM International, West Conshohocken, 2013	45

Figura 14 Esquema do corpo de prova padrão do tipo C(T) Fonte: ASTM - American society for testing materials. ASTM E45 - 13: Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel, ASTM International, West Conshohocken, 2013	46
Figura 15 - Visualização da superfície de fratura em microscópio	47
Figura 16 - Corpos de prova tipo CT extraídos do material DIN 42CrMo4 fraturados em nitrogênio líquido: (a) Metade do corpo de prova A (b) Metade do corpo de prova B	47
Figura 17 - Corpos de prova do material DIN 42CrMo4 cortados e embutidos em resina para análise metalográfica (a) Corpo de prova A (b) Corpo de prova B	48
Figura 18 - Microscópio Olympus BX60M para realização de metalografia qualitativa	48
Figura 19 - Resultados obtidos após ensaio de propagação de trinca	54
Figura 20 - Visualização da frente de propagação da trinca com medidas para obter o valor médio de a da amostra A rotacionada 90°	56
Figura 21 - Visualização da frente de propagação da trinca com medidas da região de propagação de trincas da amostra A rotacionada 90°	57
Figura 22 - Visualização da frente de propagação da trinca com medidas para obter o valor médio de a da amostra B.	58
Figura 23 - Inclusão 1 aumento de 200x	60
Figura 24 - Inclusão 1 com aumento de 500x	60
Figura 25 - Inclusão 2 com aumento de 500x	61
Figura 26 - Inclusão 3 com aumento de 500x	61
Figura 27 - Inclusão 3 com aumento de 1000x	62
Figura 28 - Inclusões 4 e 5 com aumento de 100x	62
Figura 29 - Inclusões 4 e 5 com aumento de 200x	63
Figura 30 - Inclusões 6, 7 e 8 com aumento de 100x	63
Figura 31 - Inclusão 1 amostra B com aumento de 200x	64
Figura 32 - Inclusão 1 amostra B com aumento de 1000x	64
Figura 33 - Inclusão 2 amostra B com aumento de 100x	65
Figura 34 Inclusão 2 amostra B com aumento de 1000x	65
Figura 35 - Inclusão 3 amostra B com aumento de 50x	66
Figura 36 - Inclusão 3 amostra B com aumento de 500x	66
Figura 37 - Inclusão 3 amostra B com aumento de 1000x	66

Figura 38 - Inclusão 4 amostra B com aumento de 1000x	67
Figura 39 - Inclusão 5 amostra B com aumento de 1000x	67
Figura 40 - Inclusão 6 amostra B com aumento de 1000x	68
Figura 41- Inclusões 4, 5 e 6 amostra B com aumento de 500x.....	68
Figura 42 - Análise química para confirmação do tipo de aço adquirido de fornecedor externo.....	75
Figura 43 - Análise química para confirmação do tipo de aço adquirido de fornecedor externo.....	76
Figura 44 - Nota de compra do material utilizado para análise.....	77
Figura 45 - Tratamento térmico SAE 4340	78
Figura 46 - Tratamento térmico SAE 4140	79

Lista de tabelas

Tabela 1 - Informações da geometria dos corpos de prova para ensaio de tração	38
Tabela 2 - Geometria do corpo de prova	40
Tabela 3 - Composição Química do material de referência do eixo virabrequim (DIN 42CrMo4).....	49
Tabela 4 - Composição Química do material extraído de barra redonda Gerdau 4140	49
Tabela 5 - Composição Química do material extraído de barra redonda Arcelor Mittal 4340	50
Tabela 6 - Dureza média dos materiais após tratamento térmico.....	51
Tabela 7 - Tensões Resultantes do Ensaio de tração do aço SAE4140.....	51
Tabela 8 - Alongamentos Resultantes do Ensaio de tração do aço SAE4140.....	52
Tabela 9 - Redução de área resultantes do Ensaio de tração do aço SAE4140.....	52
Tabela 10 - Tensões Resultantes do Ensaio de tração do aço SAE4340.....	52
Tabela 11 - Alongamentos Resultantes do Ensaio de tração do aço SAE4340.....	52
Tabela 12 - Redução de área resultantes do Ensaio de tração do aço SAE4340...	52
Tabela 13 - Tensões Resultantes do Ensaio de tração do aço DIN 42CrMo4.....	53
Tabela 14 - Alongamentos Resultantes do Ensaio de tração aço DIN 42CrMo4..	53
Tabela 15 - Redução de área resultantes do Ensaio de tração aço DIN 42CrMo4	53

Lista de abreviaturas e siglas

ASTM	<i>American Society Testing and Materials</i>
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i> – Instituto Alemão para Normatização
CT	Corpo de Prova Compacto com aplicação de carga trativa para ensaio de propagação de trinca
SAE	<i>Society of Automotive Engineering</i> - Sociedade de Engenharia Automotiva.
AISI	<i>American Iron and Steel Intitute</i> – Intituto Americano de ferro e aço
MFLE	Mecânica da Fratura Linear-Elástica
MFEP	Mecânica da Fratura Elasto-Plástica
LE	Limite de Escoamento
LRM	Limite de Resistência Mecânica
PA	Porcentagem de Alongamento

Lista de Símbolos

E Módulo de Elasticidade

σ_Y Tensão de escoamento

σ_U Tensão máxima

ΔK_{th} Fator limiar de propagação de trincas por fadiga

ΔP Variação de carga aplicada

P_{\max} Máxima carga aplicada durante o carregamento

P_{\min} Mínima carga aplicada durante o carregamento

Lista de Equações

Equação (1).....	20
Equação (2).....	20
Equação (3).....	20
Equação (4).....	20
Equação (5).....	20
Equação (6).....	24
Equação (7).....	24
Equação (8).....	24
Equação (9).....	24
Equação (10).....	24
Equação (11).....	24
Equação (12)	24
Equação (13).....	25
Equação (14).....	25
Equação (15).....	26
Equação (16).....	28
Equação (17).....	30
Equação (18).....	31
Equação (19).....	31
Equação (20).....	38
Equação (21).....	39
Equação (22).....	48

1. Introdução

1.1 Motivação

A principal motivação deste trabalho se encontrava no fato de tentar responder, dentre diversas hipóteses possíveis, a um problema prático que consistia na falha prematura de eixos empregados em usinas termelétricas. Este trabalho foi realizado baseado na possibilidade de a origem do problema residir na microestrutura do material empregado. Para que fosse possível investigar a questão e tentar propor solução alternativa ao que se acreditava ser um possível problema de material.

1.2 Considerações gerais

Componentes mecânicos e estruturais são submetidos a esforços quando em serviço que podem acarretar em alterações de ordem macroscópica e/ou microscópica.

Fatores como taxa de deformação, meio ambiente, microestrutura e temperatura podem estar associados a iniciação e propagação de trincas e, conseqüentemente, contribuir para abreviar a vida útil do componente.

A capacidade de definir condições nas quais trincas existentes em um componente estão em estágio de não propagação (ou limiar de propagação) é crítica para a estimativa da vida residual do componente e programação de ações que permitam estender sua vida em serviço, criando uma filosofia de projetos tolerantes ao dano (*Damage tolerant design*).

Entretanto, para a aplicação de tal filosofia, a determinação do limiar de propagação de trinca de fadiga, ΔK_{th} , torna-se uma ferramenta essencial permitindo o estabelecimento de um critério de carregamento sob o qual as trincas não crescerão significativamente durante as operações de serviço do componente, evitando assim futuras falhas catastróficas.

Para que haja propagação de trincas é necessário que existam condições favoráveis a isto. A presença de inclusões na microestrutura é uma delas, pois estas exercem forte influência sobre o metal, uma vez que sua matriz é interrompida. Isto significa dizer que elas atuam como concentradores de tensão e, conseqüentemente, podem fragilizar o material.

1.3 Objetivos

O objetivo deste trabalho foi realizar ensaios para levantamento do limiar de propagação de trincas de fadiga de materiais metálicos e, simultaneamente, fazer o acompanhamento visual do avanço da propagação destas a fim de levantar a parte inicial da curva da/dN versus ΔK de cada material.

Posteriormente, estudar a provável influência de inclusões presentes na microestrutura sobre o limiar de propagação de trincas de fadiga de aços estruturais. Para isso foram utilizados corpos de prova do tipo CT de materiais com composições químicas e propriedades mecânicas semelhantes.

Além disso, fazer análises microestruturais para que se pudesse determinar as características (tipo, morfologia, dimensão e quantidades) de possíveis inclusões presentes na frente de propagação das trincas.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Fadiga

2.1.1 Conceito

A palavra “fadiga” vem do latim *fatigare* que significa “cansar”. Apesar de estar associado a condições físicas e mentais em pessoas, a palavra “fadiga” também é usada em engenharia para determinar dano ou falha causada em materiais sob carregamento cíclico. [4]

Em 1972, a Sociedade Americana de Testes e Materiais (ASTM) definiu a fadiga como um processo progressivo e permanente de alteração localizada que ocorrem um material sujeito a condições que produzem tensão e deformação em um ou vários pontos, podendo culminar em trincas ou colapso do componente após número suficiente de ciclos.

O termo “falha progressiva” seria o mais preciso para descrever a ação dos carregamentos cíclicos aplicados ao componente ou material. Falhas oriundas do processo de fadiga ocorrem sob tensões inferiores a tensão máxima para a maioria dos materiais de engenharia, em alguns casos, inferiores a tensão de escoamento também.

A seguir, figura 1, um esquema básico do ciclo de fadiga e seus parâmetros relacionados.

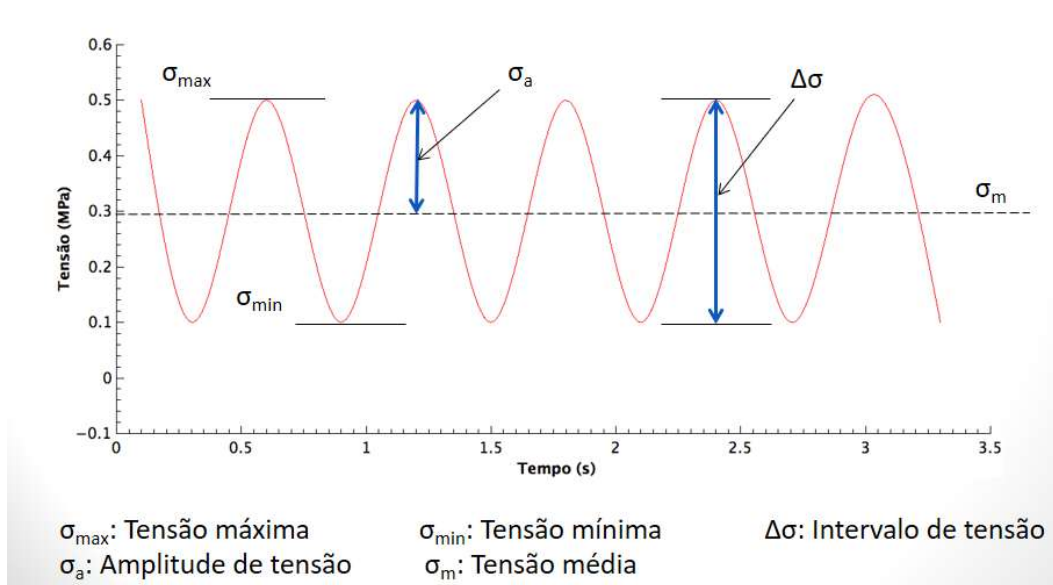


Figura 1- Ciclo de fadiga e parâmetros associados
 Fonte: <https://goo.gl/images/JH2UeF> acessado em 04 de maio de 2017.

Os parâmetros do ciclo de fadiga são calculados conforme equações a seguir:

Tensão média:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (1)$$

Amplitude de tensão:

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

Intervalo de tensão:

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (3)$$

Razão de tensão:

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (4)$$

Razão de amplitudes:

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \quad (5)$$

2.1.2 Filosofias de projeto

Alguns critérios e filosofias de projetos podem ser abordadas quando o conceito de vida em fadiga é posto em voga. São eles: Vida infinita, Vida finita, Falha segura, tolerante ao dano.

O escopo deste trabalho leva em conta a filosofia de projeto tolerante ao dano. Neste critério considera-se a pré-existência de uma trinca, desta forma, o projeto é executado de modo a evitar sua propagação ou crescimento evitando assim a falha prematura do componente.

2.2 Iniciação de trincas de fadiga

A iniciação de trincas de fadiga é um fenômeno diretamente ligado a escala de observação, sob a ótica da engenharia mecânica este fenômeno está ligado a detecção de um limiar para a nucleação de trincas.

Em quase sua totalidade, todas as partes da estrutura podem conter algum tipo de descontinuidades, estas variam da escala micro a macroscópica, podendo ser induzidas nos processos de fabricação ou de manufatura destas. Contorno de grão, alta porosidade, defeitos de solidificação, pontos de corrosão, inclusões, defeitos e distorções da estrutura cristalina oriunda de processo de conformação representam alguns elementos potenciais para a nucleação de trincas de fadiga (13).

Inclusões presentes na microestrutura agem como concentradores de tensão, uma vez que, localmente, intensificam o valor da tensão aplicada ao componente, além disso pode ocorrer plastificação localizada, o conjunto de fatores atuando pode fazer com que a peça se rompa de forma catastrófica mesmo se a tensão nominal que é aplicada esteja abaixo da tensão de escoamento do material em questão.

2.2.1 Modos de fratura macroscópicos

É importante compreender e examinar os distintos modos de fratura antes de examinar qualquer variação no campo de tensão e deformação de corpos.

O deslocamento da superfície de fratura pode ocorrer em três modos básicos, conforme apresentados no esquema da figura 2.

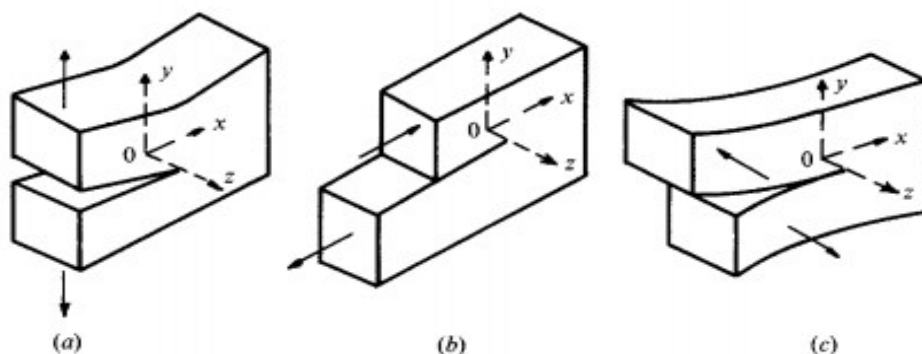


Figura 2 - Três modos básicos de fratura, sendo (a), (b) e (c) Modos I, II e III, respectivamente. Fonte: <https://goo.gl/images/7N26ps> Acessado em 02 de abril de 2017.

No modo I de carregamento, as faces da superfície de fratura são separadas em direção normal ao plano de propagação da trinca, o deslocamento das “paredes” é simétrico nos eixos xz e xy.

Já no Modo II as faces da superfície de fratura deslizam entre si no plano normal a frente da trinca, neste caso, o deslocamento das faces é simétrico no que diz respeito ao plano xy e antissimétrico em relação ao plano xz.

O Modo III de carregamento apresentam um deslizamento com características torcionais, no qual as faces das superfícies de fratura possuem deslizamento em plano paralelo ao da frente da trinca. Neste caso os deslocamentos são antissimétricos em relação a ambos os planos xz e xy.

Os corpos de provas utilizados neste estudo são do tipo CT no modo I de carregamento.

2.2.2 Caracterização do crescimento de trinca

A taxa de crescimento de uma trinca de fadiga de um corpo submetido tensão cíclica de amplitude constante é expressada em termos do incremento do tamanho da trinca por ciclo, da/dN . A partir de experimentos com aplicação de variação no tamanho de trincas por número de ciclos de fadiga foi possível obter diferentes valores de da/dN . Quando a variação de tensão aplicada é mantida constante, a taxa de crescimento da trinca de fadiga é aumentada com o incremento do número de ciclos. A figura 3 expressa esquematicamente uma curva típica de crescimento de trinca.

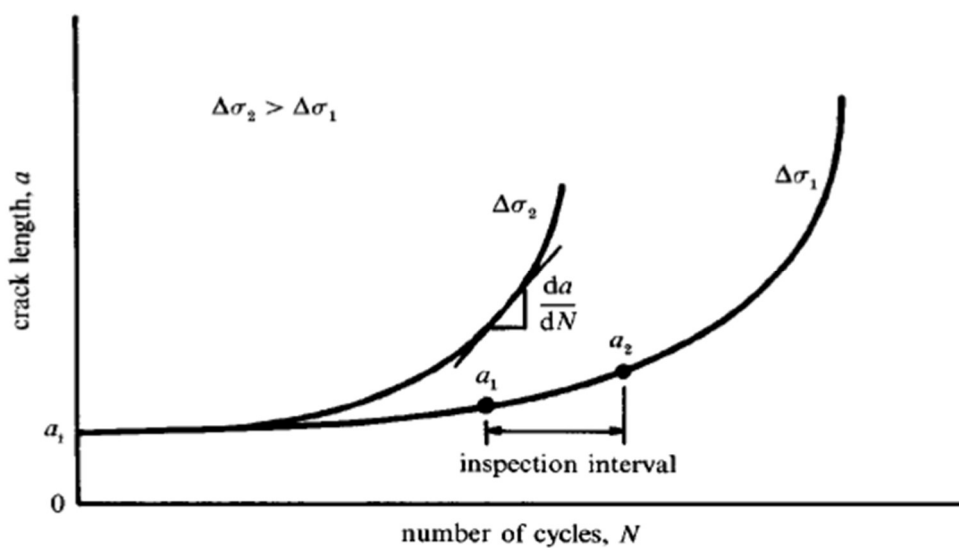


Figura 3 - Comportamento típico do crescimento de trinca em carregamento de fadiga com amplitude constante [Suresh]

Fonte:

2.2.3 Crescimento de trincas de fadiga em sólidos dúcteis

Um dos objetivos do projeto de vida em fadiga é desenvolver métodos confiáveis de caracterização da taxa do crescimento de trinca em termos de um parâmetro de carregamento apropriado que permita a quantificação da resistência intrínseca do material para diferentes combinações de tensões aplicadas, geometria da amostra e geometria da trinca. Quando tensões cíclicas aplicadas a um corpo são tão pequenas que a zona de deformação plástica a frente da ponta da trinca pode ser considerada apenas uma leve perturbação num campo “elástico” a MFLE se apresenta como solução para descrição do comportamento das trincas de fadiga.

A taxa de crescimento do tamanho da trinca, de acordo com a MFLE deve ser baseada na variação do fator intensificador de tensão:

$$\Delta K = K_{\text{máx}} - K_{\text{mín}} \quad (6)$$

Sendo, $K_{\text{máx}}$ e $K_{\text{mín}}$ valores máximos e mínimos do fator intensificador de tensão durante o ciclo de fadiga. A geometria do corpo deve ser levada em conta quando K é calculado. Para tanto, deve-se considerar sua influência usando um fator geométrico Y , o qual depende: do tamanho da trinca a , da largura do corpo de prova W e das tensões cíclicas máximas e mínimas aplicadas ao corpo de provas.

$$K_{\text{máx}} = Y \sigma_{\text{máx}} \sqrt{\pi a} \quad (7)$$

$$K_{\text{mín}} = Y \sigma_{\text{mín}} \sqrt{\pi a} \quad (8)$$

$$\Delta \sigma = \sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{mín}} \quad (9)$$

$$\Delta K = Y \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (10)$$

Paris, Gomez & Anderson (1961) e Paris & Erdogan (1963) mostraram que o incremento do crescimento da trinca (da/dN) está relacionado a variação do fator intensificador de tensão, dado por:

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m \quad (11)$$

Onde C e m são constantes que dependem da microestrutura do material, meio ambiente, temperatura. Já a taxa de carregamento R é definida por:

$$R = \frac{\sigma_{\text{mín}}}{\sigma_{\text{máx}}} = \frac{K_{\text{mín}}}{K_{\text{máx}}} \quad (12)$$

O expoente m da equação 11 está entre 2 e 4 para metais dúcteis. A equação 3 é aplicada para carregamento de modo único, distante do campo de tensões resultante para um valor fixo de R . Em termos de vida em fadiga, ΔK refere-se à variação do fator intensificador de tensão no Modo I durante o ciclo de fadiga. De forma

análoga, um intervalo do fator intensificador de tensão ΔK_{II} e ΔK_{III} , podem ser usados para caracterizar o crescimento da trinca de fadiga nos modos II e III, respectivamente.

A caracterização do crescimento de trinca utilizando na equação 6 só é válida para condições ambientais estáveis. Contudo, no caso de haver mudança destas, incluindo variação de temperatura, parâmetros de carregamento, tais como, como a frequência e tipo de onda, espera-se que haja forte influência na taxa de crescimento das trincas. Mudanças em condições de teste afetam as constantes C e m.

Tendo fixos os parâmetros citados anteriormente, espera-se que a influência do crescimento da trinca seja dada por ΔK e pela taxa de carregamento R. Isto é, as condições mecânicas gerais que governam o crescimento das trincas de fadiga são caracterizadas por dois parâmetros, ΔK e R, ou equivalentes, ΔK e ΔK_{max} , para amplitude constante porque:

$$K_{max} = \frac{\Delta K}{(1-R)} \quad (13)$$

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K, R) = g(\Delta K, K_{max}) \quad (14)$$

Onde f e g são que determinam os valores numéricos de C e m na equação 11.

2.2.4. Diferentes estágios de crescimento de trinca de fadiga

A relação de Paris que mostra variação linear do $\log da/dN$ com o $\log \Delta K$ corresponde a apenas a descrição de uma parte do processo de abertura da trinca de fadiga, regime de propagação estável. Em valores extremos de ΔK tanto antes quanto depois deste existe uma variação muito díspar nas taxas de crescimento da trinca com o aumento do ΔK . Para a maioria dos aços utilizados em serviço o comportamento das regiões fora do regime de propagação estável exibem variação sigmoide, ou curva S. A figura 4 mostra esquematicamente 3 regimes distintos do ciclo de crescimento de uma trinca.

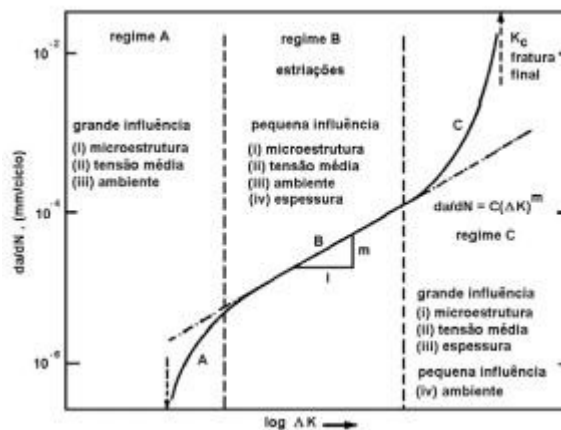


Figura 4 - Esquemas dos regimes de propagação de uma trinca de fadiga
 Fonte: <https://goo.gl/images/N3Z2D7> acessado em 18 de março.

No esquema mostrado na figura 4 podem ser identificados 3 regimes, A, B e C. O primeiro está associado à existência de uma faixa de fator de intensidade de tensão limiar ΔK_{th} no qual abaixo deste, as trinca permanecem latentes ou crescem a taxas indetectáveis. Acima desde limiar, há um aumento acentuado dos valores de da/dN com ΔK . O regime B, conhecido como regime de Paris, ou regime estável de propagação, exibe uma variação linear de $\log da / dN$ com $\log \Delta K$. O regime C refere-se à gama de valores elevados de ΔK , onde as taxas de crescimento da trinca aumentam rapidamente causando falha catastrófica.

Em materias de engenharia, aços dúcteis neste caso, o máximo valor intensificado de tensão relacionado ao limiar de propagação de fadiga, equação 9, corresponde a uma pequena fração do valor correspondente ao valor de tenacidade a fratura do material K_{IC} .

$$K_{m\acute{a}x} = \Delta K_0 / (1-R) \quad (15)$$

2.3 Limiar de propagação de trinca de fadiga

A propagação da trinca de fadiga no regime A lida primariamente com processos de falhas não contínuos, nos quais o incremento médio no comprimento da trinca é menor que 10^{-6} mm por ciclo. Já o limiar de propagação de trinca de fadiga atua com o incremento menor que 10^{-9} mm por ciclo. Existem 4 períodos característicos de vida em fadiga e 3 estágios de propagação de trinca.

Os quatro períodos são:

- Iniciação,
- Estágio I
- Estágio II
- Estágio III

Os estágios de propagação das trincas de fadiga são definidos em termos da segunda derivada do logaritmo da taxa *versus* o logaritmo da variação do fator intensificador de tensão. No estágio I, a região do limiar de propagação, este valor é negativo, no estágio II é zero e positivo no estágio III. A figura 5 ilustra todos os 3 estágios da propagação de uma trinca de fadiga e indica onde se encontra o limiar de propagação de trinca de fadiga ΔK_{th} .

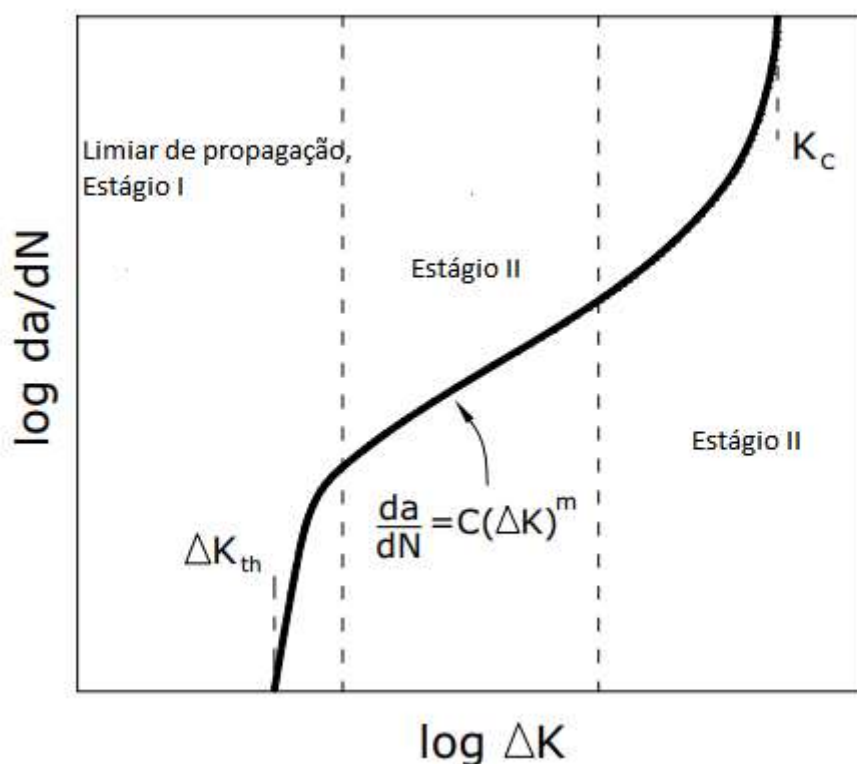


Figura 5 - Comportamento típico da propagação de trinca por fadiga em metais (adaptado de https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/94421/oliveira_lg_me_guara.pdf?sequence=1 acessado em 09 de julho de 2017)

O limiar de propagação é comumente apresentado como um valor alternativo do fator intensificador de tensão, ΔK_0 , sob condições específicas de taxas de tensão e outras circunstâncias. Para muitos materiais, esses valores não são absolutos no

sentido de que a iniciação ou taxas de crescimento caem a zero. Se uma trinca deixar de ter seu crescimento perceptível em 10.000.000 de ciclos, um fator intensificador de tensões alternativos é considerado como um limiar de fadiga operacional. Este limiar pode ser definido como taxa de crescimento de trinca de 10^{-11} m por ciclo [4]. O comprimento deste crescimento é inferior ao espaçamento de em uma rede cristalina em 10 ciclos.

No limiar de propagação, a plasticidade a frente da trinca é limitada devido à ausência de sobretensão ou sobrecarregamentos, por isso, a MFLE é a ferramenta escolhida para descrever o limiar da propagação de trincas.

A MFLE não é a única alternativa, no entanto, segundo Suresh, permanece a mais eficiente para a caracterização da taxa de crescimento de trincas de fadiga longas em termos de da/dN .

Na MFLE, a taxa de crescimento de trinca de fadiga é uma função do fator intensificados de tensão aplicado $\Delta K = K_{\text{máx}} - K_{\text{mín}}$. Onde M_{ax} e M_{in} são, respectivamente, as tensões máximas e mínimas no ciclo de carregamento. Na extremidade inferior do regime de Paris, a taxa de propagação de trinca é frequentemente aproximada por uma relação “limiarizada”, esta forma foi introduzida por Elber.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K - \Delta K_{th})^n \quad (16)$$

Onde:

a é o tamanho da trinca

N é o número de ciclos

ΔK_{th} é a variação do fator de intensificação limiar

C e n são constantes

No estágio limiar de propagação, as taxas de crescimento variam entre 10^{-10} a 10^{-9} metros por ciclo. O limiar expresso na equação (10) não é uma assíntota vertical ao limite inferior da curva na figura 5, mas uma constante de correlação

originalmente associada ao conceito de “*crack closure*”. A taxa de carregamento, $R = K_{\min}/K_{\max}$, a microestrutura e o ambiente influenciam a taxa de crescimento da trinca e o ΔK_{th} .

2.3.1 Limiares de iniciação

Os primeiros estudos sobre fadiga concentravam-se na falha de um componente após um número de ciclos de carregamentos. Os primeiros trabalhos, cuja contribuição mais relevante neste âmbito foi a de Wöhler, não consideravam crescimento de trinca como um evento isolado, apenas contava-se o número de ciclos necessários para a falha do componente em função da condição de carregamento.

Em linhas gerais, isto significava que o elemento era considerado livre de trincas por uma parte de sua vida útil. Este tempo foi nomeado “período de iniciação”. A parte da vida onde ocorria a propagação era relativamente curta e poderia ser desprezada.

Posteriormente, Soderberg, depois de Gerber e Goodman, estudou os efeitos da vida média de fadiga e desenvolveu o diagrama “Haigh-Soderberg” para vida infinita de fadiga ou para o limiar de fadiga.

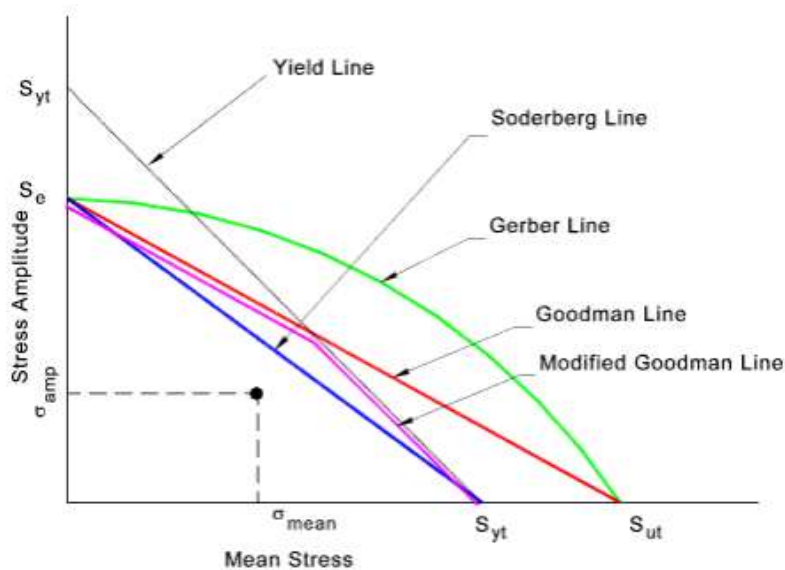


Figura 6 - Diagrama de Haigh

Fonte: <https://goo.gl/images/giSCgF> acessado em 02 de fevereiro de 2017.

No gráfico da figura 6 são plotadas curvas cujos eixos representam amplitude da tensão aplicada *versus* tensão média.

Pontos abaixo da curva apropriada representam condições nas quais falhas de fadiga não ocorrerão.

Linha de Soderberg:

Se o ponto de tensões combinadas está abaixo da linha de Soderberg, o componente não irá falhar. Este é um modelo conservador baseado na tensão de escoamento do material. Para estabelecer o fator de segurança neste critério temos:

$$\frac{K_f \sigma_{amp}}{S_e} + \frac{\sigma_{mean}}{S_{yt}} = \frac{1}{N_f} \quad (17)$$

Linha de Goodman/Linha de Goodman modificada:

Se o ponto de tensões combinadas está abaixo da linha Goodman/linha de Goodman modificada, o componente não irá falhar. Este é um modelo menos conservador

baseado na tensão última do material. Para estabelecer o fator de segurança neste critério temos:

$$\frac{K_f \sigma_{amp}}{S_e} + \frac{\sigma_{mean}}{S_{ut}} = \frac{1}{N_f} \quad (18)$$

Parábola de Gerber

Dentre os modelos citados, este é o menos conservador e para determinação do fator de segurança baseado neste critério temos:

$$\frac{N_f K_f \sigma_{amp}}{S_e} + \left(\frac{N_f \sigma_{mean}}{S_{ut}} \right)^2 = 1 \quad (19)$$

Onde:

S_e = Amplitude de tensão em N ciclos até a falha com aplicação de carregamentos completamente reversos

S_{ut} = Tensão última

S_{yt} = Tensão de escoamento

N_f = Fator de Segurança aplicado ao critério correspondente

O gráfico da figura 6 foi plotado em termos de tensão média. Esta aumenta com a taxa de tensão, R, do mínimo ao máximo aplicado a cada ciclo. A condição $R=-1$, define tensões de carregamentos completamente reversas, figura 7, nos quais a tensão média é zero.

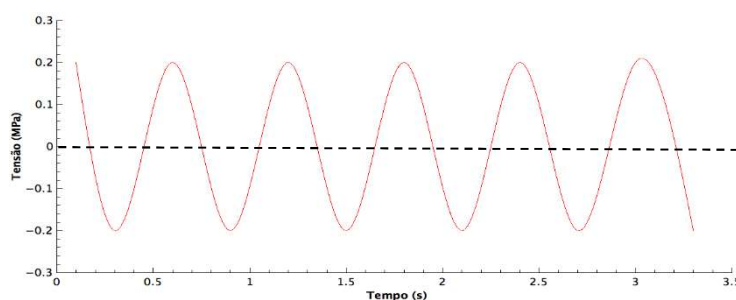


Figura 7 - Carregamento completamente reverso
Fonte: <http://slideplayer.com.br/slide/10732760/> acessado em 04 de maio de 2017.

Para aço o limite de fadiga é, normalmente, em torno de 35% ou mais da tensão última. Se a amplitude de tensão aplicada for igual ao limite de fadiga (em $R = -1$), a amplitude de tensão permitida dada pelo diagrama Haigh vai p zero em menos de $R = 0,5$. As relações tipo Goodman-Gerber são de origem empírica, baseiam-se no pressuposto de que algum tipo de curva suave deve conectar os limites de tensão alternada e carga estática.

A iniciação de fadiga de fadiga foi mais detalhadamente estudada em termos de bandas de deslizamento persistentes, *persistant slip bands*, em todos os casos, um processo microestrutural converte uma tensão aplicada no componente a uma tensão local através do processo de deformação plástica localizada.

Uma vez iniciada uma trinca, em sua ponta é criada uma região de deformação plástica que é reiniciada a cada avanço. O limite de fadiga está, desta forma, relacionado a capacidade do material de resistir a deformação local e, finalmente, a sua resistência à plasticidade.

2.3.2 Influência do tamanho de grão

A microestrutura tem forte influência em limites de fadiga. Dentre os efeitos mais estudados estão o tamanho de grão. Devido a relação de Hall-Petch, que estabelece a tensão de escoamento como inversamente proporcional a raiz quadrada do tamanho de grão, não se pode separar os efeitos de tamanho de grão da tensão de escoamento.

O refinamento de grão é uma das técnicas utilizadas que visam aumentar os limites de fadiga. Vários estudos reportam o aparecimento de pequenas trincas no contorno de grão.

A taxa de crescimento de grão de pequenas trincas no contorno de grão foi estudada por Taira et al. [30] que notou valores mínimos quanto o tamanho da zona plástica correspondia ao tamanho do grão. O que remete ao conceito de bloqueio de bandas de deslizamento.

Este modelo estabelece que a transferência da banda deslizante de um grão para o próximo controlaria a taxa de propagação.

2.3.3 Influência de tensões residuais

Tensões residuais constituem outra classe de mecanismos que alteram o comportamento dos limiares de propagação. O fenômeno está relacionado a subtensões, principalmente no primeiro ciclo, de forma análoga a sobretensões (ou sobre carregamentos) podem resultar em zonas de compressão a frente da ponta da trinca.

2.4 Inclusões

Inclusões são partículas que interrompem a matriz metálica e nelas ficam dispersas. Podem ser classificadas quanto a origem, composição e propósito.

2.4.1 Classificação

De acordo com a classificação tradicional, inclusões podem ser classificadas como endógenas ou exógenas. As primeiras, são formadas por precipitação ainda na fase líquida devido ao decréscimo de solubilidade das espécies químicas contidas no aço. Esta classe de inclusões não metálicas não pode ser completamente retirada da matriz do aço, no entanto, sua fração volumétrica e tamanho médio devem ser rigorosamente controladas a fim de evitar maiores danos ao material.

Inclusões exógenas são, como o nome implica, de origem externa, resultantes de erosão mecânica do refratário do forno ou material do molde, de reações químicas paredes forno-metal ou metal-escória e entrada de escória juntamente com o material.

2.4.2 Composição química

São classificadas em metálicas e não metálicas. Inclusões não-metálicas podem ser classificadas em:

- Óxidos
- Sulfetos
- Nitretos
- Carbonetos

2.4.3 Efeitos prejudiciais de inclusões não metálicas

As inclusões não metálicas residuais podem causar perda de qualidade do produto gerando defeitos de superfície e deteriorando as propriedades finais do produto. Em geral, as inclusões, como Al_2O_3 , são prejudiciais para as propriedades mecânicas do aço, reduzindo a ductilidade, resistência à fadiga e aumentando o risco de falha de corrosão do produto final durante a sua aplicação.

A matriz do metal pode ser severamente prejudicada em várias situações, a seguir 2 possibilidades que estão diretamente ligadas as inclusões não metálicas:

- 1) Elementos entalhados que podem ampliar o campo de tensões ao redor de inclusões não metálicas
- 2) Geração de tensão residual ao redor das fases não metálicas presentes na matriz do aço devido ao diferente coeficiente de dilatação térmica.

A situação descrita no item 1 está associada ao processo de formação de trincas cujo processo de nucleação pode ser iniciado ao redor das fases não metálicas presentes no aço.

O item 2 traz luz a um problema intrínseco aos elementos, o gradiente de dilatação, à exceção dos óxidos de cálcio e magnésio, óxidos, silicatos e aluminatos têm coeficiente de dilatação térmica inferior ao de uma matriz metálica, já os sulfetos apresentam comportamento oposto. Isto torna-se prejudicial ao componente devido ao incremento de tensões gerado nas interfaces entre as inclusões e a matriz metálica, pois a partir dali trincas de fadiga tendem a nuclear.

O tamanho e forma das inclusões não metálicas também devem ser levados em conta, quanto maior seu volume ocupado maior sua influência negativa sobre a matriz. Desta forma, é necessário que a fração volumétrica e tamanho das inclusões sejam rigorosamente controlados a fim de mitigar a extensão do potencial dano.

Em suma, diversos experimentos práticos realizados com os aços considerados neste trabalho, corroboram o que está consolidado na literatura, o aumento não controlado da fração volumétrica de inclusões reduz a dureza dos aços 4140 e 4340.

3. Materiais e Métodos

3.1 Caracterização dos materiais

Corpos de prova foram usinados a partir do eixo roto, e outros de materiais selecionados (SAE 4140 e 4340) foram utilizados como base para o estudo de caso. Os últimos foram obtidos de um fornecedor de materiais metálicos, portanto, foram compradas barras redondas de SAE 4140 e 4340, ambas de 150mm de comprimento e com diâmetros de 4 ¾ e 5 polegadas, respectivamente, para a usinagem de corpos de prova de tração e corpos de prova do tipo CT.

A seleção de materiais foi feita visando a garantia das propriedades mecânicas e componentes químicos semelhantes para que, desta forma, pudessem ser utilizados em serviço com a mesma finalidade do material de referência.

A família de aços SAE 41xx e 43xx se mostraram as escolhas naturais neste sentido, uma vez que suas composições químicas são similares à do material de referência.

3.1.1 Composição química

Para análise do tipo de aço estrutural da amostra do material DIN 42CrMo4, houve a necessidade de realizar análises químicas e determinar sua composição.

Após a compra das amostras de SAE 4140 e SAE 4340, houve a necessidade de validar a composição química do material comprado.

A composição química das amostras foi determinada por meio do procedimento MTC: PO-301 com base na norma ASTM A751, ed 2014a pelo laboratório *Materials Test Center* Ltda.

3.1.2 Tratamento térmico

Os tratamentos térmicos têmpera e revenimento foram realizados para que todas as amostras tivessem dureza similares ao material de referência.

De acordo com os certificados fornecidos por Tupaíba Ferro e Aço Eireli emitido pela Gerdau, a amostra de aço SAE 4140 possuía dureza 185HB, já a amostra de aço SAE 4340 emitido pela Arcelormittal possuía dureza de 250 HB.

O material de referência, DIN 42CrMo4, possuía dureza média de 260HB, por isso, seria necessário realizar tratamentos térmicos nas amostras compradas a fim de elevar a dureza dos materiais comprados.

Devido a indisponibilidade dos laboratórios, não foi possível fazer o tratamento térmico nas instalações da PUC-Rio, por isso, ele foi realizado em laboratório externo certificado conforme requisitos da norma ISO9001:2008.

Ambos os aços SAE 4140 e SAE 4340 foram temperados a 870°C e resfriados em óleo e, em seguida, revenidos a 650°C.

3.1.3 Ensaios Mecânicos

3.1.3.1 Ensaio de Tração

Corpos de prova de tração de todos os materiais foram submetidos a ensaios para determinação de suas propriedades mecânicas, com base na norma ASTM E8M. Na figura 8 encontra-se, esquematizadas a geometria utilizada nos corpos de prova dos aços utilizados e na tabela 1 suas respectivas informações.

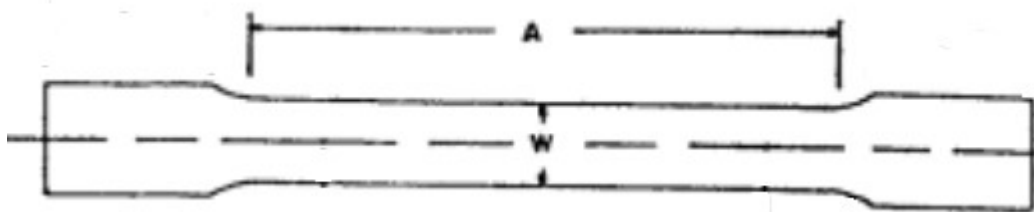


Figura 8 - Esquema da geometria dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração
 Fonte: Adaptado de ASTM. **ASTM E8M - 16a: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Material**, ASTM International, West Conshohocken, 2016.

Tabela 1 - Informações da geometria dos corpos de prova para ensaio de tração

Identificação	Material	Diâmetro medido (mm)	Comprimento útil (mm)
CP1	SAE 4140	5,95	45
CP2	SAE4140	5,95	45
CP3	SAE 4140	6	45
CP1	SAE 4340	6	45
CP2	SAE4340	6	45
CP3	SAE 4340	6	45
CP1	DIN 42CrMo4	6	36
CP2	DIN 42CrMo4	6	36
CP3	DIN 42CrMo4	6	36

Os corpos de prova foram marcados em pontos equidistantes da região útil, na qual também foi acoplado um *clip gauge* com capacidade de abertura de 25mm. As extremidades dos corpos de prova foram presas por garras a máquina para realização do ensaio.

A máquina Instron (5500R, número de série 6233), com capacidade para 10 toneladas foi utilizada para realização dos ensaios, ver figura 9. Os resultados destes para cada um dos materiais estão no item 4.3.

Para o cálculo do percentual de redução de área, foi utilizada a seguinte equação:

$$\frac{A_i - A_f}{A_i} \times 100\% \quad (20)$$

Onde:

A_i -Corresponde a área da seção transversal útil inicial.

A_f -Corresponde a área da seção transversal útil final.

Para o cálculo do percentual de alongamento, foi utilizada a seguinte equação:

$$\frac{L_f - L_i}{L_i} \times 100\% \quad (21)$$

L_f -Corresponde ao comprimento longitudinal inicial.

L_i - Corresponde ao comprimento longitudinal final.



Figura 9 - Ensaio de tração

3.1.3.1 Propagação de trinca

Foram realizados ensaios de propagação de trinca, para isso, corpos de prova do tipo CT, figura 10, foram utilizados.



Figura 10 - Corpo de prova tipo CT

Os corpos de prova foram padronizados e a geometria se encontra na tabela 2.

Tabela 2 - Geometria do corpo de prova

	Mm	M
W	50	0,05
B	12,50	0,0125
A0	9,72	0,009718
$B(W^{1/2})$	88,39	0,002795

Após a usinagem dos corpos de prova, havia a necessidade de eliminar as marcas do processo para que fosse possível fazer acompanhamento visual do crescimento da trinca. Para isso, os corpos de prova foram lixados manualmente com lixas d'água (Norton) das seguintes granulometrias: 100, 220, 340, 600, 800 e 1200.

Em seguida foram polidas nas politrizes metalográficas DPU 10 (Struers), e Aropol VV-PU (Arotec), figura 11, com panos metalográficos de tecido sintéticos, sequencialmente foram utilizadas pastas de diamante com granulometria de 6, 3, 1 μm .

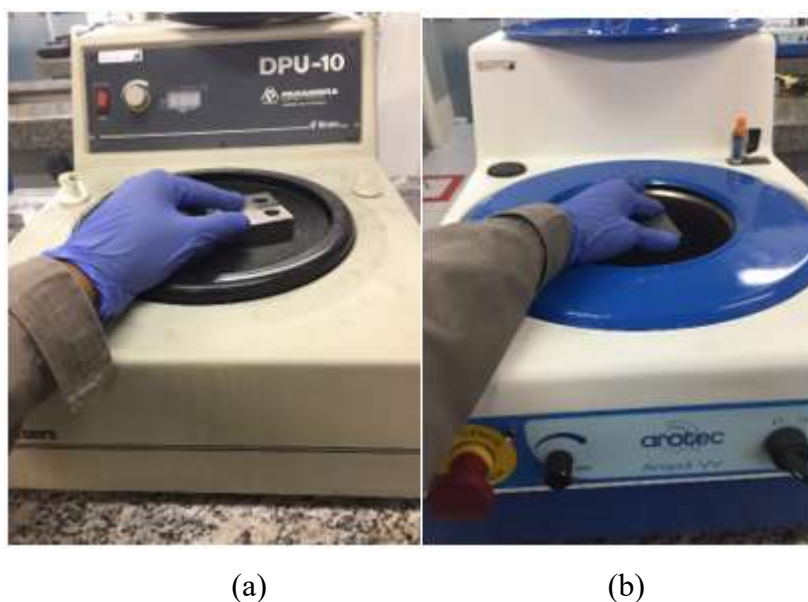


Figura 11 - Polimento das amostras: (a) Politriz DPU-10 com abrasivo de 6 μm (b) Politriz Aropol VV com abrasivo de 1 μm .

Após o preparo das amostras, utilizou-se uma máquina servo-hidráulica, figura 12, Instron, (modelo 8502 de capacidade de 100kN, número de série H179) para a realização do ensaio de propagação de trinca. Os resultados encontram-se no item 4.3.2.



Figura 12 - Máquina Servo-hidráulica

Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaaios Mecânicos (LEM) da PUC-Rio, a temperatura ambiente. A preparação das amostras foi realizada também a temperatura ambiente no Laboratório de Metalografia e Tratamentos térmicos da PUC-Rio.

Os ensaios realizados foram baseados na norma ASTM E647, esta possui procedimentos específicos que estão descritos no item 3.1.3.2.

3.1.3.2 Resumo do método

A proposta da norma tem por finalidade de estabelecer a influência do crescimento da trinca de fadiga na vida de componentes sujeitos a carregamentos cíclicos cuja representatividade dos dados sob condições controladas e com a devida combinação de dados de tenacidade a fratura servem de análise para caracterização de defeitos e análise tensão e deformação.

Além disso, pode ser usado para auxiliar a escolha do método de seleção de materiais e critérios de inspeção para abordagens tolerantes ao dano.

Por fim, serve para estabelecer em termos quantitativos os efeitos individuais e combinados de fatores ambientais, fabricação, metalúrgicos e variáveis de carregamento no crescimento de trincas de fadiga.

O método descrito na norma ASTM E 647 envolve o carregamento cíclico de um corpo de provas que sofreu pré-trinca de fadiga. O tamanho da trinca é medido tanto visualmente quanto por método equivalente que, por exemplo, estabeleça a taxa de crescimento do tamanho da trinca. Esta é expressa em função do intervalo do fator intensificador de tensão, ΔK , que é calculado de expressões baseadas na MFLE, conforme descrito ao longo deste trabalho.

A taxa de crescimento de uma trinca é expressa como função do fator intensificador de tensão atuante na ponta da trinca, da/dN versus ΔK , isto visa caracterizar a resistência intrínseca do material de resistir a propagação de uma trinca estável sob carregamento cíclico.

Fatores externos como temperatura e o meio ambiente o qual a amostra está submetida afetam diretamente os resultados dos valores obtidos, portanto, a reprodutibilidade das condições de ensaio é de fundamental importância para a legitimidade e validade dos resultados.

Os resultados de da/dN em função de ΔK são independentes da geometria planar, isto permite que haja comparação de dados obtidos de diferentes tipos de corpos de prova e condições de carregamento, além disso, permite que seus resultados sejam levados em conta no desenho e avaliação de estruturas de engenharia.

Dados de taxa de crescimento de trinca não são sempre independentes da geometria, em seu sentido estrito, uma vez que a efeitos de espessura podem ocorrer. Além disso, estes efeitos podem interagir com outras variáveis externas ao corpo de provas (temperatura e meio ambiente). Alguns materiais podem exibir os efeitos

da espessura na região final da curva da/dN, o que pode estar relacionado ao escoamento do material ou ao fato de o material ter atingido o K máximo, valor de tenacidade a fratura do material. Portanto, a influência da espessura do corpo de provas deve ser levada em consideração no que diz respeito a produção de dados para pesquisas ou desenho de produto.

A predição, medição e acompanhamento do crescimento de trincas de fadiga podem ser influenciados pela presença de campos de tensões residuais provenientes de, por exemplo, soldagem, extrusão, etc. Desta forma, amostras retiradas dos materiais que contenham tensões residuais podem também possuir presença deles, no entanto, é possível que apenas a retirada da amostra promova o alívio de tensões e a redistribuição das mesmas. Contudo, a magnitude do campo de tensões residuais remanescente pode ainda ser capaz de promover alterações significativas no resultado da obtenção do fator limitador de propagação de trincas de fadiga.

3.1.3.3 Procedimento

Para que o procedimento do teste seja realizado é necessário que as condições ambientais e físicas estejam de acordo com os padrões descritos na norma que rege o procedimento.

As tolerâncias do corpo de prova padrão do tipo C(T) estão explicitadas na figura 14 de acordo com a norma vigente.

O pré-trincamento da amostra é de fundamental importância, uma vez que sua finalidade é produzir uma trinca com a ponta “afiada” de tamanho adequado para que o efeito do entalhe usinado seja eliminado, bem como os efeitos subsequentes causados na frente da ponta da trinca devido a mudança da forma da frente de propagação e o histórico de pré-carregamentos.

O K máximo do pré-trincamento não deve exceder o $K_{\text{máx}}$ esperado como resultado do teste.

A distribuição da força que o equipamento aplica deve ser feita de forma que no entalhe seja aplicada de forma simétrica.

Ao usar o procedimento de força-amplitude constante, é preferível que cada amostra seja testada em uma faixa de força constante (ΔP) e um conjunto fixo de variáveis de carga (taxa de tensão e frequência).

Quando as variáveis de carregamento são alteradas durante um teste, problemas potenciais de ordem transiente podem surgir.

Se o intervalo de força deve ser variado de forma incremental, deve ser feito de modo que $P_{\text{máx}}$ seja aumentado em vez de diminuído para impedir o atraso nas taxas de crescimento causadas por efeitos de sobrecarga; o retardo é um efeito mais pronunciado do que o crescimento de trinca acelerado associado ao aumento incremental na $P_{\text{máx}}$.

As taxas de crescimento transitório também são conhecidas por mudanças em P_{min} ou R . Deve ser permitida uma extensão de trinca suficiente após mudanças de força para permitir que a taxa de crescimento estabeleça um valor de estado estacionário.

A quantidade de crescimento de trincas requerida depende da magnitude da mudança de força e do material. Um aumento incremental de 10% ou menos minimizará essas taxas de crescimento transiente.

3.1.3.3 Equipamentos, configuração da amostra, tamanho e preparação

As configurações dos equipamentos de teste devem ser perfeitamente alinhadas e uma vez que o desalinhamento das garras ou afrouxamento dos pinos de carregamento podem resultar em assimetria de trincas, o que é crítico em caso de ensaios para determinação de limiar de propagação de fadiga, pois é possível que incorra em geração de dados inválidos.

Em caso de detecção de trincas assimétricas, o uso de *strain gauge* é uma solução que permite identificar e corrigir os parâmetros físicos do ensaio.

As amostras *standard* devem ser preparadas e o entalhe destas deve seguir o esquema da figura 13.

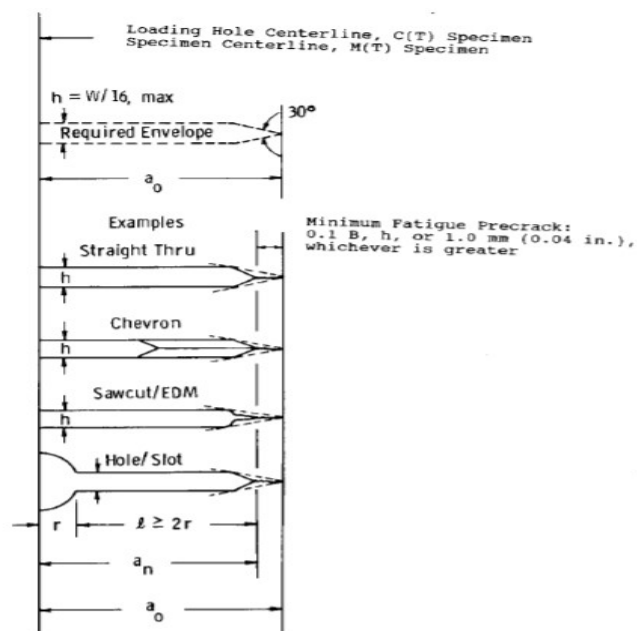
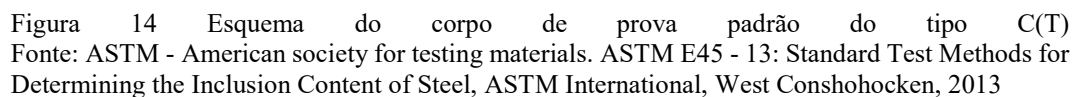


Figura 13 Detalhes do Entalhe e pré-requisitos mínimos de pré-trincamento
Fonte: ASTM - American society for testing materials. ASTM E45 - 13: Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel, ASTM International, West Conshohocken, 2013

De acordo com a norma as especificações do corpo de prova tido C(T) devem seguir o esquema descrito na figura 14.



Os critérios de seleção do formato dos corpos de provas mitigam os efeitos de curvatura ou outras irregularidades a frente da ponta da trinca que poderiam influenciar nos cálculos de da/dN e ΔK .

Com objetivo de verificar a superfície trincada e medir o tamanho médio da trinca resultante do ensaio, foi utilizado o microscópio Stereo Zeiss Discovery V8, figura 15.

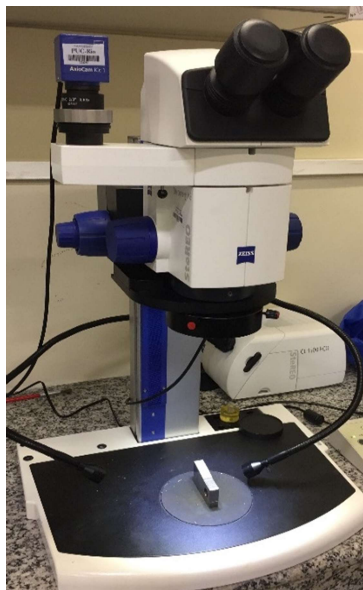


Figura 15 - Visualização da superfície de fratura em microscópio

Para isso, foi necessário fraturar os corpos de prova em nitrogênio líquido (figura 16), a fim de possibilitar a visão completa da região.

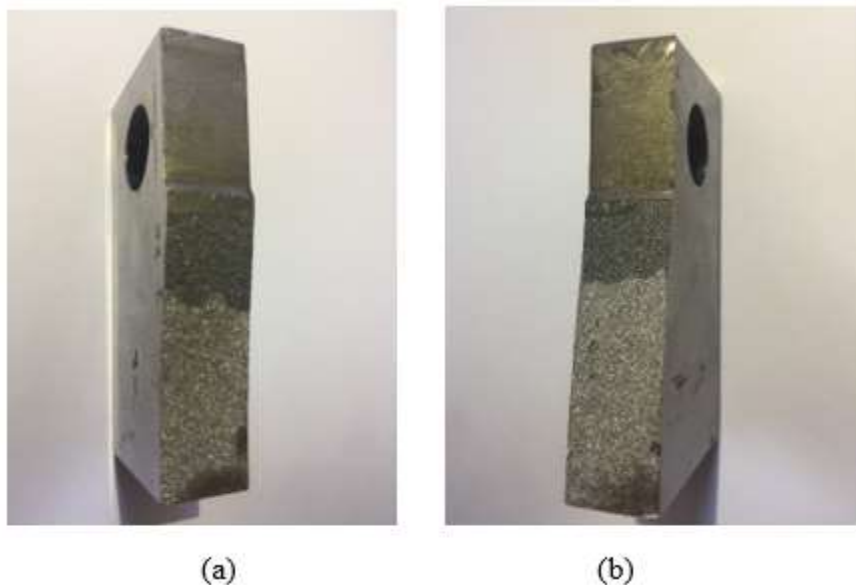


Figura 16 - Corpos de prova tipo CT extraídos do material DIN 42CrMo4 fraturados em nitrogênio líquido: (a) Metade do corpo de prova A (b) Metade do corpo de prova B

Posteriormente, para que fosse possível investigar a presença de inclusões no perfil do caminho de propagação da trinca, houve a necessidade de preparar as amostras. Uma das metades de cada corpo de prova do material DIN 42CrMo4 fraturado foi cortado, embutido em resina, lixado e polido, figura 17, para ser

analisado em microscópio Olympus, (modelo BX 60M). A superfície foi analisada sem ataque químico, uma vez que este impede a visualização de inclusões.

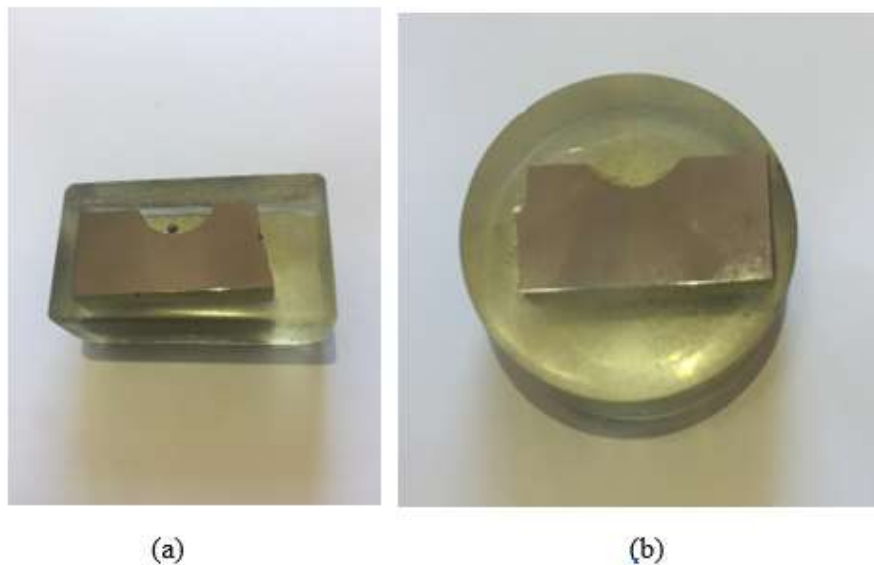


Figura 17 - Corpos de prova do material DIN 42CrMo4 cortados e embutidos em resina para análise metalográfica (a) Corpo de prova A (b) Corpo de prova B



Figura 18 - Microscópio Olympus BX60M para realização de metalografia qualitativa

As imagens microscópicas dos perfis foram feitas no Laboratório do Núcleo de Análises de Materiais e Produtos da PUC-Rio a temperatura ambiente.

4. Resultados e discussões

4.1 Composição Química

A seguir, as tabelas 3, 4 e 5 mostram, respectivamente, os resultados das análises químicas.

Tabela 3 - Composição Química do material de referência do eixo virabrequim (DIN 42CrMo4)

Elemento	(%)
C	0,383
Si	0,093
Mn	0,769
P	0,0073
S	0,039
Cr	1,07
Ni	0,72
Mo	0,290
Cu	0,116
Co	0,013
Ti	0,0013
Fe	96,4

Tabela 4 - Composição Química do material extraído de barra redonda Gerdau 4140

Elemento	(%)
C	0,424
Si	0,255
Mn	0,86
P	0,019
S	0,014
Cr	1,06
Ni	0,043
Mo	0,172
Al	0,019
Cu	0,010
Co	0,0025
Ti	0,0015
Fe	97,1

Tabela 5 - Composição Química do material extraído de barra redonda Arcelor Mittal 4340

Elemento	(%)
C	0,417
Si	0,226
Mn	0,64
P	0,020
S	0,018
Cr	0,75
Ni	1,26
Mo	0,207
Al	0,0084
Cu	0,160
Co	0,021
Ti	0,0014
Fe	96,2

As análises químicas mostraram que o material fornecido como referência correspondia ao DIN 42CrMo4 ou seu equivalente AISI-SAE 4140.

Em relação aos aços comprados como 4140 e 4340, ambos apresentaram resultado esperado e se enquadravam de acordo com a composição química esperada de acordo com a literatura.

4.2 Tratamento térmico

Tratamento térmico pode ser definido, de forma resumida, como o aquecimento ou resfriamento controlado do material a fim de alterar suas propriedades físicas e mecânicas sem alterar a forma do produto final.

A possibilidade e relativa facilidade de mudar as propriedades mecânicas do material faz dos aços um importante aliado para uso estrutural. Submete-los a tratamento térmico controlado possibilita o fenômeno citado. Para aços carbono sem liga, por exemplo, a dureza pode ser aumentada em até 500% apenas alterando a taxa de resfriamento.

Após tratamento térmico, os aços SAE 414 e SAE 4340 passaram a ter as seguintes durezas:

Tabela 6 - Dureza média dos materiais após tratamento térmico

Material	Dureza (HB)
SAE 4140	262
SAE 4340	277

Considerando a dureza média do material de referência de 270HB, foi constatado que os materiais utilizados para fins de comparação se provaram uma acertada escolha uma vez que suas durezas diferiam do padrão em menos de 5%. Isto serviu para, em termos de dureza, ajudar a corroborar a seleção das espécies.

4.3 Ensaios Mecânicos

Os resultados dos ensaios de tração foram realizados após submeter os cilindros, adquiridos de um fornecedor externo, aos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento.

Os ensaios tiveram como resultado a comprovação da eficácia do tratamento térmico e corroboração na escolha da seleção de materiais.

Os valores numéricos obtidos, tração e propagação de trinca, encontram-se nos itens 4.3.1 e 4.3.2, respectivamente.

4.3.1 Ensaio de tração

SAE 4140

Tabela 7 - Tensões Resultantes do Ensaio de tração do aço SAE4140

Material	σ_Y (MPa)	σ_U (MPa)
CP1	591	808
CP2	602	806
CP3	570	792
Média	587	802

Tabela 8 - Alongamentos Resultantes do Ensaio de tração do aço SAE4140

Material	L_i (mm)	L_f (mm)	Alongamento (%)
CP1	45,00	51,17	13,70
CP2	45,00	51,53	14,50
CP3	45,00	50,54	12,30
Média	45,00	51,08	13,5

Tabela 9 - Redução de área resultantes do Ensaio de tração do aço SAE4140

Material	A_i (mm)	A_f (mm)	Redução de Área (%)
CP1	28,27	20,78	26,50
CP2	28,27	19,57	30,80
CP3	28,27	22,05	22,00
Média	28,27	20,80	26,43

SAE 4340

Tabela 10 - Tensões Resultantes do Ensaio de tração do aço SAE4340

Material	σ_Y (MPa)	σ_U (MPa)
CP1	707	846
CP2	655	848
CP3	663	843
Média	675	846

Tabela 11 - Alongamentos Resultantes do Ensaio de tração do aço SAE4340

Material	L_i (mm)	L_f (mm)	Alongamento (%)
CP1	45,00	51,84	15,20
CP2	45,00	51,84	15,20
CP3	45,00	50,40	12,00
Média	45,00	51,36	14,13

Tabela 12 - Redução de área resultantes do Ensaio de tração do aço SAE4340

Material	A_i (mm)	A_f (mm)	Redução de Área (%)
CP1	28,27	15,55	45,00
CP2	28,27	18,46	34,70
CP3	28,27	16,26	42,50
Média	28,27	16,76	40,73

DIN 42CrMo4

Tabela 13 - Tensões Resultantes do Ensaio de tração do aço DIN 42CrMo4

Material	σ_Y (MPa)	σ_U (MPa)
CP1	740	915,16
CP2	720	900
CP3	724	875,38
Média	728	896,85

Tabela 14 - Alongamentos Resultantes do Ensaio de tração aço DIN 42CrMo4

Material	L_i (mm)	L_f (mm)	Alongamento (%)
CP1	45,00	51,84	15,20
CP2	45,00	51,84	15,20
CP3	45,00	50,40	12,00
Média	45,00	51,36	14,13

Tabela 15 - Redução de área resultantes do Ensaio de tração aço DIN 42CrMo4

Material	A_i (mm)	A_f (mm)	Redução de Área (%)
CP1	28,27	15,55	45,00
CP2	28,27	18,46	34,70
CP3	28,27	16,26	42,50
Média	28,27	16,76	40,73

Considerando todos os resultados obtidos nos ensaios de tração, além das análises químicas dos aços comprados e comparando-os com o material de referência, ambos os aços comprados poderiam ser utilizados em estudo comparativo apesar da tensão de escoamento do aço SAE 4140 ser 20% menor que a do material de referência devido à similaridade apresentada nos ensaios supracitados.

4.3.2 Ensaio de propagação de trinca

Após submeter os corpos de prova a ensaios de propagação de trinca a fim de determinar o limiar de propagação de trinca de fadiga, ΔK_{th} , foram obtidos os resultados conforme figura 18:

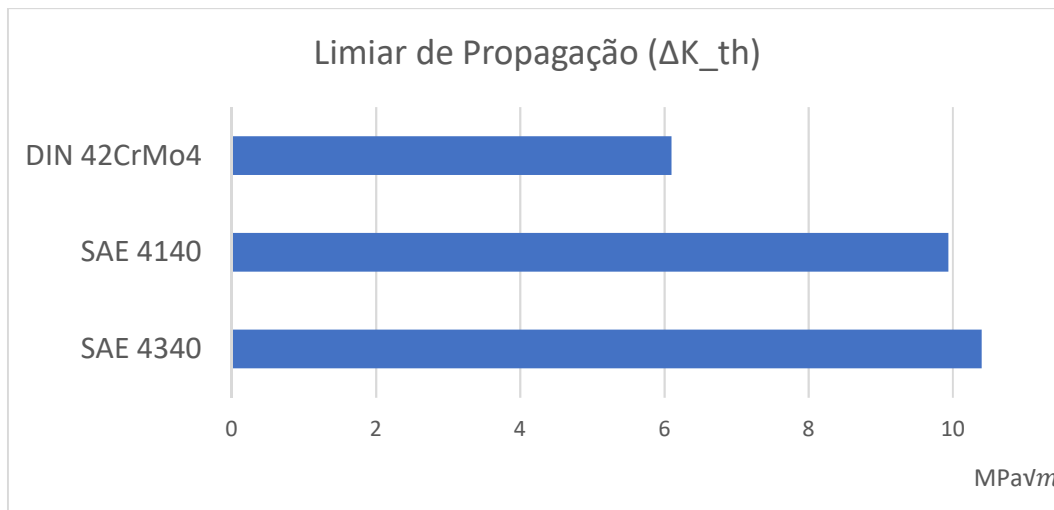


Figura 19 - Resultados obtidos após ensaio de propagação de trinca

Resultados obtidos:

Valor médio do fator do limiar de propagação de trinca do material DIN 42CrMo4:

$$\Delta K_{th} = 6,1 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

Valor médio do fator do limiar de propagação de trinca do material SAE 4140:

$$\Delta K_{th} = 9,94 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

Valor médio do fator do limiar de propagação de trinca do material SAE 4340:

$$\Delta K_{th} = 10,4 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

É possível perceber, a partir do gráfico figura 19, que o valor médio resultante dos ensaios dos corpos de prova do material 42CrMo4, corresponde a um valor muito inferior aos resultados obtidos após ensaio do SAE 4140 e SAE4340.

Isto significa dizer que, em uma seleção de materiais ou na comparação de materiais em serviço, trincas de fadiga começariam sua propagação mais rapidamente no DIN 42CrMo4 em detrimento do SAE 4140 e SAE4340 respectivamente.

4.4 Microscopia ótica

As análises microscópicas foram realizadas somente no material DIN 42CrMo4.

Seus resultados encontram-se a seguir nos itens 4.4.1 e 4.4.2.

4.4.1 Superfície de fratura:

Após fraturar os corpos de prova em nitrogênio líquido, a primeira medida foi proteger a superfície de fratura exposta ao ar com base transparente a fim de retardar o processo de oxidação.

4.4.1.1 Corpo de prova A

Na figura 20, é possível observar as regiões da superfície de fratura, na qual vemos, da esquerda para a direita, os entalhes mecânicos, seguidos pela região de fadiga e, por fim, a área de fratura final resultante do rompimento utilizando nitrogênio líquido.

A determinação do tamanho da trinca de fadiga ocorreu com a medição em 9 posições, duas nas laterais e outras 7 distribuídas na face da trinca com o auxílio do microscópio Stereomicroscope SteREO Discovery V8, lupa (figura 14).

A equação a seguir foi adotada no cálculo:

$$trinca = \frac{\frac{M_{le} + M_{ld}}{2} + M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5 + M_6 + M_7}{8} \quad (22)$$

O resultado obtido foi 2,52 mm (tamanho total, isto é, trinca mais a pré-trinca de fadiga).

Ao analisar as imagens na lupa, foi possível notar a ocorrência de uma área de sombra contida na área de propagação da trinca (figura 20), que também foi medida e teve seu tamanho médio calculado segundo equação 22. Para esta região o resultado foi obtido foi 0,80mm

De onde podemos concluir que possivelmente a região sombreada pode estar diretamente relacionada a trinca de fadiga para obtenção do *threshold*.

No entanto, este fenômeno pode ser resultado da parada e retomada do ensaio, a isto dá-se o nome de “marcas de sargento”.

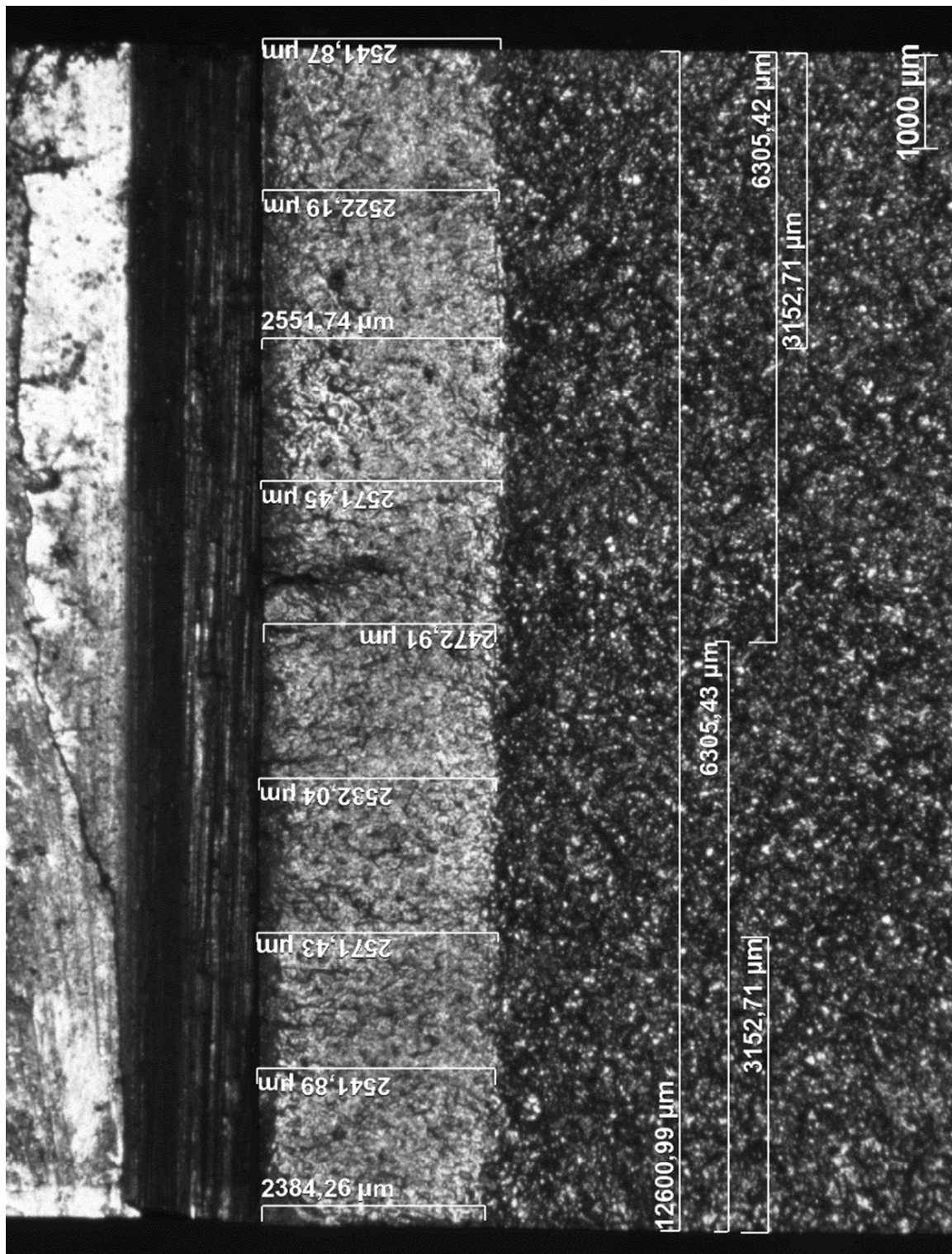


Figura 20 - Visualização da frente de propagação da trinca com medidas para obter o valor médio de a da amostra A rotacionada 90°.

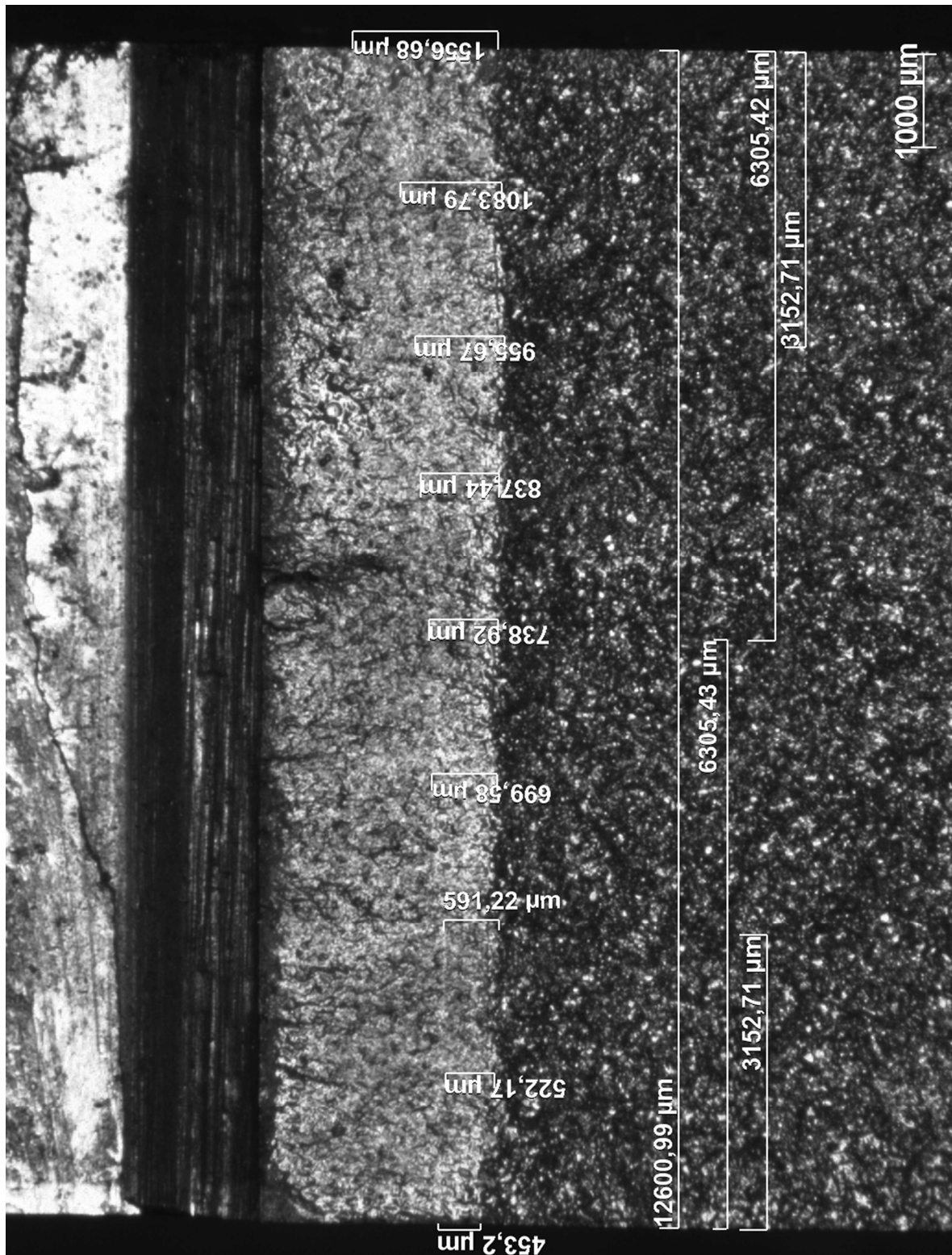


Figura 21 - Visualização da frente de propagação da trinca com medidas da região de propagação de trincas da amostra A rotacionada 90°.

4.4.1.2 Corpo de prova B

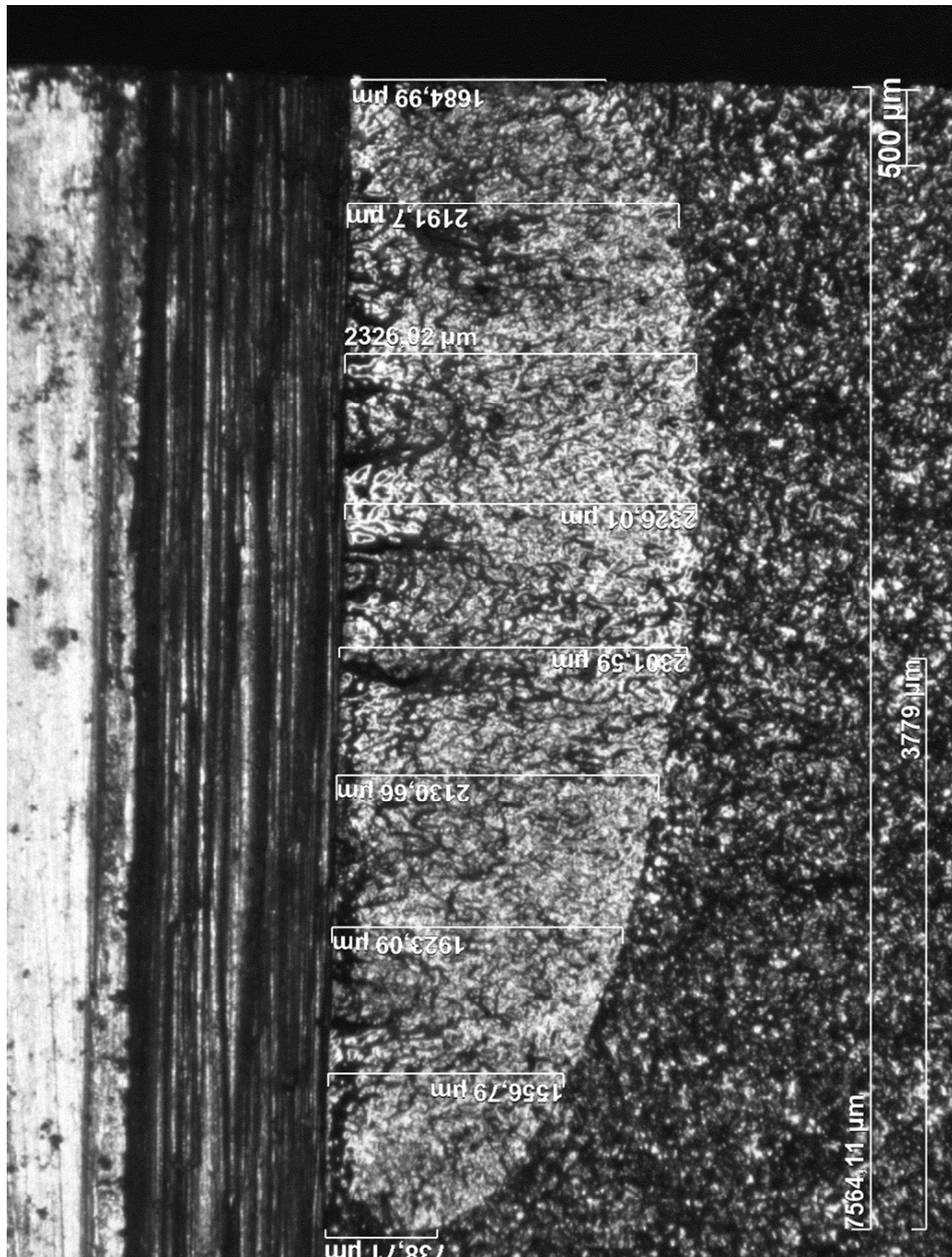


Figura 22 - Visualização da frente de propagação da trinca com medidas para obter o valor médio de a da amostra B.

Utilizando a equação 22, foi realizado o cálculo do tamanho de trinca do corpo de provas B e o resultado obtido foi 2mm.

Comparando ambos os corpos, do mesmo material, foi possível notar que a região na qual ocorreram tanto de pré-trinca quando trinca de fadiga apresentam áreas de propagação bastante distintas.

No corpo nomeado como “A” a frente de propagação se apresenta comportamento uniformemente distribuído, enquanto no corpo B a trinca e sua frente de propagação iniciaram-se em um dos lados e, posteriormente, na outra extremidade.

O corpo pode ter sido influenciado pela colocação incorreta dos pinos que são acoplados a máquina servo-hidráulica, ou até mesmo, a microestrutura pode ter influenciado nesta distribuição e a deixou não uniforme.

4.4.2 Perfil da região de propagação de trinca

As amostras foram fraturadas em nitrogênio líquido, uma das metades de cada corpo de provas foram seccionadas e embutidas em resina para que posteriormente pudessem ser analisadas em microscópio ótico a fim de verificar a ocorrência de inclusões ao longo do caminho percorrido pelas trincas decorrentes do processo de fadiga. Além disso, foi decidido fazer a varredura de toda a superfície das amostras. Os resultados obtidos foram enumerados para facilitar sua identificação e encontram-se a seguir:

4.4.2.1 Amostra A



Figura 23 - Inclusão 1 aumento de 200x

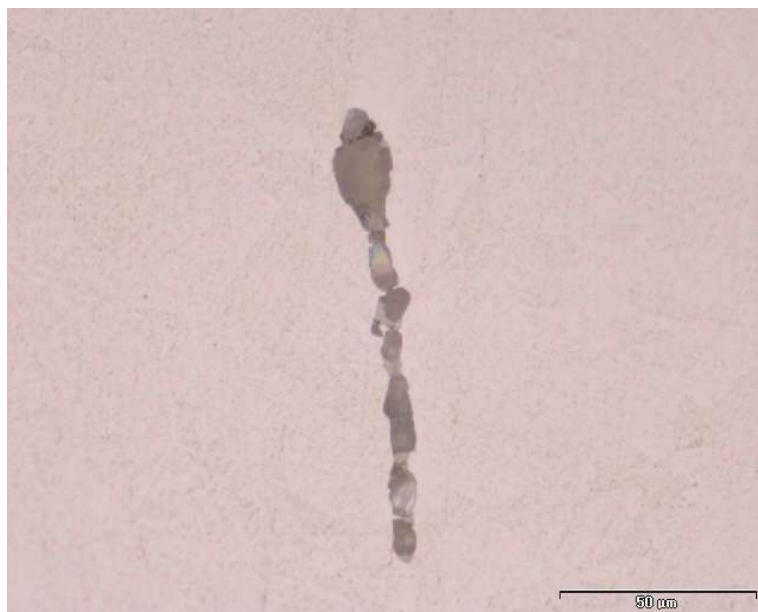


Figura 24 - Inclusão 1 com aumento de 500x

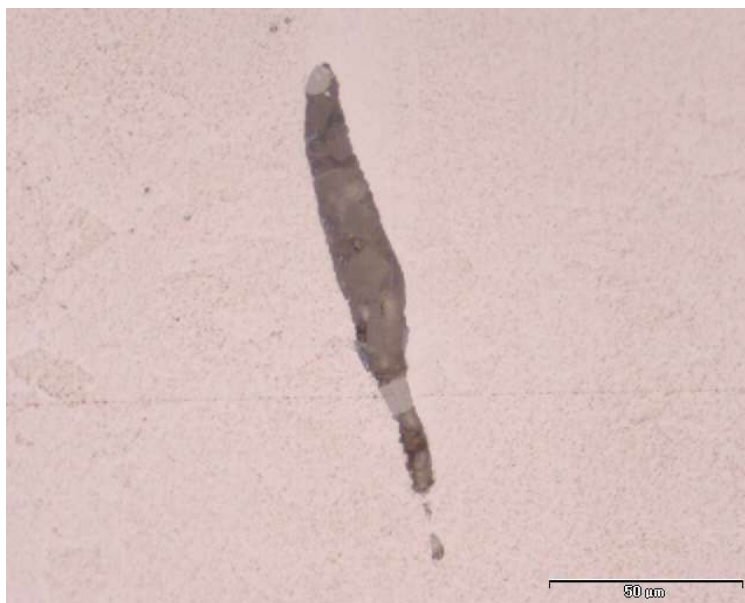


Figura 25 - Inclusão 2 com aumento de 500x

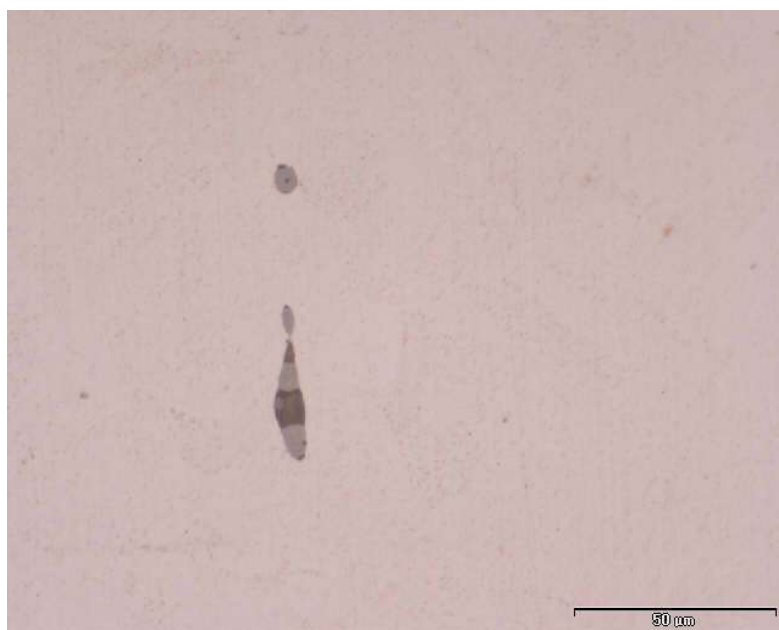


Figura 26 - Inclusão 3 com aumento de 500x



Figura 27 - Inclusão 3 com aumento de 1000x

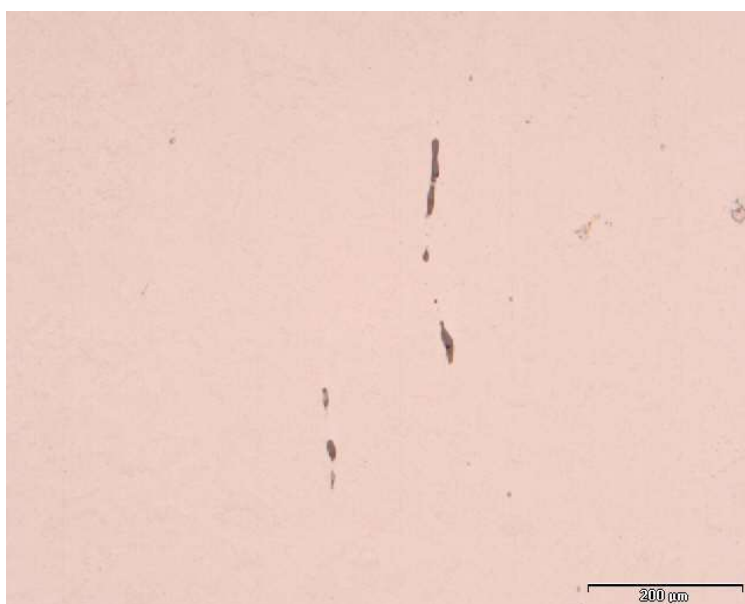


Figura 28 - Inclusões 4 e 5 com aumento de 100x



Figura 29 - Inclusões 4 e 5 com aumento de 200x

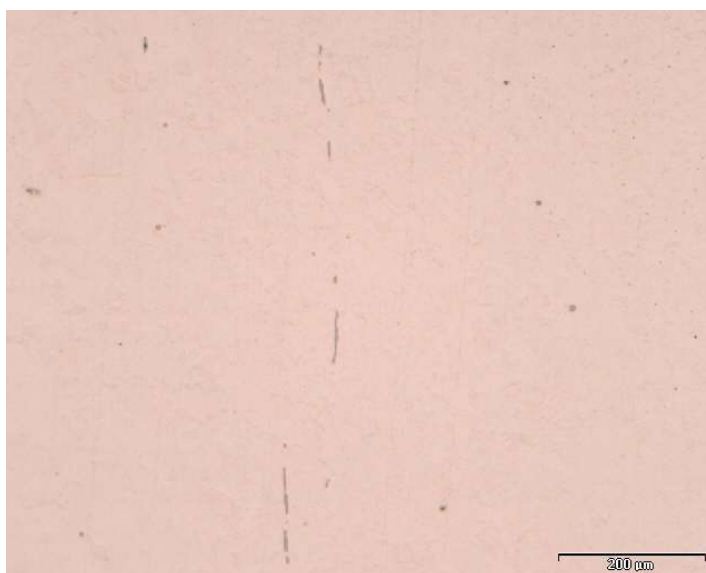


Figura 30 - Inclusões 6, 7 e 8 com aumento de 100x

4.4.2.1 Amostra B

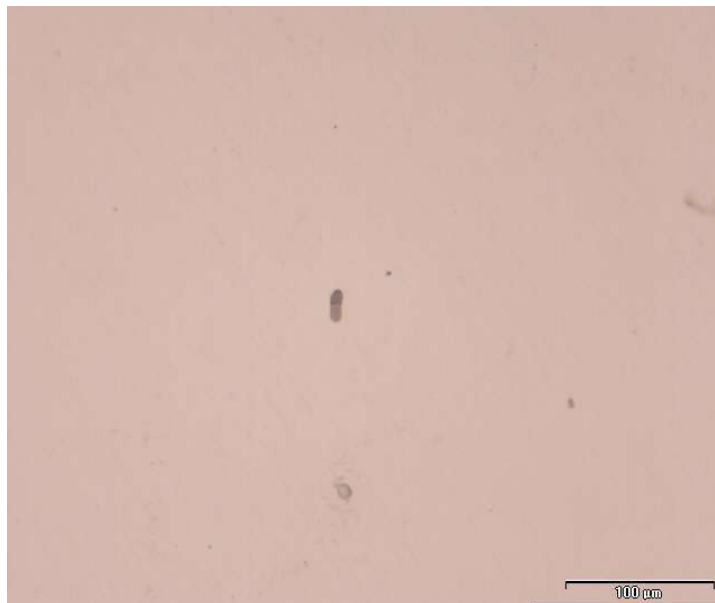


Figura 31 - Inclusão 1 amostra B com aumento de 200x

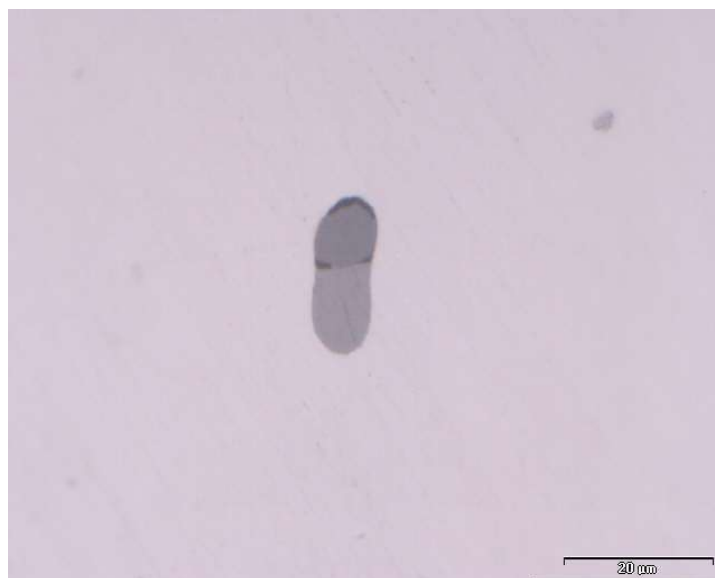


Figura 32 - Inclusão 1 amostra B com aumento de 1000x

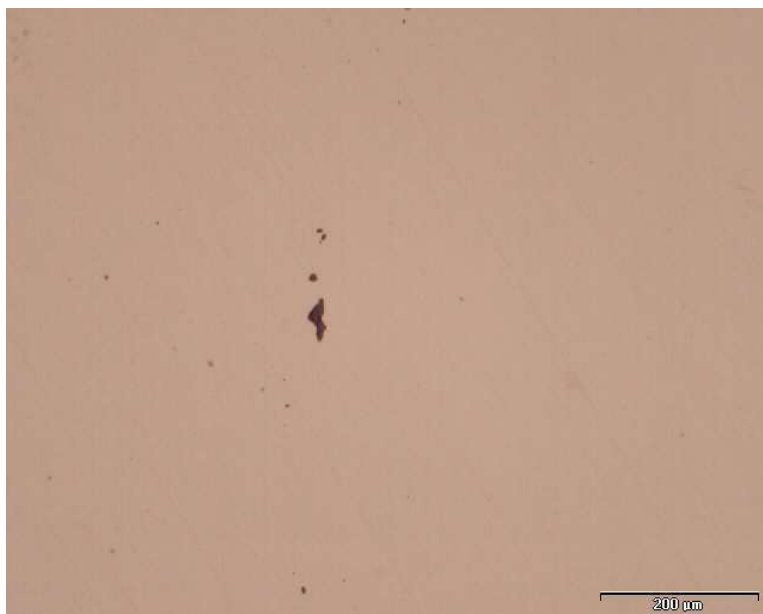


Figura 33 - Inclusão 2 amostra B com aumento de 100x



Figura 34 Inclusão 2 amostra B com aumento de 1000x

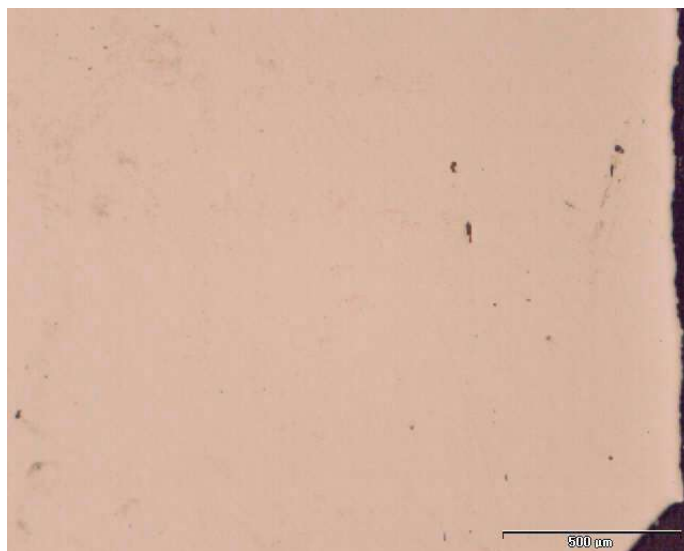


Figura 35 - Inclusão 3 amostra B com aumento de 50x



Figura 36 - Inclusão 3 amostra B com aumento de 500x



Figura 37 - Inclusão 3 amostra B com aumento de 1000x



Figura 38 - Inclusão 4 amostra B com aumento de 1000x

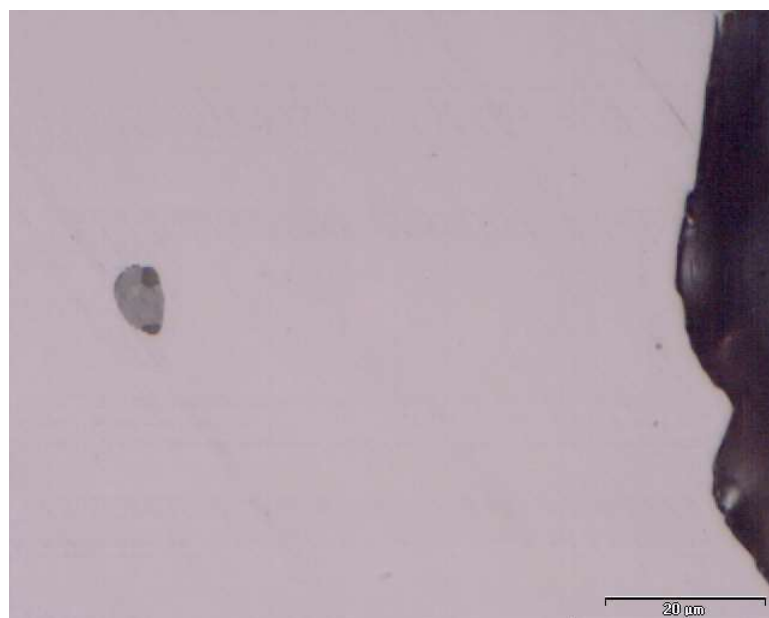


Figura 39 - Inclusão 5 amostra B com aumento de 1000x



Figura 40 - Inclusão 6 amostra B com aumento de 1000x

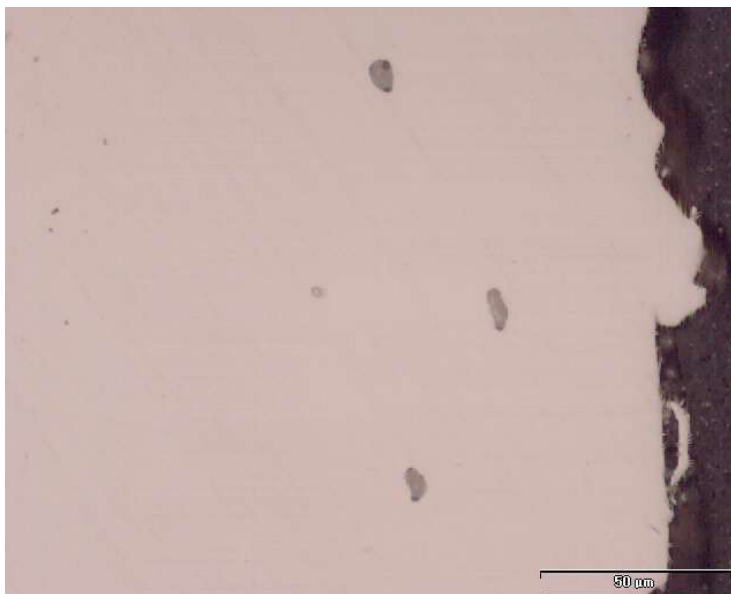


Figura 41- Inclusões 4, 5 e 6 amostra B com aumento de 500x

Após a localização das inclusões da amostra, foi possível constatar com base no formato e tipo de agrupamento, apenas visualmente, e comparando com os registros encontrados na norma ASTM E 45 que nas amostras analisadas foram encontradas inclusões dos tipos: Alumina e Silicato. Para que haja maior precisão, faz-se necessidade de análise química com a finalidade de corroborar os resultados.

5. Conclusões

O material de referência era parte de um eixo-virabrequim que se rompeu muito abaixo do limite de vida em fadiga esperada para aços estruturais, a partir disso várias hipóteses para a falha catastrófica foram levantadas.

Uma delas, que foi a base deste trabalho, era estudar se na matriz metálica haviam inclusões e como elas poderiam influenciar na vida útil do material. Aços foram química e mecanicamente analisados a fim de sugerir alternativas para a possível troca de material e, além disso, corroborar a hipótese de que a origem do problema residia na ordem microestrutural.

Após os ensaios pôde-se concluir que, o resultado médio do fator limiar de propagação a fadiga do aço SAE 4340 faz dele melhor alternativa a aplicação em componentes estruturais, uma vez que com os resultados obtidos o seu limiar de propagação de fadiga é o mais adequado para este fim.

Além disso pôde-se notar, a partir da imagem do microscópio, que inclusões não faziam parte do caminho preferencial de propagação das trincas contidas nas amostras embutidas, isto pode ter ocorrido pelos seguintes fatores:

- No volume amostrado não haviam inclusões (devido ao fato de ser aleatoriamente distribuído).
- As inclusões eram muito pequenas e não puderam ser vistas no máximo aumentando no equipamento utilizado.
- Ao fraturar o corpo de prova, as inclusões caíram da amostra

Ademais, após romper os corpos de prova para análise microscópica notou-se que o formato da frente de propagação da trinca do corpo B no material DIN 42CrMo4 era distinto ao do corpo A.

Apesar da tentativa de reprodutibilidade das condições dos ensaios, a diferença na forma da frente de propagação da trinca poderia ser função da colocação do corpo de provas na máquina servo-hidráulica.

6. Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, são feitas as seguintes sugestões:

- Para que efetivamente os resultados deste trabalho fossem mais consistentes haveria necessidade de mais profunda investigação microestrutural junto aos corpos de provas dos materiais adquiridos por intermédio de fornecedor de materiais metálicos, tanto o SAE 4140 quanto o SAE 4340.
- Realizar análises microscópicas utilizando o MEV para visualizar inclusões na matriz dos aços utilizados neste trabalho e, em seguida, comparar os resultados obtidos com o aço utilizado como referência.
- Utilizar a técnica de Espectroscopia de energia dispersiva (EDS ou EDX) para caracterizar quimicamente o tipo de espécie dispersa na matriz do aço.
- Estudar e correlacionar os valores obtidos do limiar de propagação de fadiga ao volume de inclusões por unidade de área das amostras.

7. Referências bibliográficas


- 1 LAWSON, L.; CHEN, E. Y.; MESHII, M. **Near-threshold fatigue: A Review**. International Journal of Fatigue. Volume 21, p 15-21. Evanston: Elsevier, 1999.
- 2 ANDERSON, T. L. **Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications**, 2ª edição. Boca Raton: CRC Press, 1995.
- 3 COTERELL, B. **The past, present, and future of fracture mechanics**. Institute of Materials Research and Engineering, 3 Research Link, Singapore 117602, Singapore
- 4 SURESH S., **Fatigue of Materials**, 2ª edição Cambridge University Press, 1998.
- 5 ASTM - American society for testing materials. **ASTM E45 - 13: Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel**, ASTM International, West Conshohocken, 2013.
- 6 American society for testing materials - ASTM. **ASTM E647 - 15e1: Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates**, ASTM International, West Conshohocken, 2015.
- 7 American society for testing materials - ASTM. **ASTM E8M - 16a: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Material**, ASTM International, West Conshohocken, 2016.
- 8 American society for testing materials - ASTM. **ASTM E3 – 11(2017): Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens**, ASTM International, West Conshohocken, 2017.
- 9 American society for testing materials - ASTM. **ASTM A751 – 11: Standard Test Methods, Practices and Terminology for Chica Analysis of Steel Products**, ASTM International, West Conshohocken, 2011.
- 10 CALLISTER JR., W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**, 5ª edição. Rio de Janeiro, LTC, 2002.
- 11 SKOOG & WEST & HOLLER et al. **Fundamentos de Química Analítica**. 8ª edição. São Paulo, Cengage learning, 2012.

- 12 GARCIA, A.; SPIM, J.A.; SANTOS, C. A. dos. **Ensaaios dos materiais**, 2ª edição. Rio Grande do Sul, LTC, 2000.
- 13 MAPELLI, C., RIVA, R., VENTURINI, R. **Non – metallic inclusions and clean steel**. La Metallurgia Italiana, p. 43 – 52, jun 2008.
- 14 GARRISON JR., Warren M. , WOJCIESZYNSK, Andrzej L. , **A discussion of the effect of inclusion volume fraction on the toughness of steel**, Science Direct, v. 464, p. 321-329, ago 2007.
- 15 TOTTEN, George E., **Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies**, 2ª edição. Portland State University, Portland, Oregon, EUA, Taylor & Francis Group, 2006.
- 16 VAN ENDE, MARIE-ALINE. **Formation and Morphology of non-Metallic Inclusions in Aluminium Killed Steels**, Louvain, jan. 2008. 261 páginas. Tese (Doutorado em Ciências Aplicadas) – Departamento de Ciências dos Materiais e Processos, Universidade Católica de Louvain, Louvain, Bélgica.
- 17 DE OLIVEIRA, LUIZ GUSTAVO A. **Determinação da Taxa de Propagação de Trinca por Fadiga dos Aços SAE-1050 e SAE-4130 Empregados na Fabricação de Eixos Ferroviários**, São Paulo, jun. 2008. 149 páginas. Dissertação (Mestrado em Mecânica) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, São Paulo.
- 18 Elber W. **The significance of fatigue crack closure**. In: **Damage tolerance in aircraft structures**, ASTM STP-486. Philadelphia (PA, USA): American Society for Testing and Materials, 1971: p. 230–42.
- 19 SCHUTZ, W., **A history of fatigue**, Engineering Fracture Mechanics, v. 54, no 2, p. 263 – 300, 1996.
- 20 SINGH, JEET., **Fundamentals of machine design**, volume 1, United Kingdom, Cambridge University Press, 2017.
- 21 KWOFIE, S. **Equivalent stress approach to predicting the effect of stress ratio on fatigue threshold stress intensity range**, International Journal of Fatigue, Elsevier, v. 26: p. 299 – 303, jul. 2003.

- 22 MARCI, G. **Effect of the active plastic zone on fatigue crack growth rates.** Fracture mechanics, ASTM STP 607. American Society for Testing and Materials, p. 168–86. 1979
- 23 PARIS P, ERDOGAN F. **A critical analysis of crack propagation laws.** J Basic Eng 85, p. 528–533. 1963
- 24 RITCHIE RO. **Near threshold fatigue crack propagation in ultrahigh strength steel: influence of load ratio and cyclic strength.** J Eng Technol Trans ASME, H: v. 99: p. 195–204, 1977.
- 25 VOSIKOVSKY O. **The effect of stress ratio on fatigue crack growth rates.** Engineering Fracture Mechanics. Journal. Elsevier. v. 11: p. 595–602, 1979.
- 26 WU X.J., WALLACE W., KOUHL A. K, RAIZENNE M.D. **Near-threshold fatigue crack growth in 8090 Al–Li alloy.** Metall Mater Trans A 1995; v. 26: p. 2973–82, out. 1994.
- 27 Masounave J, Bailon J. **The effect of grain size on threshold stress intensity factor in fatigue of a ferritic steel.** Scripta Metallurgica, v. 10: p. 165–70, fev. 1976.
- 28 DIETER, G. **Mechanical metallurgy.** 2ª edição. New York: McGraw-Hill, 1976.
- 29 NEWMAN, JAMES C., PIASCIK, ROBERT S., editores. **Fatigue Crack Growth Thresholds, Endurance Limits and Design.** 1ª edição. Filadélfia: ASTM, 200.

Anexo I

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1512320/CA



MATERIAIS TEST CENTER LTDA.

RELATÓRIO DE ENSAIO Nº: 17050481QUI

FL 1/1

Empresa interessada: **PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO**
Rua Marquês de São Vicente, nº 225 – Gávea – Rio de Janeiro / RJ


Pedido de ensaio: 000649

Natureza do trabalho: **ANÁLISE QUÍMICA.**

Informações fornecidas pelo interessado sobre o material ensaiado:

QUANTIDADE: 01 Amostra para análise química

IDENTIFICAÇÃO: 4340



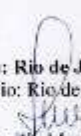
RESULTADOS OBTIDOS
COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)

Carbono	(C)	0,417
Silício	(Si)	0,226
Manganês	(Mn)	0,64
Fósforo	(P)	0,020
Enxofre	(S)	0,018
Cromo	(Cr)	0,75
Níquel	(Ni)	1,26
Molibdênio	(Mo)	0,207
Alumínio	(Al)	0,0084
Cobre	(Cu)	0,160
Cobalto	(Co)	0,021
Titânio	(Ti)	0,0014
Níobio	(Nb)	<0,0030
Vandício	(V)	0,0024
Tungstênio	(W)	<0,010
Chumbo	(Pb)	<0,0030
Boro	(B)	<0,0005
Estanho	(Sn)	0,015
Zinco	(Zn)	<0,0020
Arsênio	(As)	0,0022
Bismuto	(Bi)	0,0032
Cálcio	(Ca)	0,0009
Cério	(Ce)	<0,0030
Zircônio	(Zr)	<0,0015
Lantânio	(La)	<0,0010
Ferro	(Fe)	96,2

Procedimento MTC: PO-301.

Normas de Referências: ASTM A 751, ed 2014a.

Local e Data dos Ensaios: Rio de Janeiro, 11 de Maio de 2017.
Emissão do Relatório: Rio de Janeiro, 11 de Maio de 2017.



Maria Cecília Mendes da Silva
Gerente Técnico de Laboratório

Os resultados apresentados no presente documento têm validade somente em relação ao objeto ensaiado em conformidade. A sua reprodução, total ou parcial, só poderá ser feita mediante prévia autorização da laboratório e emitente.

Materiais Test Center Ltda.
Rua Leopoldino de Oliveira, 392 - Madureira - Rio de Janeiro - RJ - CEP 21360-060 - Tel: (21) 3830-0011 / 2451-4599
mtc@laboratoriomtc.com.br | www.laboratoriomtc.com.br

Figura 42 - Análise química para confirmação do tipo de aço adquirido de fornecedor externo

Anexo II



RELATÓRIO DE ENSAIO Nº: 17050482QUT

FL. 1/1

Empresa interessada : **PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO**
Rua Marquês de São Vicente, nº 225 – Gávea - Rio de Janeiro / RJ

Pedido de ensaio : 000649

Natureza do trabalho : **ANÁLISE QUÍMICA.**

Informações fornecidas pelo interessado sobre o material ensaiado:

QUANTIDADE.....: 01 Amostra para análise química

IDENTIFICAÇÃO.....: 4140

Laboratório
MTC
QUÍMICA E METALURGIA
ISO 9001

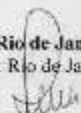
RESULTADOS OBTIDOS
COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)

Carbono	(C)	0,424
Silício	(Si)	0,255
Manganês	(Mn)	0,86
Fósforo	(P)	0,019
Enxofre	(S)	0,014
Cromo	(Cr)	1,06
Níquel	(Ni)	0,043
Molibdênio	(Mo)	0,172
Alumínio	(Al)	0,019
Cobre	(Cu)	0,010
Cobalto	(Co)	0,0023
Titânio	(Ti)	0,0015
Níobio	(Nb)	<0,0030
Vanádio	(V)	0,0047
Tungstênio	(W)	<0,010
Chumbo	(Pb)	<0,0030
Boro	(B)	<0,0005
Estanho	(Sn)	0,0011
Zinco	(Zn)	<0,0020
Arsênio	(As)	<0,0010
Bismuto	(Bi)	0,0030
Cálcio	(Ca)	0,0003
Cério	(Ce)	<0,0030
Zircônio	(Zr)	<0,0015
Lantânio	(La)	<0,0010
Ferro	(Fe)	97,1

Procedimento MTC: PD-301.

Normas de Referência: ASTM A 751, ed 2014a.

Local e Data dos Ensaios: Rio de Janeiro, 11 de Maio de 2017.
Emissão do Relatório: Rio de Janeiro, 11 de Maio de 2017.


Maria Cecilia Mendes da Silva
Gerente Técnico de Laboratório

Os resultados apresentados no presente documento têm significância estatística e se aplicam somente ao objeto ensaiado na condição. A sua reprodução, total ou parcial, só poderá ser feita mediante prévia autorização do laboratório emissor.



EP

Materials Test Center Ltda.
Rua Leopoldina de Oliveira, 302 - Madureira - Rio de Janeiro - RJ - CEP 21.360-060 - Tel.: (21) 2830-0011 / 2451-9999
mtc@laboratoriomtc.com.br | www.laboratoriomtc.com.br

Figura 43 - Análise química para confirmação do tipo de aço adquirido de fornecedor externo

Anexo III

RECEBEMOS DE Tupaiba Ferro e Aço Eireli OS PRODUTOS CONSTANTES DA NOTA FISCAL INDICADA AO LADO		NF-e Nº 000.007.626 Série 0	
DATA DE RECEBIMENTO	FACULDADES CATOLICAS IDENTIFICAÇÃO E ASSINATURA DO RECEBEDOR		

Tupaiba Ferro e Aço Eireli  Rua Bonsucesso Nº 457 Bonsucesso - RIO DE JANEIRO-RJ CEP 21040-320 FONE (21)2560-6887 tupaibaferro@yahoo.com.br	DANFE Documento Auxiliar da Nota Fiscal Eletrônica 0- ENTRADA 1 1- SAÍDA Nº 000.007.626 SÉRIE 0 FOLHA 1/1	 CHAVE DE ACESSO 3317 0133 3442 1900 0167 5500 0000 0076 2610 2795 4221 Consulta de autenticidade no portal nacional da NF-e www.nfe.fazenda.gov.br/portal ou no site da Sefaz autorizadora	
NATUREZA OPERAÇÃO VENDAS DENTRO DA UF S/ APROVEITAMENTO DE CREDITO		PROTOCOLO DE AUTORIZAÇÃO DE USO 333170013602390 31/01/17 08:20:26	
INSCRIÇÃO ESTADUAL 81792194	INSC. ESTADUAL DO SUBST. TRIBUTÁRIO	CNPJ 33.344.219/0001-67	

DESTINATÁRIO/REMETENTE		CNPJ/CPF 33.555.921/0001-70		DATA DA EMISSÃO 31/01/17	
FACULDADES CATOLICAS					
ENDEREÇO RUA MARQUES DE SAO VICENTE 225		BARRIO/DISTRITO GAVEA		CEP 22451-900	
MUNICÍPIO RIO DE JANEIRO		PONTAUX (21)3527-1179		UF RJ	
		INSCRIÇÃO ESTADUAL		HORA DE SAÍDA 08:17:00	

FATURA			
PAGAMENTO À VISTA	NÚMERO 007626	VALOR ORIGINAL 352,70	VALOR DESCONTO 0,00
		VALOR LÍQUIDO 352,70	

DUPLICATAS			
NÚMERO 007626	VENCIMENTO 31/01/17	VALOR 352,70	

CÁLCULO DO IMPOSTO			
BASE DE CÁLCULO DO ICMS 352,70	VALOR DO ICMS 0,00	BASE DE CÁLCULO DO ICMS SUBSTITUIÇÃO 0,00	VALOR DO ICMS SUBSTITUIÇÃO 0,00
VALOR DO PRETE 0,00	VALOR DO SEGURO 0,00	DESCONTO 0,00	OUTRAS DESPESAS ACESSÓRIAS 0,00
VALOR DO IPI 0,00			VALOR TOTAL DA NOTA 352,70

TRANSPORTADOR/VOLUMES TRANSPORTADOS			
FACULDADES CATOLICAS		PRETE POR CONTA 1-DEST/REM	CÓDIGO ANTT
ENDEREÇO RUA MARQUES DE SAO VICENTE Nº 225		MUNICÍPIO RIO DE JANEIRO	UF RJ
QUANTIDADE 2	ESPÉCIE PEÇAS	MARCA	NÚMERAÇÃO 31,000
VALOR LÍQUIDO 31,000			

DADOS DO PRODUTO/SERVIÇO														
CÓD.PROD.	DESCRIÇÃO DO PRODUTO/SERVIÇO	NCM/SH	caixa	CPOP	UNID.	QUANT.	V.UNITÁRIO	V.DISC.	V.TOTAL	BC ICMS	V. ICMS	V. IPI	ALQ. ICMS	ALQ. IPI
008-028	ACO 4140 REID. 4.3/4 1 peça com 150mm. Valor Aproximado dos Tributos R\$ 37,98 (34,12%) Fonte: IBPT	72283000	0900	5102	KG	14,000	2,95	0,00	111,30	111,30	0,00	0,00	0,00	0,00
009-025	ACO 4340 REID. 5 1 peça com 150mm. Valor Aproximado dos Tributos R\$ 82,37 (34,12%) Fonte: IBPT	72283000	0900	5102	KG	17,000	14,20	0,00	241,40	241,40	0,00	0,00	0,00	0,00

CÁLCULO DO ISSQN			
INSCRIÇÃO MUNICIPAL	VALOR TOTAL DOS SERVIÇOS 0,00	BASE DE CÁLCULO DO ISSQN 0,00	VALOR TOTAL DO ISSQN 0,00

DADOS ADICIONAIS	
INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES NÃO ACEITAMOS DEVOLUÇÃO DO MATERIAL CORTADO. ENDEREÇO DE ENTREGA: PEDIDO DO CLIENTE: DOCUMENTO EMITIDO POR ME OU EPP OPTANTE PELO SIMPLES NACIONAL. NÃO GERA DIREITO A CREDITO FISCAL DE ICS E IPI. PERMITE O APROVEITAMENTO DE CREDITO DE ICMS NO VALOR DE R\$ 10,40 CORRESPONDENTE A ALÍQUOTA DE 2,95 NOS TERMOS DO ARTIGO 23 DA LC 123. Valor Aproximado dos Tributos R\$ 120,35 (34,12%) Fonte: IBPT	RESERVADO AO FISCO

DATA E HORA DA IMPRESSÃO: 31/01/17 08:22

Figura 44 - Nota de compra do material utilizado para análise

Anexo IV



Rio de Janeiro, 18 de Maio 2017.
Rio de Janeiro, May 18th 2017

À
LETICIA BUENO NOGUEIRA

Nota Fiscal/ Invoice: Pedido de serviço 97226

Ordem de Serviço/ Order Service: 7.859

MATERIAL: SAE 4340

DESCRIÇÃO/ PRODUCT DESCRIPTION:

01 Pç – BARRA – Ø 5" x 136mm

TRATAMENTO TÉRMICO/HEAT TREATING: TEMPERA E REVENIMENTO.

REQUERIMENTO DUREZA /HARDNESS REQUERIMENT: 260 / 280 HB

RESULTADOS OBTIDOS/RESULT: 277 HB

ATENCIOSAMENTE

Jorge Anibal Barrionuevo
Engenheiro da Qualidade

Rua Cascais, 191, 203, 207 e 211 – Ponta Circular – RJ – Cep: 21011-610 – Telefax: (21) 2560-7741 CNPJ: 42.205.162/0001-13 – IE: 81.860.934

A QUALIDADE DOS NOSSOS SERVIÇOS GARANTE A SEGURANÇA DE MUITOS

Email: www.garantia@temperacorio.com.br / Site: www.temperacorio.com.br

Revisão: 00 em 20/04/2009

F-042

Figura 45 - Tratamento térmico SAE 4340

ANEXO V



Rio de Janeiro, 18 de Maio 2017.
Rio de Janeiro, May 18th 2017

À
LETICIA BUENO NOGUEIRA

Nota Fiscal/Invoice: Pedido de serviço 97226

Ordem de Serviço/Order Service: 7.858

MATERIAL: SAE 4140

DESCRIÇÃO/PRODUCT DESCRIPTION:

01 Pc – BARRA – Ø 4.¼" x 135mm

TRATAMENTO TÉRMICO/HEAT TREATING: TEMPERA E REVENIMENTO.

REQUERIMENTO DUREZA /HARDNESS REQUERIMENT: 260 / 280 HB

RESULTADOS OBTIDOS/RESULT: 262 HB

ATENÇOSAMENTE

Jorge Anibal Barrionuevo
Engenheiro de Qualidade

Rua Cascais, 191, 203, 207 e 211 - Ponta Circular - RJ - Cep: 21011-610 - Telefone: (21) 2560-7741 CNPJ: 42.200.162/0001-13 - IE: 81.860.394

"A QUALIDADE DOS NOSSOS SERVIÇOS GARANTE A SEGURANÇA DE MUITOS"

Email: www.garantia@temperacorio.com.br / Site: www.temperacorio.com.br

Revisão: 00 em 20/04/2009

F-042

Figura 46 - Tratamento térmico SAE 4140