



PATRICIA DE OLIVEIRA C NEUBAUER

**Determinação Experimental de Curvas de
Resistência do Aço DIN 42CrMo4**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Marcos Venicius Soares Pereira

Rio de Janeiro

Março de 2018



PATRICIA DE OLIVEIRA C NEUBAUER

**Determinação Experimental de Curvas de
Resistência do Aço DIN 42CrMo4**

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

Prof. Marcos Venicius Soares Pereira

Orientador

Departamento de Engenharia Química e de Materiais – PUC-Rio

Prof. André Luis Moreira de Carvalho

Universidade Estadual de Ponta Grossa – UEPG

Prof. Felipe José da Silva

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro

Prof. Marcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 27 de Março de 2018

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

Patrícia de Oliveira Campos Neubauer

Graduou-se em Engenharia Mecânica na Universidade Federal Fluminense (UFF) em 2013. Possui experiência profissional em pesquisa e desenvolvimento de produto.

Ficha Catalográfica

Neubauer, Patrícia de Oliveira Campos

Determinação experimental de curvas de resistência do aço DIN 42CrMo4 / Patrícia de Oliveira Campos Neubauer ; orientador: Marcos Venicius Soares Pereira. – 2018.

97 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Química e de Materiais, 2018.

Inclui bibliografia

1. Engenharia de Materiais – Teses. 2. Engenharia Química – Teses. 3. Resistência à fratura. 4. Aço estrutural. 5. Integral J. 6. Corpos de prova SE(B). 7. Método compliance. 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

Agradecimentos

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, pela vida e por me guiar em minhas escolhas.

Aos meus pais, muito obrigada pela luta em me proporcionar a melhor educação. Agradeço também a minha irmã e a minha Tia Leny pela constante preocupação e carinho.

Ao meu esposo Fernando, obrigada pelo amor, incentivo e compreensão nas ausências.

Agradeço sinceramente ao meu orientador Prof. Dr. Marcos Venicius Pereira pela oportunidade e orientação durante a realização desse trabalho.

A CAPES e a PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais esta pesquisa não poderia ter sido realizada.

Ao engenheiro Adrian Giovani pelo auxílio nos ensaios experimentais.

Ao José Marques pela confecção dos corpos de prova.

A todos os amigos, em especial Maria Clara, Ivan, Letícia e Thaís, pelo convívio, estímulo e apoio constante durante o mestrado.

A todos os professores do DEQM pelos ensinamentos.

Resumo

Neubauer, Patrícia de Oliveira Campos; Soares Pereira, Marcos Venicius. **Determinação Experimental de Curvas de Resistência do Aço DIN 42CrMo4.** Rio de Janeiro, 2018. 97p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Química e de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho teve como objetivo o estudo do comportamento à fratura do aço estrutural DIN 42CrMo4 através da determinação experimental de curvas de resistência (curvas R) à propagação estável de trincas. Inicialmente, conduziram-se ensaios de tração para a determinação das propriedades mecânicas do material. Os ensaios de tenacidade à fratura foram realizados em espécimes do tipo SE(B) entalhados, submetidos à flexão e com 3 geometrias distintas. Os corpos de prova foram pré-trincados por fadiga de maneira a atender a relação a/W equivalente a 0,5. Nos ensaios de propagação de trinca, adotou-se a técnica de corpo de prova único com a utilização do método das descargas parciais (*Unloading Compliance Method*) para a obtenção das curvas carga (P) versus deslocamento da boca do entalhe (CMOD - *Crack Mouth Opening Displacement*). A cada ponto de descarregamento, relacionando a inclinação da linha de carga com as medidas da flexibilidade elástica do corpo de prova, pôde-se calcular o comprimento da trinca e, conseqüentemente, valores do parâmetro elasto-plástico J. Em sequência, com base nos valores de J e propagação de trinca, foram levantadas as curvas R do material. Os resultados experimentais mostraram que a geometria dos corpos de prova influenciou a estabilidade da propagação das trincas durante o ensaio, sendo possível a obtenção de curvas R somente para os corpos de prova com geometria mais robusta. Além disso, percebeu-se que os valores de propagação de trinca calculados pelo método *Compliance* foram superestimados.

Palavras-chave

Resistência à Fratura; Aço Estrutural; Integral J; Corpos de prova SE(B); Método Compliance.

Abstract

Neubauer, Patrícia de Oliveira Campos; Soares Pereira, Marcos Venicius (Advisor). **Experimental Determination of Resistance Curves for DIN 42CrMo4 Steel**. Rio de Janeiro, 2018. 97p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia de Materiais e Processos Químicos e Metalúrgicos, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work aimed the study of the fracture behavior of the structural steel DIN 42CrMo4 through the experimental determination of resistance curves (R curves) to the stable spread of cracks. Traction tests were initially conducted to determine the mechanical properties of the material. The fracture tenacity tests were carried out in specimens of the type SE(B) notched, subjected to flexion and with 3 distinct geometries. The samples were precracked by fatigue in order to meet the a/W ratio equivalent to 0.5. In the crack propagation tests, the single specimen technique was adopted with the use of the partial discharge method for obtaining the curves load (P) versus displacement of the notch mouth (CMOD- Crack mouth Opening Displacement). At each point of unloading, relating the inclination of the load line with the measurements of the elastic flexibility of the sample, it was possible to calculate the length of the crack and consequently the values of the elasto-plastic parameter J. In sequence, based in the values of J and crack propagation, the R curves of the material were raised. The experimental results showed that the geometry of the specimens influenced the stability of crack propagation during the test, and it was possible to obtain R curves only for the most robust specimens. In addition, it was noticed that the crack propagation values calculated by the compliance method were overestimated.

Keywords

Fracture Resistance; Structural Steel; J-Integral; SE(B) specimens; Compliance Method.

Sumário

1. Introdução	18
2. Revisão bibliográfica	20
2.1. Conceitos fundamentais da Mecânica da Fratura	20
2.1.1. Ductilidade	21
2.1.2. Tenacidade à fratura	23
2.2. Mecânica da Fratura Elasto-Plástica	24
2.2.1. CTOD (<i>Crack Tip Opening Displacement</i>)	26
2.2.2. Integral J	27
2.2.3. Relação entre J e CTOD	33
2.3. Curvas de resistência à fratura	34
2.3.1. Procedimentos experimentais para obtenção de curvas R	35
2.3.2. Avaliação das curvas R	38
3. Metodologia	42
3.1. Material	42
3.2. Ensaio de tração	43
3.3. Ensaio de tenacidade à fratura	44
3.3.1. Corpos de prova	44
3.3.2. Pré-trinca de fadiga	46
3.3.3. Curva Carga versus CMOD	48
3.3.4. Fratura dos corpos de prova	51
3.3.5. Análise fractográfica	52
3.3.6. Medidas dos comprimentos de trincas	53
3.4. Curvas de resistência à fratura	54
3.4.1. Identificação das cargas e CMOD das rampas	54
3.4.2. Cálculo dos valores de <i>compliance</i>	55
3.4.3. Determinação do tamanho de trinca	56
3.4.4. Cálculo de J	56

3.4.5. Curva R	58
4. Resultados e discussão	59
4.1. Propriedades mecânicas de tração	59
4.2. Medidas dos comprimentos de trincas	60
4.3. Registros Carga versus CMOD	67
4.4. Curvas de resistência à fratura	72
4.4.1. Determinação de J e Δa experimentais	72
4.4.2. Curvas R dos corpos de prova SE(B)_5 e SE(B)_6	81
4.5. Análise fractográfica	87
5. Conclusões	90
6. Sugestões para trabalhos futuros	91
7. Referências bibliográficas	92

Lista de Figuras

Figura 1 - Comportamento tensão versus deformação de material dúctil.	22
Figura 2 - Representação esquemática do mecanismo de crescimento de trinca para uma fratura dúctil: (a) Estado inicial, (b) Crescimento de vazios na ponta da trinca, (c) Coalescência dos vazios com a ponta da trinca. (ANDERSON, 2005)	23
Figura 3 - Representação da abertura da ponta da trinca (CTOD). (FONTES, 2014)	26
Figura 4 - Estimativa CTOD considerando o modelo de Dugdale. (ANDERSON, 2005)	27
Figura 5 - Ilustração do comportamento tensão versus deformação de material elástico não linear e elasto-plástico.	28
Figura 6 - Contorno arbitrário no sentido anti-horário ao redor da ponta da trinca. (ZHU <i>et al</i> , 2012)	29
Figura 7 - Taxa de liberação de energia não linear. (ANDERSON, 2005)	31
Figura 8 - Curva de resistência à fratura esquemática para material dúctil. (ANDERSON, 2005)	35
Figura 9 - Representação dos corpos de prova para ensaios de tenacidade à fratura: Normalizados pela ASTM E1820 (a) SE(B), (b) C(T), (c) DC(T) (ANDERSON, 2005); Normalizado pela DNV-RP-F108 (d) SE(T) (SILVA, 2018).	36
Figura 10 - Método "Unloading Compliance". (MEDINA, 2014)	38
Figura 11 - Curva J-R típica com os limites de J_{max} e Δa_{max} . (ASTM E1820, rev. 2017)	39
Figura 12 - Região de dados qualificados da Curva J-R. (MEDINA, 2014).	41
Figura 13 - Corpo de prova de tração: (a) Dimensões em mm, (b) Corpo de prova de tração usinado.	43
Figura 14 - Máquina Instron 5500R: (a) Visão geral da máquina; (b) Detalhe do corpo de prova e extensômetro fixados durante ensaio.	44

Figura 15 – Corpo de prova SE(B): (a) Dimensões recomendadas (adaptado de ASTM E1820, rev. 2017), (b) Corpo de prova SE(B)_5 usinado.	45
Figura 16 – Visão geral da Máquina Instron 8502 com corpo de prova SE(B)_1 posicionado para ensaio de fadiga.	47
Figura 17 - Programação esquemática para controle de carga realizada na máquina INSTRON 8502.	49
Figura 18 - Montagem do corpo de prova SE(B)_1 com <i>strain gage</i> na boca do entalhe.	50
Figura 19 – Ilustração esquemática de curva carga versus CMOD com descarregamento parcial.	51
Figura 20 - Corpos de prova SE(B)_2, SE(B)_4 e SE(B)_6 após oxidação em forno elétrico.	51
Figura 21 - Microscópio Eletrônico de Varredura modelo JSM-6510LV.	52
Figura 22 – Ilustração da medição da pré-trinca de fadiga e propagação de trinca.	54
Figura 23 - Ilustração sobre a identificação das cargas máximas e mínimas de cada rampa (SILVA, 2018).	55
Figura 24 - Curvas Tensão versus Deformação do aço DIN 42CrMo4.	59
Figura 25 - Medição do tamanho médio de trinca de fadiga do corpo de prova SE(B)_1 (Realizada por MEV).	61
Figura 26 - Medida da propagação estável de trinca do corpo de prova SE(B)_1 (Realizada por MEV).	61
Figura 27 - Medição do tamanho médio de trinca de fadiga do corpo de prova SE(B)_2 (Realizada por MEV).	62
Figura 28 - Medida da propagação estável de trinca do corpo de prova SE(B)_2 (Realizada por MEV).	62
Figura 29 - Medição do tamanho médio de trinca de fadiga do corpo de prova SE(B)_3 (Realizada por MEV).	63
Figura 30 - Medida da propagação estável de trinca do corpo de prova SE(B)_3 (Realizada por MEV).	63
Figura 31 - Medição do tamanho médio de trinca de fadiga do corpo de prova SE(B)_4 (Realizada por MEV).	64

Figura 32 - Medição do tamanho médio de trinca de fadiga do corpo de prova SE(B)_5 (Realizada por microscopia óptica).	64
Figura 33 - Medida da propagação estável de trinca do corpo de prova SE(B)_5 (Realizada por MEV).	65
Figura 34 - Medição do tamanho médio de trinca de fadiga do corpo de prova SE(B)_6 (Realizada por microscopia óptica).	65
Figura 35 - Medida da propagação estável de trinca do corpo de prova SE(B)_6 (Realizada por MEV).	66
Figura 36 - Curva carga versus CMOD do corpo de prova SE(B)_1.	67
Figura 37 - Curva carga versus CMOD do corpo de prova SE(B)_2.	68
Figura 38 - Curva carga versus CMOD do corpo de prova SE(B)_3.	68
Figura 39 - Curva carga versus CMOD do corpo de prova SE(B)_4.	69
Figura 40 - Curva carga versus CMOD do corpo de prova SE(B)_5.	71
Figura 41 - Curva carga versus CMOD do corpo de prova SE(B)_6.	71
Figura 42 - <i>Compliance</i> médio em função da geometria do corpo de prova.	79
Figura 43 - J em função de Δa para o corpo de prova SE(B)_1.	81
Figura 44 - J em função de Δa para o corpo de prova SE(B)_2.	82
Figura 45 - J em função de Δa para o corpo de prova SE(B)_3.	82
Figura 46 – Curva de resistência para o corpo de prova SE(B)_5: Limites máximos de J e Δa .	83
Figura 47 – Curva de resistência para o corpo de prova SE(B)_5: Linhas de construção, exclusão à 0,15 mm, offset 0,2 mm, offset 0,5 mm e de exclusão a 1,5 mm.	83
Figura 48 – Curva de resistência para o corpo de prova SE(B)_5: Determinação de J_{IC} .	84
Figura 49 – Curva de resistência para o corpo de prova SE(B)_6: Limites máximos de J e Δa .	85
Figura 50 – Curva de resistência para o corpo de prova SE(B)_6: Linhas de construção, exclusão à 0,15 mm, offset 0,2 mm, offset 0,5 mm e de exclusão a 1,5 mm.	85
Figura 51 – Curva de resistência para o corpo de prova SE(B)_6: Determinação de J_{IC} .	86

Figura 52 – Fractografia da superfície do corpo de prova SE(B)_6: Ampliação de 50x interface entre pré-trinca de fadiga, propagação de trinca e fratura frágil. 88

Figura 53 – Fractografia da superfície do corpo de prova SE(B)_6: Ampliação de 800x sobre a propagação de trinca. 88

Figura 54 – Superfície do corpo de prova SE(B)_4: Ampliação de 8x. 89

Figura 55 - Fractografia da superfície do corpo de prova SE(B)_4: Ampliação de 400x. 89

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Composição química do aço DIN 42CrMo4 conforme recebido.	42
Tabela 2 - Dimensões dos corpos de prova SE(B).	45
Tabela 3 - Comprimento de trinca inicial pretendido: $a_0 = a_{entalhe} + a_{fadiga}$	46
Tabela 4 - Cargas utilizadas por corpo de prova no pré-trincamento por Fadiga.	48
Tabela 5 – Taxas de descarregamento aplicadas aos corpos de prova.	49
Tabela 6 - Propriedades mecânicas de tração do aço DIN 42CrMo4.	60
Tabela 7 - Dados das medições das pré-trincas de fadiga, tamanho inicial das trincas e valores médios da propagação estável de trinca.	66
Tabela 8 - Carga máxima de obtida no ensaio de tenacidade à fratura dos corpos de prova SE(B)_1, SE(B)_2, SE(B)_3 e SE(B)_4.	70
Tabela 9 – Valores de J e Δa obtidos para o corpo de prova SE(B)_1.	73
Tabela 10 – Valores de J e Δa obtidos para o corpo de prova SE(B)_2.	74
Tabela 11 – Valores de J e Δa obtidos para o corpo de prova SE(B)_3.	75
Tabela 12 – Valores de J e Δa obtidos para o corpo de prova SE(B)_5.	76
Tabela 13 – Valores de J e Δa obtidos para o corpo de prova SE(B)_6.	77
Tabela 14 - Valores médios de compliance por ensaio.	79
Tabela 15 - Tamanho de trinca inicial mensurado e calculado na primeira “rampa”.	80
Tabela 16 – Propagação de trinca mensurado e calculada.	80
Tabela 17 - Valores de J_{IC} para os corpos de prova SE(B)_5 e SE(B)_6.	87

Lista de Abreviaturas

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ASTM	<i>American Society Testing and Materials</i>
CMOD	<i>Crack Mouth Opening Displacement</i>
C(T)	Corpo de prova compacto de tração para ensaio de tenacidade à fratura
CTOD	<i>Crack Tip Opening Displacement</i>
DC(T)	Corpo de prova compacto de tração em forma de disco para ensaio de tenacidade à fratura
DEQM	Departamento de Engenharia Química e de Materiais
DIN	Deutsches Institut für Normung
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MFEP	Mecânica da Fratura Elasto-Plástica
MFLE	Mecânica da Fratura Elasto-Plástica
LRM	Limite de Resistência Mecânica
SE(B)	Corpo de prova de flexão em três pontos para ensaio de tenacidade à fratura
SE(T)	Corpo de prova de tração para ensaio de tenacidade à fratura

Lista de Símbolos

\mathcal{G}	Taxa de liberação de energia
K	Fator elástico de intensidade de tensões
δ	CTOD
δ_c	Valor crítico de abertura da ponta da trinca
σ_{LE}	Tensão de escoamento do material
E	Módulo de elasticidade
a	Comprimento de trinca
σ	Tensão aplicada
K_I	Fator de intensidade de tensão no modo I de carregamento
σ_0	Tensão de referência
ε	Deformação
ε_0	Deformação de referência
α	constante adimensional
n	Expoente de encruamento do material
J	Integral J
w	Densidade de energia de deformação
T_i	Vetor tração normal
Γ	Contorno arbitrário
u_i	Vetor deslocamento
σ_{ij}	Tensor tensão
ε_{ij}	Tensor deformação
n_j	Componente unitária
Π	Energia potencial
A	Área da trinca
U	Energia de deformação
F	Trabalho realizado por força externa
I_n	Constante de integração dependente de n
r	Distância radial a partir da ponta da trinca

Θ	Ângulo polar sobre a trinca
σ_{ij}^{\sim} e ε_{ij}^{\sim}	Funções adimensionais dependentes de n e Θ
d_n	Constante adimensional dependente de n e da relação σ_0/E
J_{IC}	Valor de J crítico
B	Espessura do corpo de prova
W	Largura do corpo de prova
L	Comprimento do corpo de prova
$C_{(i)}$	<i>Compliance</i> na posição i
Δa	Propagação de trinca
b_0	Ligamento remanescente à frente da ponta da trinca
σ_y	Média entre o σ_{LE} e o LRM do material
Δa_{max}	Máxima extensão de trinca
J_{max}	Valor máximo de J
C_1 e C_2	Coeficientes de potência
J_q	Valor de J candidato à tenacidade de iniciação
Φ_f	Diâmetro final do corpo de prova de tração
$a_{entalhe}$	Comprimento do entalhe usinado
a_{fadiga}	Comprimento da trinca de fadiga idealizada
a_0	Comprimento de trinca inicial idealizado
P	Carga
$P_{m\acute{a}x}$	Carga máxima de pré-trincamento por fadiga
$P_{m\acute{i}n}$	Carga mínima de pré-trincamento por fadiga
S	Distância entre apoios para o corpo de prova
J_{el}	Componente elástica de J
J_{pl}	Componente plástica de J
$a_{(i)}$	Comprimento da trinca na posição i pelo método <i>Compliance</i>
$a_{(i-1)}$	Comprimento da trinca na posição anterior
$A_{pl(i)}$	Área plástica na posição i
$A_{pl(i-1)}$	Área plástica na posição anterior
a_{real_fadiga}	Comprimento da trinca de fadiga mensurada
a_{real_0}	Comprimento da trinca inicial mensurada
$a_{calculado_0}$	Comprimento da trinca inicial obtido pelo método <i>Compliance</i>

Δa_{real}	Propagação de trinca mensurada
Δa_{total}	Propagação de trinca obtida pelo método <i>Compliance</i>
a_{0c}	Comprimento de trinca inicial obtido pelo método <i>Compliance</i>
u	Variável dependente da geometria do corpo de prova, módulo de elasticidade do material e do valor de <i>compliance</i>
$f\left(\frac{a_{(i)}}{W}\right)$	Função dependente de $a_{(i)}/W$
$\Delta a_{(i)\text{inc}}$	Propagação de trinca incremental a cada rampa

1. Introdução

A Mecânica da Fratura dos materiais é fundamental para a avaliação da resistência à fratura de componentes contendo defeitos ou trincas, sem que este venha a falhar, mediante o estudo da relação entre a tensão aplicada, comprimento da trinca e as propriedades de tenacidade à fratura do material.

Para a maioria dos materiais metálicos estruturais, o aumento da plasticidade na região da ponta da trinca com o aumento do carregamento da estrutura representa, genericamente, a dissipação do trabalho das forças externas na forma de energia de deformação plástica. Como consequência, uma estrutura em aço dúctil contendo um defeito, suporta elevados níveis de carga mesmo após a iniciação e propagação estável da trinca.

As propriedades de resistência à fratura dos materiais sob estas condições são geralmente abordadas pela Mecânica da Fratura Elasto-Plástica. Nesse contexto, os valores de tenacidade à fratura devem ser avaliados mediante parâmetros elasto-plásticos, sendo os mais importantes a Integral J e o CTOD.

A descrição da tenacidade à fratura de um determinado material pode ser realizada através das curvas de resistência à fratura, ou curvas R, na qual os descritores elasto-plásticos J ou CTOD são dispostos em função do comprimento da trinca e o valor crítico para a iniciação da propagação estável de trinca pode ser determinado.

Este trabalho objetiva o estudo do comportamento à fratura do aço 42CrMo4 através da determinação experimental de curvas de resistência ao crescimento de trincas. O método dos descarregamentos parciais (*Unloading Compliance Method*) foi utilizado para a obtenção das curvas carga versus CMOD, em espécimes SE(B) de diferentes geometrias e razão $a/W = 0,5$. Em seguida, foram obtidas curvas R utilizando o parâmetro elasto-plástico J e os valores de iniciação estável do crescimento de trinca foram determinados.

O presente estudo está dividido em quatro partes. No capítulo 2 realizam-se referências bibliográficas sobre a Mecânica da Fratura, introduzindo seus conceitos fundamentais, Mecânica da Fratura Elasto-Plásticas e descrição das curvas de resistência à fratura. No capítulo 3, apresentam-se o material e métodos utilizados para o desenvolvimento do estudo. Os resultados dos ensaios encontram-se no capítulo 4. Por fim, as conclusões e sugestões para trabalhos futuros, que se encontram nos capítulos 5 e 6, respectivamente. As referências bibliográficas estão no capítulo 7.

2. Revisão bibliográfica

Neste capítulo serão abordados conceitos e definições relacionados à Mecânica da Fratura, em especial a Mecânica da Fratura Elasto-Plástica, os quais serão utilizados no desenvolvimento do trabalho.

2.1. Conceitos fundamentais da Mecânica da Fratura

Por mais controlada que seja a fabricação de componentes estruturais, defeitos aparecem de formas variadas, adicionalmente aqueles inerentes ao próprio material. Em algumas condições de utilização, um defeito, mesmo com dimensões bastante pequenas, pode levar a uma falha catastrófica do componente.

A Mecânica da Fratura é a ferramenta que permite prever a fratura de componentes contendo defeitos ou trincas, mediante o estudo da relação entre a tensão aplicada, comprimento da trinca e as propriedades de fratura do material. Esta ciência se difere, portanto, da mecânica clássica, a qual avalia a resistência do material em função da tensão aplicada e certos limites de resistência (como por exemplo, nos metais, o limite de escoamento). Os conceitos inseridos na abordagem da Mecânica da Fratura trouxeram grandes avanços, permitindo uma quantificação mais precisa dos níveis admissíveis de operação de um componente trincado, sem que este venha a falhar.

Esta ciência divide-se em:

- Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE);
- Mecânica da Fratura Elasto-Plástica (MFEP).

A primeira, base conceitual da Mecânica da Fratura, resolve as limitações dos conceitos tradicionais de resistência dos materiais quanto à presença de trincas e normalmente é utilizada em condições em que a fratura ocorre ainda no regime linear-elástico. Isso significa que a Mecânica da Fratura Linear Elástica é a metodologia a ser empregada em situações onde existe possibilidade de haver fratura sem que aconteça extensa deformação plástica (MEDINA, 2014).

A Mecânica da Fratura Elasto-Plástica, por sua vez, estende a aplicação dos critérios da Mecânica da Fratura Linear Elástica para materiais nos quais uma zona plástica de tamanho significativo em relação às dimensões da peça invalida as considerações de tensões elásticas na ponta da trinca controlando o processo de fratura (MEDINA, 2014).

2.1.1. Ductilidade

A ductilidade é definida como medida da capacidade do material em experimentar deformações plásticas antes de ocorrer ruptura. De maneira geral, um material que experimenta pouca ou mesmo nenhuma deformação plástica antes de se romper, é chamado de frágil. Por outro lado, o material que apresenta uma deformação plástica considerável antes da ruptura é chamado de dúctil. Materiais de engenharia podem fraturar de maneira dúctil ou frágil, dependendo do tipo de carregamento, taxa de deformação, condições ambientais, temperatura e microestrutura.

2.1.1.1. Fratura Dúctil

A figura 1 ilustra esquematicamente o comportamento à tração uniaxial de um metal dúctil. Em um dado momento o material alcança seu limite de resistência mecânica, onde o endurecimento por deformação não consegue acompanhar a diminuição da área da seção transversal e uma região de *empescoamento* se forma além da carga máxima.

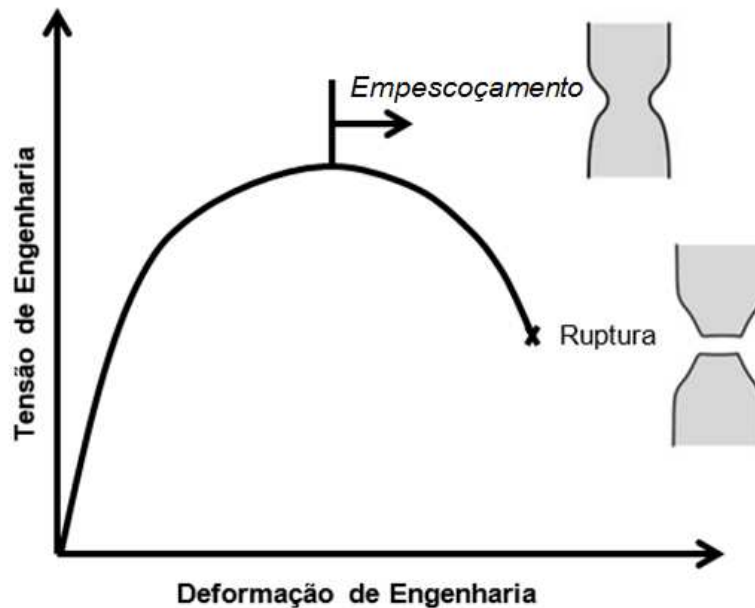


Figura 1 - Comportamento tensão versus deformação de material dúctil.

Os estágios comumente observados na fratura dúctil são (ANDERSON, 2005):

- Formação de pequenas cavidades ou micro vazios em torno de uma partícula de segunda fase ou inclusão (*dimples*), por decoesão interfacial ou trincamento de partículas;
- Com o prosseguimento da deformação, ocorre crescimento dos vazios em torno da partícula, através de deformação plástica e tensão hidrostática;
- Em seguida há coalescência entre vazios adjacentes;
- Por fim, os micro vazios atingem um tamanho crítico e uma instabilidade plástica localizada se desenvolve entre eles, resultando na fratura.

Numa escala macroscópica, a aparência de uma superfície fraturada de maneira dúctil é irregular e fibrosa, indicativos de deformação plástica.

A figura 2 demonstra a iniciação, o crescimento e a coalescência de micro vazios na ponta de uma trinca preexistente. À medida que a estrutura trincada é submetida a carregamento, as tensões e deformações localizadas na ponta da trinca se tornam suficientes para nuclear vazios. Os vazios crescem quando ocorre o embotamento de trinca, e eventualmente eles são unidos a uma trinca principal. Com a continuidade deste processo, tem-se o crescimento de trinca.

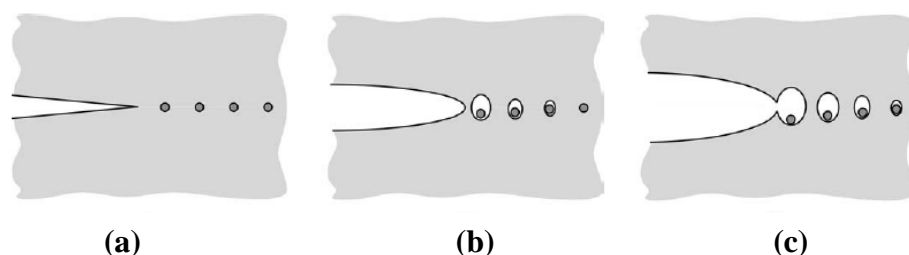


Figura 2 - Representação esquemática do mecanismo de crescimento de trinca para uma fratura dúctil: (a) Estado inicial, (b) Crescimento de vazios na ponta da trinca, (c) Coalescência dos vazios com a ponta da trinca. (ANDERSON, 2005)

2.1.1.2. Fratura Frágil

Na fratura frágil, onde se observa pouca ou nenhuma deformação plástica, as trincas podem se propagar de maneira brusca e rápida - uma vez que a mesma se inicia irá continuar espontaneamente sem precisar de um aumento na magnitude da tensão aplicada, podendo produzir falhas catastróficas nas estruturas em operação.

Os tipos de mecanismos que predominam neste tipo de fratura são a clivagem e a fratura intergranular. No primeiro caso, a propagação da trinca corresponde a uma ruptura sucessiva e repetida de ligações atômicas ao longo de um plano cristalográfico particular. Esse tipo de fratura é também chamado de transgranular, uma vez que as trincas da fratura passam através dos grãos. A fratura intergranular, que normalmente ocorre após processos que reduzem a resistência ou fragilizam as regiões dos contornos de grão, a propagação de trincas ocorre ao longo dos contornos de grão. (ANDERSON, 2005)

Macroscopicamente, a superfície da fratura frágil é granular, plana e reflexiva.

2.1.2. Tenacidade à fratura

A tenacidade de um material é definida como a capacidade do mesmo absorver energia até a ruptura. Na curva tensão versus deformação, a tenacidade pode ser representada pela área total sob a curva, indicando a quantidade de trabalho por unidade de volume que pode ser realizado no material sem que ocorra fratura.

Na Mecânica da Fratura, a tenacidade à fratura é definida como sendo a capacidade do material em resistir à propagação de uma trinca, medida pelo trabalho necessário para fazê-la crescer, e.g. em J/m^2 . Segundo Martins (MARTINS, 1985), a tenacidade também pode ser abordada sob os seguintes aspectos:

- Advertência: Em materiais tenazes é possível detectar uma trinca com ultrassom, por exemplo, e evitar a fratura. Isto se deve ao fato de que, em materiais tenazes a trinca possui crescimento estável;

- Imobilização da trinca: devido à capacidade do material tenaz em conter a propagação da trinca, a região em torno da ponta da trinca apresenta uma intensa deformação plástica. Desta maneira, pode-se concluir que a ruptura de materiais tenazes inclui sempre uma fase de crescimento estável de trinca, evitando assim falhas catastróficas;

- Estado e tipo de material: para um material de alta tenacidade submetido a condições de baixa temperatura ou sob radiação, a tensão normal crítica praticamente não é alterada, mas a tensão crítica de cisalhamento aumenta. Isto significa que a resistência do material pode ser maior, mas ocorre uma variação do comportamento do material no sentido de tenaz para frágil. Tal fragilização ocorre devida a mudanças estruturais no material, baixas temperaturas ou altas velocidades de aplicação de carga;

- Estado de tensões: mediante o estado de tensões que é aplicado, um material pode alterar completamente seu comportamento à fratura. Um estado triaxial de tensões de tração, por exemplo, implica na diminuição do nível das tensões cisalhantes que, por sua vez, leva a um decréscimo considerável na tenacidade do material.

2.2. Mecânica da Fratura Elasto-Plástica

Segundo Anderson (ANDERSON, 2005), os estudos sobre a Mecânica da Fratura foram desenvolvidos no início do século XX quando Griffith (GRIFFITH, 1920) formulou uma teoria da fratura baseada em um simples critério energético. Segundo essa teoria, em materiais idealmente frágeis, a fratura ocorre quando a energia de deformação liberada for maior que a energia requerida para formar

uma nova superfície de trinca, à medida que a trinca avança de um comprimento infinitesimal.

Décadas depois, Irwin (IRWIN, 1956), propôs uma abordagem energética para a fratura que é essencialmente equivalente ao modelo de Griffith, porém numa forma mais conveniente de resolver problemas de engenharia. Irwin definiu a taxa de liberação de energia \mathcal{G} , que é uma medida da energia potencial armazenada no sistema por unidade de área de trinca. No ano seguinte, Irwin (IRWIN, 1957), partindo ainda das ideias de Griffith, mostrou que as tensões e deformações atuantes na ponta da trinca podem ser descritos por um único parâmetro – o fator elástico de intensidade de tensões, K .

Os conceitos abordados anteriormente se mostraram bastante adequados para descrever a resistência à fratura de alguns materiais, como cerâmicos e aços de elevada resistência, e estabeleceram as bases da Mecânica da Fratura Linear Elástica. Entretanto, para aços estruturais deformáveis, o fator K de intensidade de tensões não se apresenta como modelo descritor perfeitamente aplicável e, mesmo com propostas de diversos autores (IRWIN, 1961) (DUGDALE, 1960) (BARENBLATT, 1962) para correções em casos de plasticidade em pequena escala, estas análises continuavam restritas apenas a estruturas com comportamento global elástico linear.

Incentivados pelas indústrias náutica, nuclear e aeronáutica, que utilizam, sobretudo, aços dúcteis, em que o processo de fratura é precedido de deformações plásticas significativas e crescimento estável de trinca, novos esforços foram concentrados para desenvolver uma melhor aproximação da Mecânica da Fratura a esses materiais, surgindo assim a Mecânica da Fratura Elasto-Plástica.

O primeiro modelo com aceitação internacional caracterizando a MFEP foi proposto por Wells (WELLS, 1961), que visualizou a abertura da ponta da trinca como uma medida da tenacidade à fratura dos materiais e introduziu o parâmetro CTOD (*Crack Tip Opening Displacement*).

Alguns anos mais tarde, Rice (RICE, 1968), idealizando a deformação plástica como elástica não-linear, demonstrou que a taxa de liberação de energia não-linear pode ser expressa como uma integral de linha, chamada de Integral J , avaliada ao longo de um contorno arbitrário ao redor da ponta da trinca.

Shih (SHIH, 1981) demonstrou uma relação entre a Integral J e o CTOD, constatando que ambos os parâmetros são igualmente válidos para caracterizar a

fratura. Atualmente os dois parâmetros são aplicados em todo o mundo a uma variedade de materiais.

2.2.1. CTOD (*Crack Tip Opening Displacement*)

Enquanto examinava corpos de prova de fratura com uma deformação plástica além da prevista pela MFLE, Wells (WELLS, 1961) percebeu que as superfícies da trinca haviam se separado antes do processo de fratura, ou seja, a deformação plástica fez com que a trinca aguda original “embotasse”, conforme ilustrado na figura 3. Verificando que o grau de embotamento da trinca era proporcional à tenacidade do material, Wells propôs o deslocamento (ou abertura) da ponta da trinca como uma medida da tenacidade à fratura dos materiais, que ficou conhecido como CTOD (δ). A partir dessa definição, pode-se inferir que cada material possui um valor crítico de abertura da ponta da trinca (δ_c), a partir do qual há início do processo de fratura com a propagação da trinca.

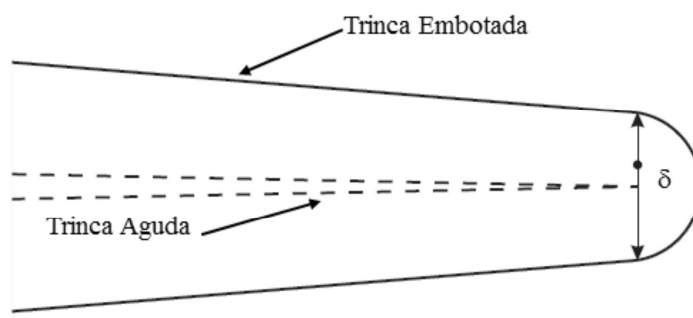


Figura 3 - Representação da abertura da ponta da trinca (CTOD). (FONTES, 2014)

Considerando uma trinca passante em uma placa infinita submetida a um estado plano de tensões, e utilizando o modelo de Dugdale (DUGDALE, 1960), figura 4, para o tamanho da zona plástica na ponta da trinca, Burdekin *et al* (1966) mostraram que o CTOD pode ser calculado pela eq. (1):

$$\delta = \frac{8 \sigma_{LE} a}{\pi E} \ln \sec \left(\frac{\pi \sigma}{2 \sigma_{LE}} \right) \quad (1)$$

Onde σ_{LE} é a tensão de escoamento do material, E o módulo de Young, a o comprimento da trinca e σ é a tensão aplicada na chapa infinita com trinca passante.

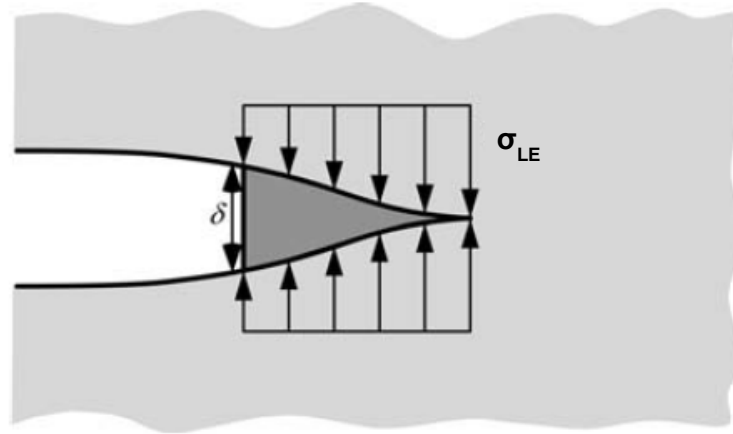


Figura 4 - Estimativa CTOD considerando o modelo de Dugdale. (ANDERSON, 2005)

Se a tensão aplicada na chapa é muito menor que a tensão de limite de escoamento do material ($\sigma \ll \sigma_{LE}$), tem-se uma situação de plasticidade em pequena escala e a eq. (1) se simplifica a:

$$\delta = \frac{K_I^2}{\sigma_{LE} E} \quad (2)$$

Sendo K_I o fator de intensidade de tensão no modo I de carregamento (abertura).

2.2.2. Integral J

A figura 5 ilustra o comportamento de tensão-deformação uniaxial de materiais elasto-plástico e elástico não linear. No carregamento, o comportamento de ambos os materiais é idêntico, mas as respostas ao descarregamento dos materiais se diferem. O material elasto-plástico segue um caminho de descarregamento linear, cuja inclinação é igual ao módulo de elasticidade, enquanto o material elástico não linear descarrega pelo mesmo caminho de carregamento. Existe uma relação única entre tensão e deformação para um material elástico, mas uma dada deformação no material elasto-plástico pode

corresponder a mais de um valor de tensão, caso o material seja descarregado ou carregado ciclicamente (ANDERSON, 2005).

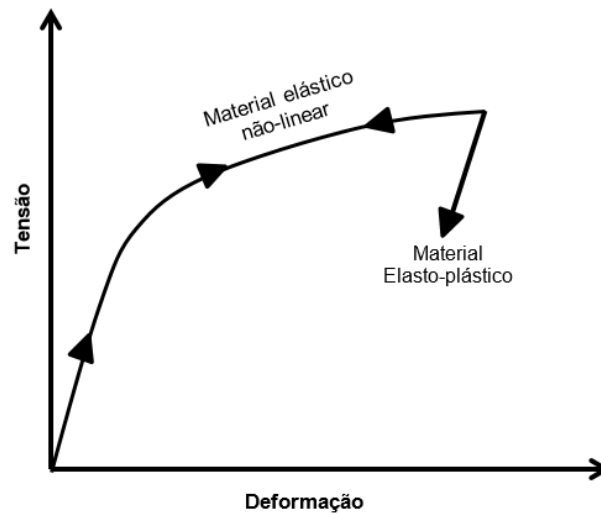


Figura 5 - Ilustração do comportamento tensão versus deformação de material elástico não linear e elasto-plástico.

Um material cujo comportamento é elasto-plástico pode ser idealizado como sendo elástico não linear, desde que o material seja carregado monotonicamente e que não haja descarregamento. Dessa maneira, o comportamento mecânico de um material elasto-plástico pode ser descrito pela equação de Ramberg-Osgood, que representa originalmente o comportamento de um material elástico não-linear:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (3)$$

Onde σ_0 é uma tensão de referência (usualmente limite de escoamento), ε_0 uma deformação de referência (σ_0/E), α é uma constante adimensional e n é o expoente de encruamento do material.

Idealizando a deformação elasto-plástica como elástica não linear, a integral J é definida como um parâmetro da MFEP que pode ser interpretada de duas maneiras: como uma taxa de liberação de energia ou um escalar que caracteriza a intensidade dos campos de tensão e deformação a frente da trinca.

2.2.2.1. J como uma integral de linha

Rice (RICE, 1968) provou que a taxa de liberação de energia em um corpo elástico não-linear contendo uma trinca poderia ser expressa como uma integral de linha independente do caminho de integração, a qual denominou integral J.

Considere um contorno arbitrário no sentido anti-horário (Γ) ao redor da ponta da trinca, como ilustrado na figura 6:

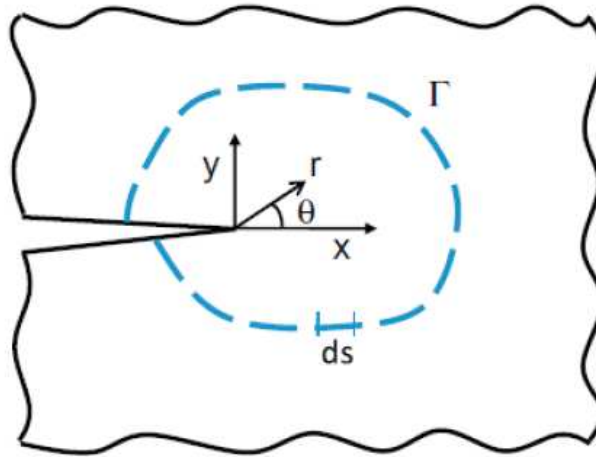


Figura 6 - Contorno arbitrário no sentido anti-horário ao redor da ponta da trinca. (ZHU *et al*, 2012)

A integral J, na sua forma puramente matemática, é definida pela eq. (4):

$$J = \int_{\Gamma} \left(w dy - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \right) \quad (4)$$

Sendo x e y coordenadas ortogonais, w a densidade de energia de deformação armazenada em qualquer ponto da área s , T_i o vetor tração normal à Γ , u_i o vetor deslocamento na direção x e ds um elemento diferencial ao longo do arco de Γ (ANDERSON, 2005).

A densidade de energia de deformação w é dada por:

$$w = \int_0^{\varepsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \quad (5)$$

Onde σ_{ij} e ε_{ij} são tensores de tensão e deformação, respectivamente.

As componentes da tração T_i são dadas pela eq. (6):

$$T_i = \sigma_{ij}n_j \quad (6)$$

Onde n_j são as componentes unitárias do vetor normal a Γ .

De acordo com Rice (RICE, 1968), a integral J independe da trajetória de integração escolhida, de maneira que o caminho da integração pode ser escolhido da forma mais adequada para simplificar os cálculos.

2.2.2.2. J como uma taxa de liberação de energia não linear

A definição de J também pode ser entendida como a taxa de liberação de energia num corpo elástico não linear contendo uma trinca (ANDERSON, 2005):

$$J = - \frac{d\Pi}{dA} \quad (7)$$

Onde Π é a energia potencial e A a área da trinca.

A energia potencial é dada pela diferença entre a energia de deformação armazenada no corpo (U) e o trabalho devido às forças externas (F):

$$\Pi = U - F \quad (8)$$

Considere uma placa com trinca e que exibe uma curva carga vs deslocamento não-linear, como ilustrado na figura 7:

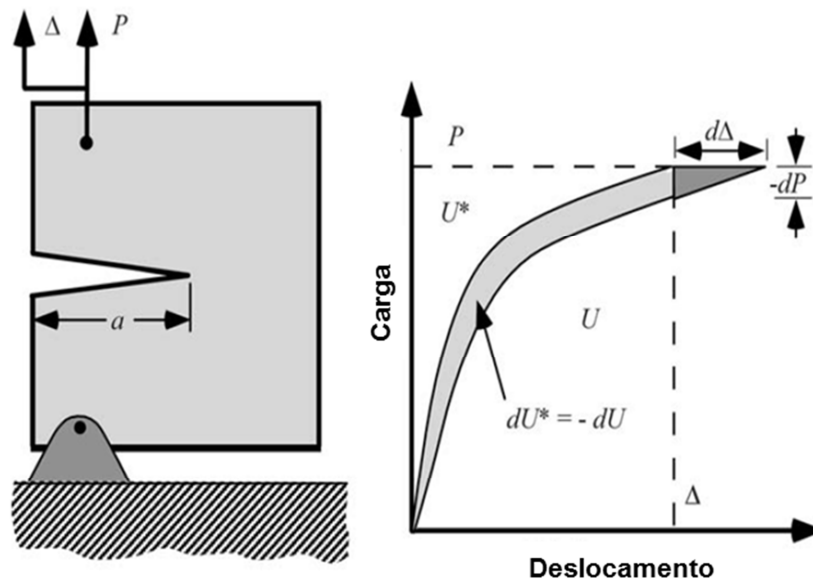


Figura 7 - Taxa de liberação de energia não linear. (ANDERSON, 2005)

Se a placa tem espessura unitária, então $A = a$ (sendo a o tamanho da trinca). Para controle de carga:

$$\Pi = U - PA = -U^* \quad (9)$$

Onde U^* é a energia de deformação complementar, definida como:

$$U^* = \int_0^P \Delta dP \quad (10)$$

Consequentemente, se a placa da figura 7 está sob controle de carga, J é dado por:

$$J = \left(\frac{dU^*}{da} \right)_P \quad (11)$$

Se a trinca avança com deslocamento fixo, $F = 0$ e J é dado por:

$$J = - \left(\frac{dU}{da} \right)_\Delta \quad (12)$$

De acordo com a figura 7, dU^* (controle de carga) difere-se de $-dU$ (controle de deslocamento) por uma quantidade de $(1/2 dPd\Delta)$, o que é muito pequeno se comparado a dU . Dessa maneira, J para controle de carga é igual a J com controle de deslocamento. Considerando as definições para U e U^* , pode-se expressar J em termos de carga e deslocamento (ANDERSON, 2005):

$$J = \left(\frac{\partial}{\partial a} \int_0^P \Delta dP \right)_P = \int_0^P \left(\frac{\partial \Delta}{\partial a} \right)_P dP \quad (13)$$

ou

$$J = - \left(\frac{\partial}{\partial a} \int_0^\Delta P d\Delta \right)_\Delta = - \int_0^\Delta \left(\frac{\partial P}{\partial a} \right)_\Delta d\Delta \quad (14)$$

Quando um material se comporta de maneira linear elástica, o cálculo de J é relativamente rápido e direto, pois J coincide com \mathcal{G} , e \mathcal{G} depende unicamente do fator de intensidade de tensões (K), conforme pode ser visto através da eq. (15):

$$J = G = \frac{K_I^2}{E(1-\nu^2)} \quad (15)$$

2.2.2.3. J como um parâmetro de intensificação de tensão

Hutchinson (HUTCHINSON, 1968) e Rice *et al* (1968), de maneira independente, demonstraram que a integral J é o parâmetro que controla o campo de tensões e deformações na ponta da trinca de um material elástico não-linear, descritos pela equação de Ramberg-Osgood, eq. (3). A solução, que ficou conhecida como Singularidade HRR, é definida pelas equações abaixo:

$$\sigma_{ij} = \sigma_0 \left(\frac{EJ}{\alpha \sigma_0^2 I_n r} \right)^{\frac{1}{n+1}} \tilde{\sigma}_{ij}(n, \theta) \quad (16)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\alpha \sigma_0}{E} \left(\frac{EJ}{\alpha \sigma_0^2 I_n r} \right)^{\frac{n}{n+1}} \tilde{\varepsilon}_{ij}(n, \theta) \quad (17)$$

Sendo I_n uma constante de integração dependente de n , r a distância radial a partir da ponta da trinca, Θ o ângulo polar sobre a trinca e σ_{ij} e ε_{ij} funções adimensionais exclusivamente dependentes de n e Θ .

Analisando a eq. (16), pode-se observar que, na região ao redor da ponta da trinca, as tensões variam proporcionalmente à $(1/r)^{1/(n+1)}$. Desta maneira, quando $r \rightarrow 0$, o valor dessas tensões se torna extremamente elevado, por outro lado, para valores de $r \rightarrow \infty$, as tensões se tornam praticamente nulas. Assim, o campo HRR é válido somente para uma determinada região: perde validade para grandes deformações (maiores que ~10%) e não considera o efeito do arredondamento da ponta da trinca.

2.2.3. Relação entre J e CTOD

Substituindo a eq. (15) na eq. (2), tem-se uma relação entre J e CTOD adequada para aplicação dentro dos limites da MFLE, considerando o estado plano de tensões:

$$\delta = \frac{J}{\sigma_{LE}} \quad (18)$$

Para regimes elasto-plásticos, uma solução foi proposta por Shih (SHIH, 1981), que avaliou os deslocamentos na ponta de uma trinca provenientes da solução HRR para relacionar CTOD com a integral J e as propriedades de escoamento do material:

$$\delta = \frac{d_n J}{\sigma_0} \quad (19)$$

Onde d_n é uma constante adimensional, fortemente dependente do coeficiente de encruamento do material (n) e da relação σ_0/E .

A eq. (19) indica que qualquer critério de fratura baseado em um valor crítico de J é análogo a um baseado em um valor crítico de CTOD, bem como o contrário.

2.3. Curvas de resistência à fratura

As curvas de resistência, ou curvas R , descrevem a resistência à fratura de um determinado material em função do comprimento da trinca. O conceito de curvas de resistência à fratura é atualmente bastante consolidado, sendo amplamente descrito e discutido em diversos textos, artigos e normas.

Materiais com comportamento elasto-plástico apresentam curvas de resistência descritas à fratura em termos dos parâmetros que quantificam a tenacidade à fratura nesse regime – integral J ou CTOD. Como esses dois parâmetros estão associados, o raciocínio para ambos é semelhante. O presente trabalho utiliza a integral J como parâmetro de fratura, desta maneira, a curva R e os procedimentos para sua determinação serão demonstrados em termos desse parâmetro.

A figura 8 ilustra esquematicamente uma curva de resistência à fratura típica de materiais dúcteis. Esses materiais apresentam crescimento estável e lento de trinca, acompanhado de considerável deformação plástica. Isso significa que ocorre certa resistência ao crescimento da trinca durante a extensão da mesma, devido à dissipação de energia por deformação plástica em torno da ponta da trinca. No estágio inicial de deformação, a curva R é aproximadamente linear e existe um pequeno crescimento aparente da trinca devido ao embotamento. Com o acréscimo de J , ocorre um aumento da deformação plástica na ponta da trinca e, a partir de certo momento, a trinca avança. O valor de iniciação estável do crescimento da trinca é denominado J crítico (J_{IC}).

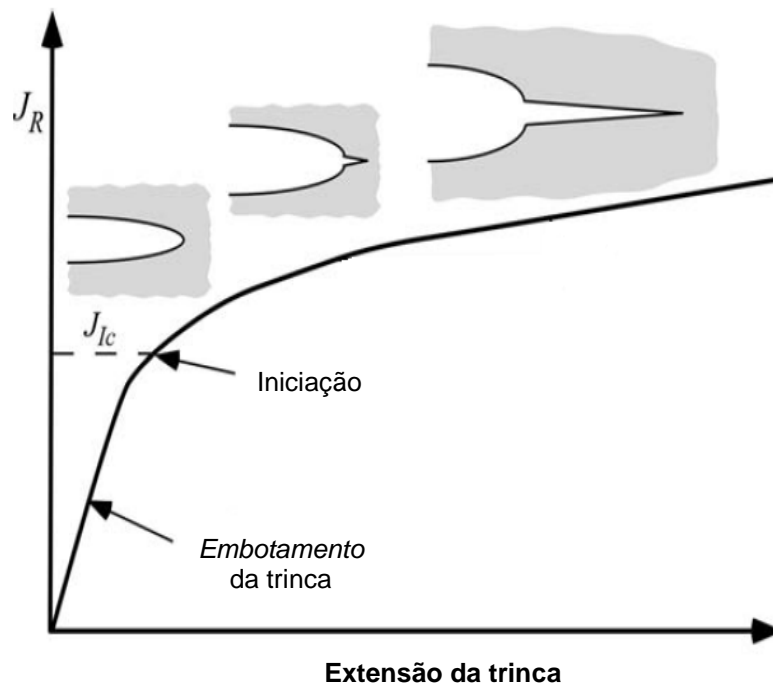


Figura 8 - Curva de resistência à fratura esquemática para material dúctil. (ANDERSON, 2005)

2.3.1. Procedimentos experimentais para obtenção de curvas R

Atualmente, diversas organizações mundiais publicam procedimentos normalizados para medição de J como parâmetro de tenacidade à fratura. Dentre essas, tem-se a ASTM (*American Society for Testing and Materials*) E1820, cujas orientações são utilizadas nesse trabalho.

Os tipos de corpos de prova utilizados para obtenção experimental de J pela ASTM E1820 são: Espécime entalhado submetido à flexão SE(B), Compacto de tração C(T) ou Compacto de tração em forma de disco DC(T), os quais estão representados na figura 9 (a), (b) e (c). Alguns estudos (CRAVERO, 2007) (ZHU, 2009), utilizam corpos de prova entalhados submetido à tração SE(T), figura 9 (d), normalizados pela DNV-RP-F108 (DNV-RP-F108, 2006), por apresentarem menor constrição plástica.

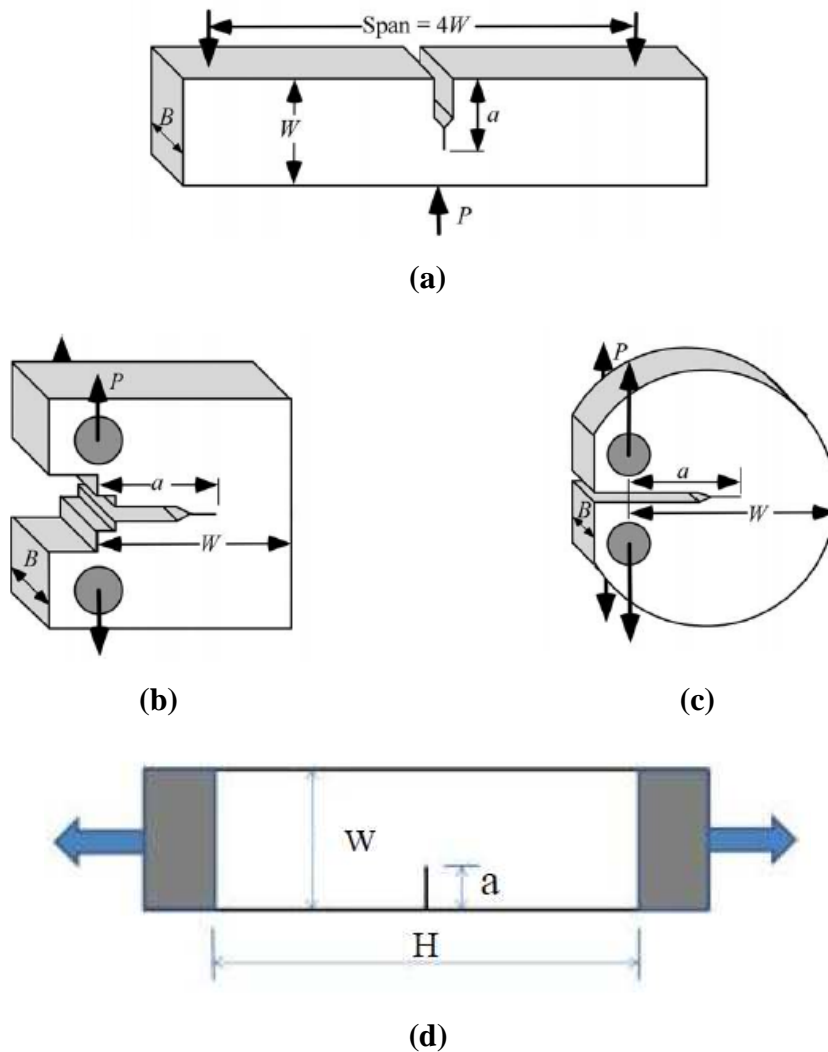


Figura 9 - Representação dos corpos de prova para ensaios de tenacidade à fratura: Normalizados pela ASTM E1820 (a) SE(B), (b) C(T), (c) DC(T) (ANDERSON, 2005); Normalizado pela DNV-RP-F108 (d) SE(T) (SILVA, 2018).

Na figura 9, B é a espessura do corpo de prova, W é a largura dos corpos de prova SE(B) e SE(T) e a distância entre a linha de carga P e a borda oposta à linha de carga dos espécimes dos tipos C(T) e DC(T), a é o comprimento total da trinca, S é a distância entre os apoios para o corpo de prova no SE(B) e H no é a distância entre os pontos de aplicação da carga no corpo de prova SE(T).

A ASTM E1820 apresenta duas alternativas para determinação da curva J-R, apresentada nos subitens a seguir.

2.3.1.1. Método de múltiplos corpos de prova

O método multi corpos de prova foi o primeiro procedimento desenvolvido para se determinar a curva R de um material, proposto por Begley *et al* (1972) a partir da interpretação de J como uma taxa de liberação de energia.

O procedimento consiste em submeter uma série de corpos de prova idênticos a carregamento monotônico em níveis variados e depois descarregá-los. Desta maneira, diferentes quantidades de crescimento de trinca ocorrem nos vários espécimes. Cada corpo de prova é então fraturado após o ensaio e a extensão da trinca é medida. Além disso, um valor de J deve ser calculado para cada espécime ensaiado, de maneira a gerar a curva de resistência. É conveniente dividir J nas componentes elástica e plástica, sendo que a primeira é dependente de K e a segunda é função da área plástica sob a curva força versus deslocamento obtida durante o ensaio (ANDERSON, 2005).

Apesar do método multi corpos de prova ser relativamente simples, há desvantagens devido ao grande tempo necessário para o planejamento e execução dos ensaios em laboratório e da necessidade de uma maior quantidade de material.

2.3.1.2. Método do corpo de prova único

O método das descargas parciais (*Unloading Compliance*) é a técnica experimental que utiliza apenas um corpo de prova para a obtenção da curva de resistência.

O procedimento, representado na figura 10, consiste submeter o espécime à carregamento monotônico e realizar pequenos descarregamentos enquanto se determina a curva carga versus deslocamento (ou abertura) da boca do entalhe (CMOD - *Crack Mouth Opening Displacement*).

A inclinação ($1/C$) das linhas geradas durante o descarregamento parcial se relaciona com as medidas da flexibilidade elástica do corpo de prova. Desta maneira, pode-se calcular o comprimento da trinca em intervalos regulares de teste, através da medição da flexibilidade do espécime após o respectivo descarregamento parcial. Clarke (CLARKE, 1991) mostrou que pequenos descarregamentos ao longo do teste não interferem no resultado do ensaio, validando assim a utilização do método.

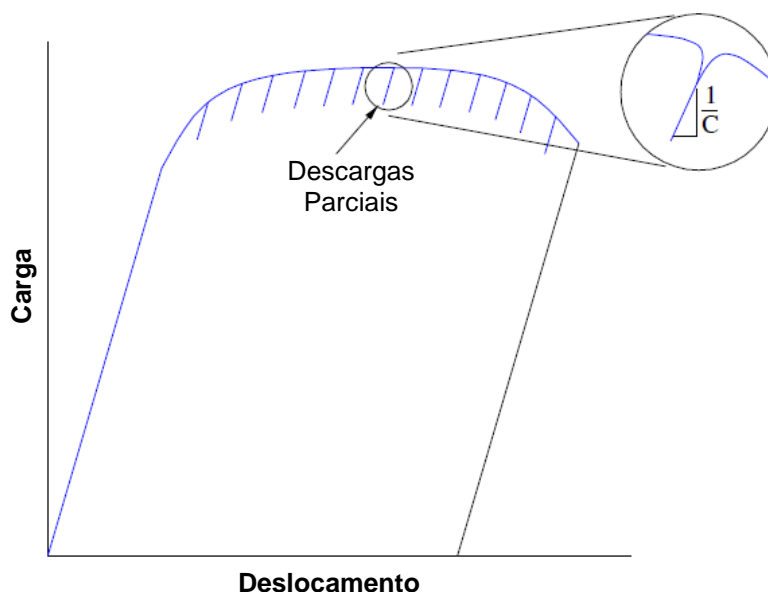


Figura 10 - Método "Unloading Compliance". (MEDINA, 2014)

Sendo possível estimar o comprimento de trinca a cada ponto de descarregamento através de sua inclinação, pode-se calcular o valor de J e obter n pares de “tenacidade-comprimento de trinca” que serão utilizados para a obtenção da curva de resistência. Para um dado ponto de medição i , onde $1 \leq i \leq n$, a norma ASTM E1820 define os fatores e expressões para o cálculo do comprimento da trinca e das parcelas elástica e plástica de J , em função do tipo de corpo de prova utilizado.

2.3.2. Avaliação das curvas R

Para a correta interpretação e utilização dos dados de J e Δa utilizados na para a construção da curva de resistência, a norma ASTM E1820 propõe a determinação de alguns limites e uso de linhas auxiliares, que serão abordados à seguir.

2.3.2.1. Determinação dos limites máximos de J e Δa

Os valores máximos de J e Δa representam os limites de capacidade para os corpos de prova, além dos quais J e Δa não descrevem mais o comportamento do material em teste.

Para Δa_{\max} ,

$$\Delta a_{\max} = 0,25 b_0 \quad (20)$$

Para J_{\max} , escolhe-se o menor valor entre as eq. (21) e eq. (22):

$$J_{\max} = \frac{b_0 \sigma_y}{10} \quad (21)$$

$$J_{\max} = \frac{B \sigma_y}{10} \quad (22)$$

Onde b_0 é o ligamento remanescente inicial do corpo de prova, dado por $b_0 = W - a_0$ e σ_y é a média entre o limite de escoamento e o limite de resistência mecânica (LRM) do material.

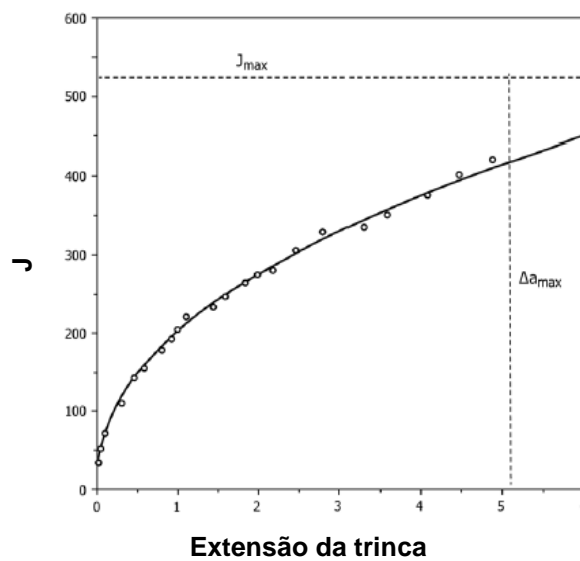


Figura 11 - Curva J-R típica com os limites de J_{\max} e Δa_{\max} . (ASTM E1820, rev. 2017)

2.3.2.2. Determinação de linhas auxiliares

Após traçar as linhas dos limites máximos de J e Δa , devem-se traçar as seguintes linhas auxiliares:

- Linha de construção: Essa linha deve ser traçada a partir da origem da curva J-R experimental, segundo a eq. (23).

$$J = 2 \sigma_y \Delta a \quad (23)$$

- Linhas de exclusão: São duas linhas paralelas à linha de construção, que cruzam o eixo das abcissas a 0,15 mm e a 1,5 mm. O valor Δa_{\min} é obtido pela interseção da linha de exclusão à 0,15 mm com a curva experimental de J. Os pontos no gráfico localizados à esquerda da linha de 0,15 mm são excluídos, pois estão relacionados à formação do arredondamento da ponta da trinca anterior à propagação, não representando um crescimento efetivo de trinca. Os valores experimentais que ficarem além de 1,5 mm também serão excluídos. Desta maneira, as linhas de exclusão garantem que os valores dos pontos experimentais da curva J-R estarão acima de Δa_{\min} e abaixo de Δa_{\max} .

- Linha “Offset 0,2”: A linha “Offset 0,2” é posicionada paralelamente à linha de construção a 0, 2mm no eixo das abcissas.

- Linha “Offset 0,5”: Linha paralela a linha de construção, cortando o eixo da extensão de trinca em 0,5 mm. Ao menos um ponto J- Δa deve-se situar entre a linha de exclusão de 0,15 mm e a linha “offset 0,5”.

Os dados aceitáveis estão representados na figura 12. Os pontos remanescentes, ou seja, localizados entre a linha de exclusão e os limites máximos de J e Δa , podem ser ajustados por meio de regressão que obedecem à lei de potência:

$$J = C_1 (\Delta a)^{C_2} \quad (24)$$

Onde o coeficiente de potência C_2 deve ser inferior a 1.0 mm.

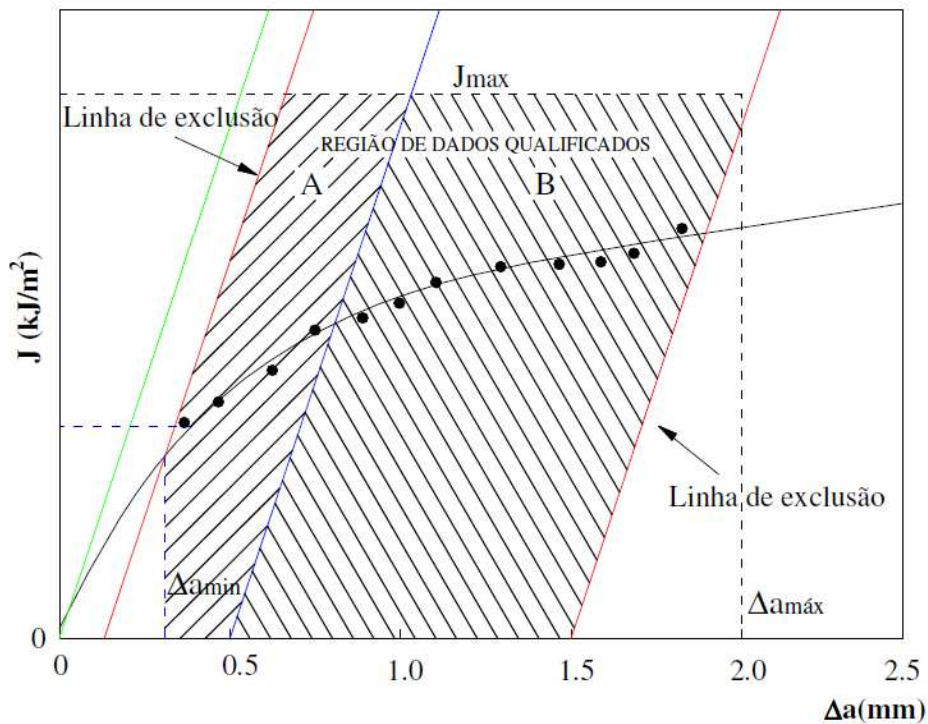


Figura 12 - Região de dados qualificados da Curva J-R. (MEDINA, 2014).

2.3.2.3. Determinação de J_{IC}

O valor candidato à tenacidade de iniciação J_Q é definido através da interseção da curva de regressão com linha “Offset 0,2”. Nota-se que este valor é obtido por meio de uma estimativa, de forma análoga à determinação do limite de escoamento em ensaios de tração. Tal valor candidato à tenacidade de iniciação J_Q será considerado um valor de tenacidade à fratura J_{IC} se: $B > 10^{J_Q/\sigma_y}$ e $b_0 > 10^{J_Q/\sigma_y}$.

3. Metodologia

Neste capítulo são apresentados o material, as técnicas e os parâmetros experimentais utilizados para atingir os objetivos propostos para esse trabalho. Os testes experimentais foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).

3.1. Material

O material utilizado foi o aço estrutural reconhecido pela DIN (*Deutsches Institut für Normung*) como 42CrMo4, fornecidos na forma de barra chata, cuja composição química encontra-se na tabela 1. Esse material foi escolhido em função da disponibilidade do mesmo na universidade.

Tabela 1 - Composição química do aço DIN 42CrMo4 conforme recebido.

C (%)	Mn (%)	Si (%)	Cu (%)	Cr (%)	V (%)	Mo (%)
0,38	0,85	0,27	0,18	0,97	0,01	0,2

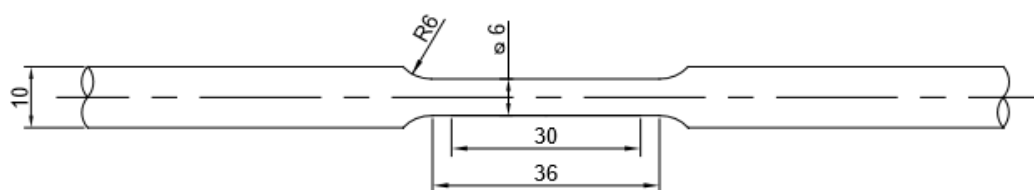
O aço DIN 42CrMo4 apresenta teores de carbono em torno de 0,4% em sua estrutura, sendo assim considerado um aço de médio carbono. Os principais elementos de liga adicionados são o cromo e o molibdênio, que auxiliam a capacidade de encruar do material e na sua elevada tenacidade. Seu equivalente AISI (*American Iron and Steel Institute*) é o aço 4140.

O aço DIN 42CrMo4 / AISI 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, armamentos, parafusos, equipamentos para petróleo, dentre outros (ROCHA, 2004).

3.2. Ensaio de tração

Para dar início aos procedimentos necessários para obtenção das curvas de resistência, foi necessário conhecer propriedades mecânicas do aço em estudo, obtidas através de ensaio de tração.

Desta maneira, três corpos de prova cilíndricos do aço DIN 42CrMo4 foram usinados segundo a norma ASTM E8M “*Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*” (ASTM E8M, 2016). A figura 13 apresenta a geometria preconizada e um dos corpos de prova utilizados usinado.



(a)



(b)

Figura 13 - Corpo de prova de tração: (a) Dimensões em mm, (b) Corpo de prova de tração usinado.

Os ensaios de tração foram realizados conforme a ASTM E8M (ASTM E8M, 2016). O procedimento foi realizado a temperatura ambiente (25 °C) na máquina INSTRON 5500R (figura 14 (a)), com capacidade de 100 kN.

Para acompanhamento da deformação durante o ensaio de tração, foi utilizado extensômetro com capacidade de abertura de 25 mm, posicionado na superfície do comprimento útil do corpo de prova (figura 14 (b)).

Utilizando as curvas tensão versus deformação obtidas nos ensaios, obteve-se os valores de limite de escoamento (a 0,2% de deformação) e limite de resistência mecânica. Os valores utilizados no desenvolvimento do trabalho foram os valores médios dos três corpos de prova.



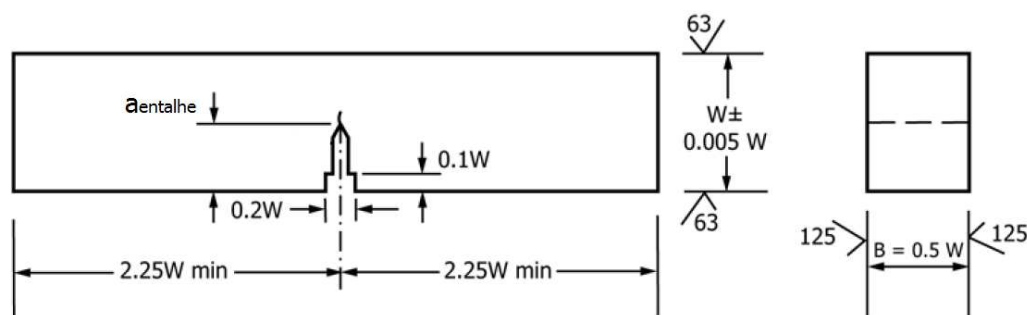
Figura 14 - Máquina Instron 5500R: (a) Visão geral da máquina; (b) Detalhe do corpo de prova e extensômetro fixados durante ensaio.

3.3. Ensaio de tenacidade à fratura

Conforme citado em 2.3.1, os procedimentos experimentais para a obtenção de curvas de resistência à fratura foram realizados segundo orientações da norma ASTM E1820 (ASTM E1820, rev. 2017).

3.3.1. Corpos de prova

Foram utilizados seis corpos de prova de fratura com geometria de flexão em três pontos SE(B), com o entalhe localizado no centro da amostra. A figura 15 apresenta a geometria e a tabela 2 apresenta as identificações e dimensões dos corpos de prova testados.



(a)



(b)

Figura 15 – Corpo de prova SE(B): (a) Dimensões recomendadas (adaptado de ASTM E1820, rev. 2017), (b) Corpo de prova SE(B)_5 usinado.

Tabela 2 - Dimensões dos corpos de prova SE(B).

Identificação dos corpos de prova	W (mm)	B (mm)	L (mm)	$a_{entalhe}$ (mm)
SE(B)_1	20	10	100	7
SE(B)_2	20	10	100	7
SE(B)_3	25	10	120	9,5
SE(B)_4	25	10	120	9,5
SE(B)_5	30	15	135	12
SE(B)_6	30	15	135	12

Sendo L o comprimento do corpo de prova e $a_{entalhe}$ o comprimento do entalhe usinado.

Nota-se que os corpos de prova SE(B)_3 e SE(B)_4 não estão em concordância com as dimensões propostas pela ASTM E1820. Os ensaios nesses corpos de prova tinham como objetivo a comparação dos resultados com os obtidos por SILVA (SILVA, 2018) em corpos de prova SE(T), cujas dimensões

são as mesmas desses corpos de prova. No entanto, SILVA (SILVA, 2018) não obteve resultados satisfatórios em seus ensaios com $a_0/W = 0,45$, impossibilitando o estudo pretendido.

3.3.2. Pré-trinca de fadiga

A norma ASTM E1820 preconiza que seja realizada uma pré-trinca sob condições de fadiga nos corpos de prova de fratura, uma vez que a experiência mostrou que é impraticável obter um entalhe mecanizado que irá simular uma trinca natural o suficiente para fornecer um resultado do teste de resistência à fratura satisfatório. O valor do tamanho da trinca inicial a_0 , que é a soma do comprimento do entalhe $a_{entalhe}$ e a trinca de fadiga a_{fadiga} , deve encontrar-se entre $0,45W$ e $0,7W$. Para todos os corpos de prova buscou-se uma trinca de fadiga que atingisse $a_0 = 0,5W$. Os comprimentos das trincas de fadiga encontram-se na tabela 3.

Tabela 3 - Comprimento de trinca inicial pretendido: $a_0 = a_{entalhe} + a_{fadiga}$

Identificação dos corpos de prova	$a_{entalhe}$ (mm)	a_{fadiga} (mm)	a_0 (mm)
SE(B)_1	7	3	10
SE(B)_2	7	3	10
SE(B)_3	9,5	3	12,5
SE(B)_4	9,5	3	12,5
SE(B)_5	12	3	15
SE(B)_6	12	3	15

Os corpos de prova SE(B) foram submetidos à fadiga em flexão em três pontos na máquina INSTRON 8502, com capacidade de 100 kN (figura 16). A carga máxima ($P_{m\acute{a}x}$) utilizada de pré-trincamento foi a determinada na norma:

$$P_m = \frac{0,5 B b_0^2 \sigma_y}{S} \quad (24)$$

Seguindo as exigências da norma ASTM E1820 e as recomendações de Joyce (JOYCE, 1996), a razão entre a carga mínima e a máxima aplicada em um ciclo foi mantida em 0,1 durante o pré-trincamento. Os valores de carga utilizados encontram-se na tabela 4.

O tamanho de trinca de fadiga pretendido foi marcado no corpo de prova com caneta esferográfica e o acompanhamento de seu crescimento foi realizado com auxílio de uma lupa, em ambos os lados do corpo de prova.



Figura 16 – Visão geral da Máquina Instron 8502 com corpo de prova SE(B)_1 posicionado para ensaio de fadiga.

Tabela 4 - Cargas utilizadas por corpo de prova no pré-trincamento por Fadiga.

Identificação dos corpos de prova	$P_{\text{máx}}$ (kN)	P_{min} (kN)
SE(B)_1	4,8	0,48
SE(B)_2	4,8	0,48
SE(B)_3	6,1	0,61
SE(B)_4	6,1	0,61
SE(B)_5	10,9	1,09
SE(B)_6	10,9	1,09

3.3.3. Curva Carga versus CMOD

Após o pré-trincamento por fadiga, os corpos de prova SE(B) foram carregados monotonicamente à fratura sob o modo de controle de carga na máquina INSTRON 8502. Esse modo de controle foi escolhido após a realização de pré-testes sem sucesso do modo de controle por deslocamento da boca da trinca.

O ensaio foi realizado em temperatura ambiente e utilizando a técnica de corpo de prova único através do método de descargas parciais (*Unloading compliance*, ver 2.3.1.2).

As sequências de carregamento e descarregamento durante o teste foram controladas pelo *software* da máquina de ensaio - BlueHill - a uma taxa de carregamento de 500 N/s. No entanto, a versão do *software* utilizada não permitia fazer todas as sequências diretamente, sendo necessária uma programação para tal que geram vários arquivos separadamente. A figura 17 ilustra esquematicamente a sequência utilizada e a descrição encontra-se a seguir:

- Preliminarmente carregou-se o corpo de prova até o valor de $P_{\text{máx}}$;
- Em seguida, realizou-se o primeiro incremento “x” (no valor de 0,5) de carga ao valor de $P_{\text{máx}}$;
- Após atingir o valor de $P_{\text{máx}} + xP_{\text{máx}}$, realizou-se descarregamento desse valor em 15% ou 25%, segundo a tabela 5;
- Alcançado o valor desejado de descarregamento, realizou-se outro carregamento até atingir novamente $P_{\text{máx}} + xP_{\text{máx}}$ seguido novamente de descarregamento desse valor em 15% ou 25%;

- Então, carregou-se novamente até $P_{\text{máx}} + xP_{\text{máx}}$, onde encerra-se um ciclo que será denominado “rampa” nesse trabalho;

- A partir daí, outra rampa com incremento “ $x + 0,02$ ” ao valor de $P_{\text{máx}}$ se iniciou e as etapas citadas anteriormente se repetiram. Desta maneira, a cada nova rampa, adicionou-se 0,02 ao incremento utilizado na rampa anterior.

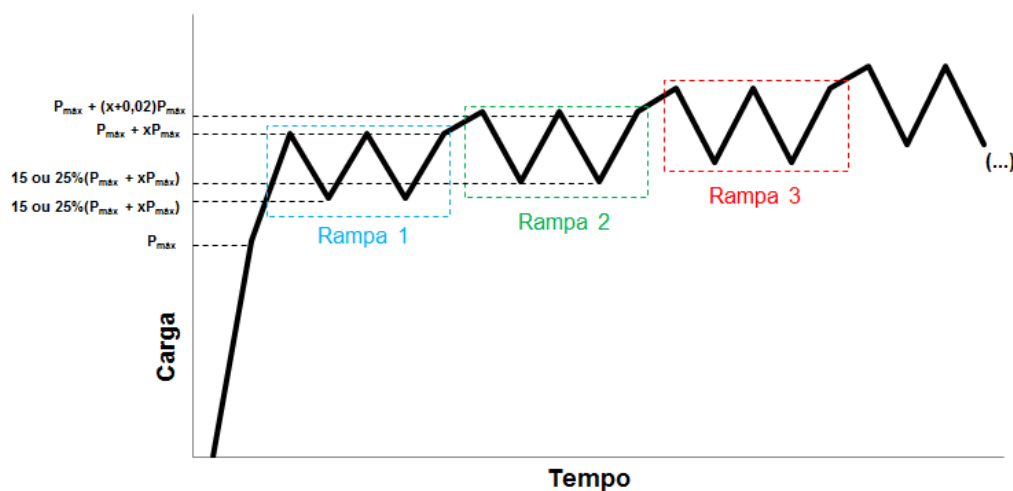


Figura 17 - Programação esquemática para controle de carga realizada na máquina INSTRON 8502.

O software permite a elaboração de cinco rampas por arquivo de programação. Dessa maneira, vários arquivos tiveram de ser elaborados para os ensaios e, conseqüentemente, foram obtidos diversos arquivos com os dados dos testes. Os incrementos aplicados bem como a quantidade total de rampas por ensaio variou de acordo com a plasticidade obtida no corpo de prova durante o teste.

Tabela 5 – Taxas de descarregamento aplicadas aos corpos de prova.

Identificação dos corpos de prova	Taxa de Descarregamento
SE(B)_1	15%
SE(B)_2	25%
SE(B)_3	15%
SE(B)_4	25%
SE(B)_5	15%
SE(B)_6	25%

A deformação da boca da trinca durante o ensaio foi medida com extensômetro tipo *strain gage* com capacidade de abertura de 2 mm. A figura 18 apresenta a montagem do corpo de prova SE(B)_1 na máquina com o *strain gage* posicionado na boca do entalhe.

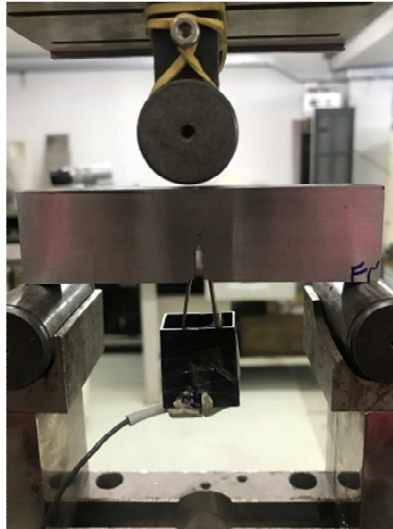


Figura 18 - Montagem do corpo de prova SE(B)_1 com *strain gage* na boca do entalhe.

Após cada ensaio, o valor de deformação do *strain gage* dado em mm/mm era convertido para deslocamento (mm) através de correlação feita com auxílio de um extensômetro de mesa. Obtêm-se assim os valores de CMOD do ensaio.

Como resultado de cada ensaio à fratura obteve-se a curva carga versus CMOD, conforme ilustração da figura 19, a partir da qual os dados foram tratados de maneira a encontrar a curva de resistência à fratura.

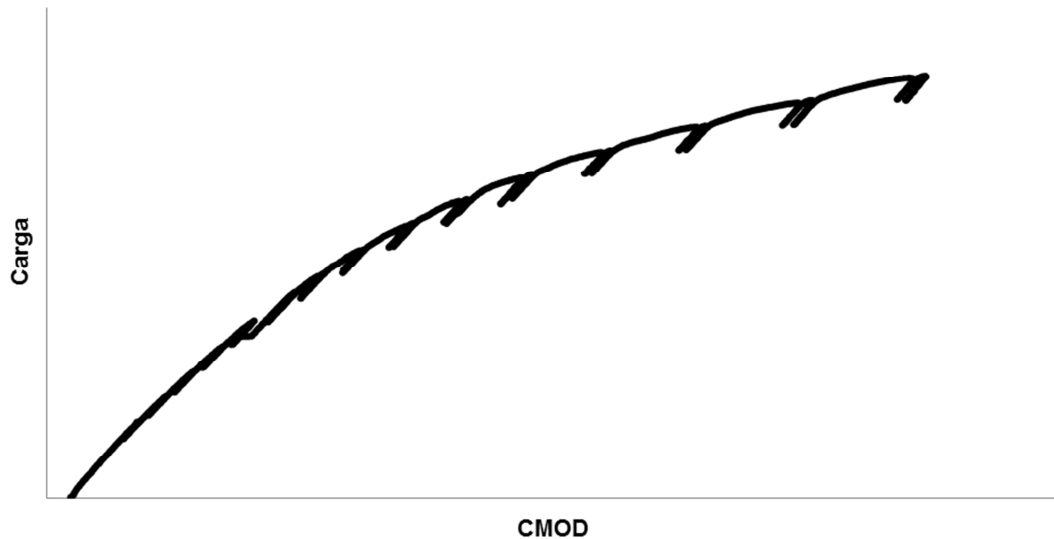


Figura 19 – Ilustração esquemática de curva carga versus CMOD com descarregamento parcial.

3.3.4. Fratura dos corpos de prova

Após os ensaios de tenacidade à fratura, os corpos de prova foram submetidos a um processo de oxidação para que a leitura da propagação de trinca fosse facilitada. Os espécimes foram colocados dentro de forno elétrico pré-aquecido, a uma temperatura em torno de 350 °C, onde foram mantidos por cerca de 30 minutos. A figura 20 mostra os corpos de prova SE(B)_2, SE(B)_4 e SE(B)_6 após oxidação.



Figura 20 - Corpos de prova SE(B)_2, SE(B)_4 e SE(B)_6 após oxidação em forno elétrico.

Em seguida ao resfriamento dos corpos de prova, os mesmos foram submergidos em um recipiente contendo nitrogênio líquido para fragilização.

Atingindo equilíbrio térmico, os espécimes foram retirados do recipiente e fraturados por impacto com auxílio de um martelo.

3.3.5. Análise fractográfica

De maneira a relacionar a presença ou ausência de aspectos fractográficos, os corpos de prova SE(B) fraturados foram analisados em um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), modelo JSM-6510LV (figura 21), com capacidade de ampliação de 300.000 vezes. A tensão do filamento utilizada nas análises foi de 30 kV.

Houve necessidade de seccionar os corpos de prova de forma que os mesmos coubessem na câmara à vácuo do equipamento. Com as amostras posicionadas para a análise, inicialmente foi realizada uma calibração para ajuste das superfícies fraturadas e o canhão de elétrons do equipamento. Concluída essa etapa, a câmara é fechada e os corpos de prova são submetidos ao vácuo, de maneira a otimizar a emissão do feixe de elétrons. Em seguida, diversas imagens de alta resolução da superfície de fratura dos corpos de prova foram obtidas, variando a ampliação.



Figura 21 - Microscópio Eletrônico de Varredura modelo JSM-6510LV.

3.3.6. Medidas dos comprimentos de trincas

Após a ruptura dos corpos de prova, a pré-trinca de fadiga real a_{real_fadiga} foi mensurada e calculada a partir da metodologia de cálculo de nove pontos equidistantes (eq. (25)). Utilizou-se para esse fim o MEV os para os corpos de prova SE(B)_1, SE(B)_2, SE(B)_3 e SE(B)_4, aproveitando o momento da análise fractográfica, e o microscópio SteREO Discovery V8 para os corpos de prova SE(B)_5 e SE(B)_6 que, devido ao seu tamanho, as trincas não puderam ser mensuradas por MEV.

$$a_{real_fadiga} = \frac{1}{8} \left[\frac{(a_1 + a_9)}{2} + \sum_{i=2}^8 a_i \right] \quad (25)$$

A propagação de trinca dúctil Δa_{real} , quando identificada, possuía valor muito pequeno e aparente somente no centro do corpo de prova. Sendo assim, a mesma foi medida por MEV com ampliação de 400x, em três pontos diferentes, não utilizando a preconização da ASTM E1820. O valor utilizado no estudo foi a média obtida:

$$\Delta a_{real} = \frac{(a_{p1} + a_{p2} + a_{p3})}{3} \quad (26)$$

A figura 22 ilustra esquematicamente as medições realizadas.

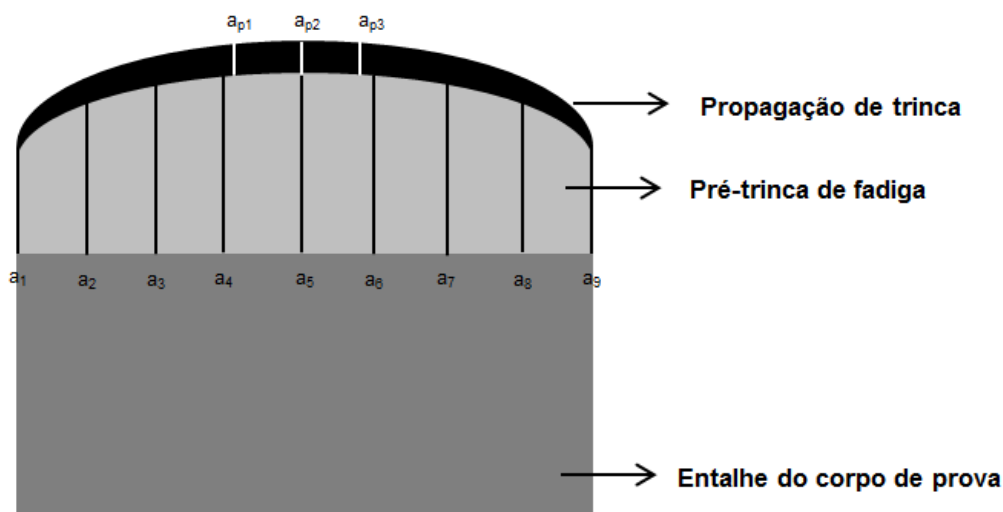


Figura 22 – Ilustração da medição da pré-trinca de fadiga e propagação de trinca.

3.4. Curvas de resistência à fratura

Possuindo as dimensões e relações geométricas do corpo de prova, medidas das trincas iniciais e finais (ver 3.3.5), pode-se iniciar o tratamento dos dados das curvas carga versus deslocamento (CMOD) obtidas durante os ensaios de tenacidade à fratura com o fim de se obter as curvas de resistência à fratura. O tratamento dos dados foi realizado em planilha eletrônica (Excel) utilizando as formulações da norma ASTM E1820 e os valores calculados encontram-se no capítulo 4. Os subitens a seguir descrevem os passos realizados para a determinação da curva R.

3.4.1. Identificação das cargas e CMOD das rampas

Para que o cálculo do *Compliance* pudesse ser realizado, inicialmente foram identificados os valores máximos e mínimos de carga (P1, P2, P3 e P4) para cada rampa e seus respectivos valores de CMOD (CMOD1, CMOD2, CMOD3 e CMOD4), conforme programado, utilizando o software OriginLab. Assim, para cada rampa, destacaram-se quatro pontos: Ponto 1, o valor mínimo de carga no descarregamento inicial da rampa, Ponto 2 o ponto máximo de carga no carregamento, Ponto 3 o mínimo de carga no segundo descarregamento e Ponto 4

o valor máximo de carga no último carregamento, antes de seguir para a próxima rampa. A ilustração a seguir identifica os pontos descritos.

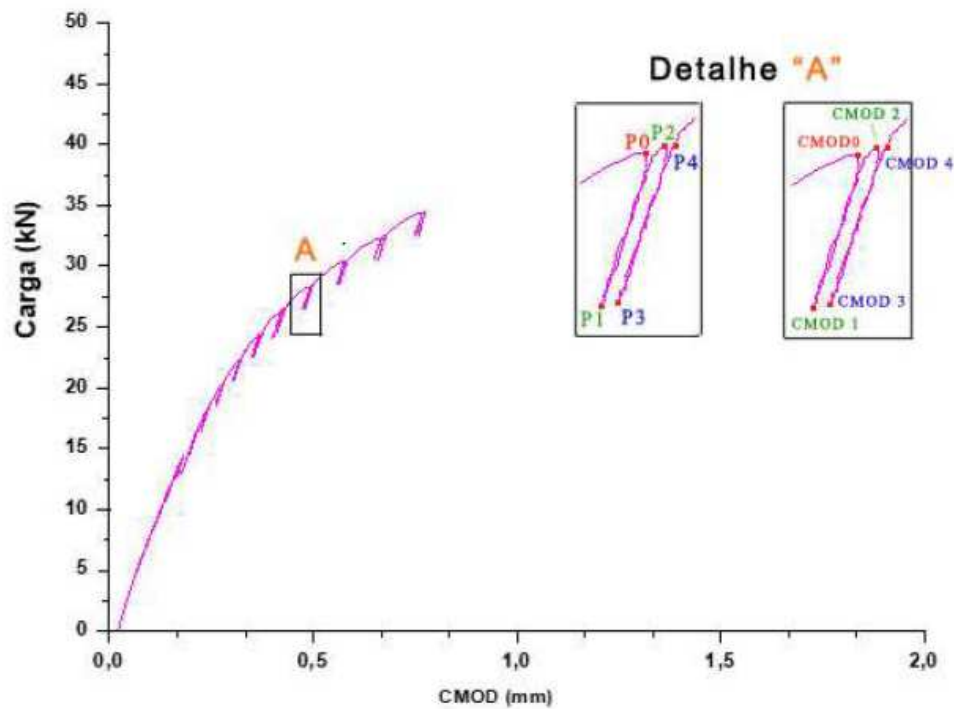


Figura 23 - Ilustração sobre a identificação das cargas máximas e mínimas de cada rampa (SILVA, 2018).

3.4.2. Cálculo dos valores de *compliance*

Uma vez identificados as cargas e os CMOD correspondentes a cada ponto da rampa, os valores de variação de carga e de deslocamento foram calculados conforme indicado pela ASTM E1820:

$$\Delta CMOD = \frac{(CMOD_2 - CMOD_1) + (CMOD_4 - CMOD_3)}{2} \quad (27)$$

$$\Delta P = \frac{(P_2 - P_1) + (P_4 - P_3)}{2} \quad (28)$$

Onde $CMOD_y$ e P_y correspondem ao valor de deslocamento da boca da trinca e a carga no ponto “y” (y variando de 1 a 4), respectivamente.

A flexibilidade elástica do corpo de prova pode então ser calculada para cada rampa i:

$$\frac{1}{C_{(i)}} = \left(\frac{\Delta P}{\Delta CMOD} \right)_{(i)} \therefore C_{(i)} = \left(\frac{\Delta CMOD}{\Delta P} \right)_{(i)} \quad (29)$$

Sendo $C_{(i)}$ o valor de *Compliance* (ver 2.3.1.2).

3.4.3. Determinação do tamanho de trinca

Para cada rampa i, onde se obteve um valor de *compliance* $C_{(i)}$, é possível determinar o valor do tamanho da trinca através da eq. (30):

$$\frac{a_{(i)}}{W} = [0,999748 - 3,9504u + 2,9831u^2 - 3,21408u^3 + 51,51561u^4 - 113,031u^5] \quad (30)$$

Onde u é uma variável dependente da geometria do corpo de prova, do módulo de elasticidade E do material e do valor de *compliance*, dado por:

$$u = \frac{1}{\left[\frac{B W E C_{(i)}}{S/4} \right]^{1/2} + 1} \quad (31)$$

3.4.4. Cálculo de J

O valor do parâmetro J é dividido nas componentes elástica e plástica e, assim como foi realizado para determinação do tamanho de trinca, um único valor de J é calculado por rampa.

$$J_{(i)} = J_{el(i)} + J_{pl(i)} \quad (32)$$

3.4.4.1. J elástico

A parte elástica de J é dependente do fator de intensidade de tensão K, coeficiente de Poisson ν e módulo de elasticidade. No estado plano de deformações, $J_{el(i)}$ é igual a:

$$J_{el(i)} = \frac{K_{(i)}^2 (1 - \nu^2)}{E} \quad (33)$$

Onde K_i é dado por

$$K_{(i)} = \left[\frac{P_{(i)} S}{B W^{3/2}} \right] f\left(\frac{a_{(i)}}{W}\right) \quad (34)$$

Sendo a função de $a_{(i)}/W$ dada pela eq. (35):

$$f\left(\frac{a_{(i)}}{W}\right) = \frac{3\left(\frac{a_{(i)}}{W}\right)^{1/2} \left[1,99 - \left(\frac{a_{(i)}}{W}\right) \left(1 - \frac{a_{(i)}}{W}\right) \left(2,15 - 3,93 \left(\frac{a_{(i)}}{W}\right) + 2,7 \left(\frac{a_{(i)}}{W}\right)^2 \right) \right]}{2 \left(1 + 2 \frac{a_{(i)}}{W} \right) \left(1 - \frac{a_{(i)}}{W} \right)^{3/2}} \quad (35)$$

Os valores de $a_{(i)}/W$ são os valores obtidos para cada rampa através da eq. (30).

3.4.4.2. J plástico

O valor de J plástico é determinado pela eq. (36) e dependente dos fatores geométricos η e γ plástico, ligamento remanescente, área plástica sob a curva carga versus CMOD, tamanho da trinca e espessura do corpo de prova.

$$J_{pl(i)} = \left[J_{pl(i-1)} + \left(\frac{\eta_{pl(i-1)}}{b_{(i-1)}} \right) \left(\frac{A_{pl(i)} - A_{pl(i-1)}}{B} \right) \right] \left[1 - \gamma_{pl(i-1)} \left(\frac{a_{(i)} - a_{(i-1)}}{b_{(i-1)}} \right) \right] \quad (36)$$

Os fatores η_{pl} e γ_{pl} , dependentes de $a_{(i-1)}/W$, são dados pelas expressões a seguir para o caso da utilização do CMOD na medição da área plástica:

$$\eta_{pl} = 3,667 - 2,199 \left(\frac{a_{(i-1)}}{W} \right) + 0,437 \left(\frac{a_{(i-1)}}{W} \right)^2 \quad (37)$$

$$\gamma_{pl} = 0,131 + 2,131 \left(\frac{a_{(i-1)}}{W} \right) - 1,465 \left(\frac{a_{(i-1)}}{W} \right)^2 \quad (38)$$

A área plástica $A_{pl(i)}$ pode ser calculada a partir da eq. (39):

$$A_{pl} = A_{pl(i-1)} + \frac{[P_{(i)} + P_{(i-1)}][v_{pl(i)} - v_{pl(i-1)}]}{2} \quad (39)$$

Onde v_{pl} é a parte plástica do CMOD, igual a

$$v_{pl(i)} = v_{(i)} - (P_{(i)} C_{(i)}) \quad (40)$$

3.4.5. Curva R

Calculando o valor total de J, eq. (32), e a respectiva variação da extensão da trinca Δa em cada rampa dada pela eq. (41), curvas de resistência puderam ser levantadas e serão apresentadas na seção à seguir.

$$\Delta a_{(i)} = a_{(i)} - a_{(0)} \quad (41)$$

4. Resultados e discussão

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios e metodologias descritos no capítulo anterior.

4.1. Propriedades mecânicas de tração

A figura 24 apresenta as curvas Tensão *versus* Deformação de engenharia obtidas para os três corpos de prova de tração do aço DIN 42CrMo4. Os resultados dos ensaios de tração encontram-se na tabela 6.

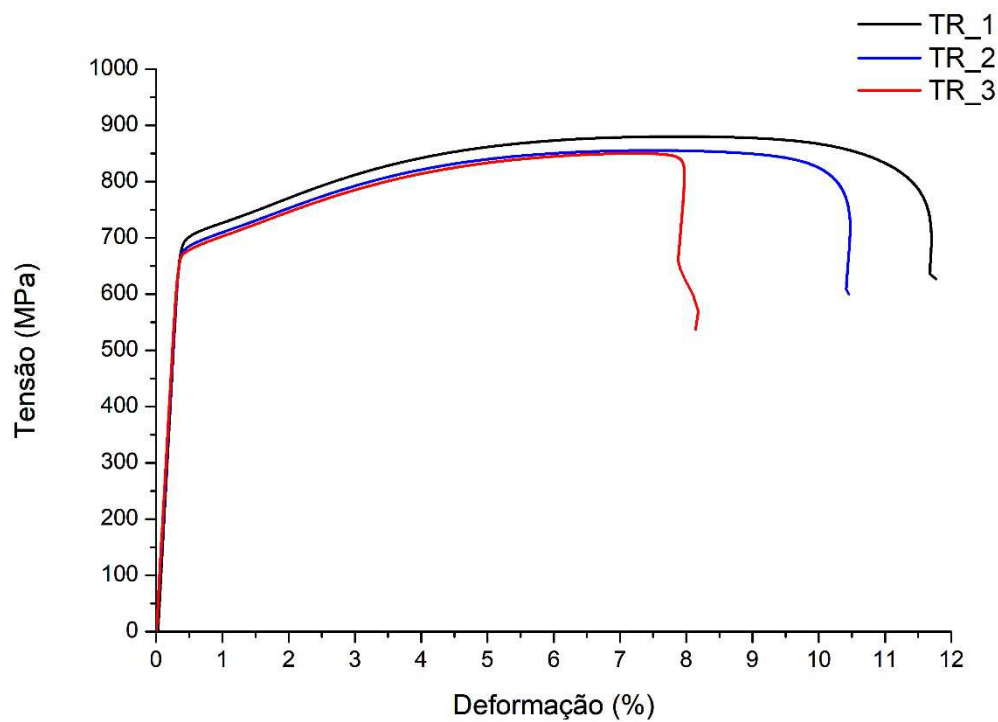


Figura 24 - Curvas Tensão versus Deformação do aço DIN 42CrMo4.

Tabela 6 - Propriedades mecânicas de tração do aço DIN 42CrMo4.

Identificação dos corpos de prova	Φ_f (mm)	L_f (mm)	σ_{LE} (MPa)	LRM (MPa)	Alongamento (%)	Redução de Área (%)
TR_1	4,15	34,90	703,87	880,20	16,33	47,84
TR_2	3,90	34,50	685,64	855,40	15,00	42,25
TR_3	4,30	34,40	676,53	850,08	14,67	51,36
Valor médio	4,12	34,60	688,68	861,89	15,33	141,45
Desvio padrão	0,16	0,22	11,37	13,13	0,72	3,75

Conforme citado anteriormente, os valores de limite de escoamento e limite de resistência mecânica utilizados nos cálculos subsequentes foram as médias obtidas: $\sigma_{LE} = 689$ MPa e LRM = 862 MPa.

Os valores adotados para módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson foram os comumente encontrados na literatura para aços em geral, 207 GPa e 0,3, respectivamente (CALLISTER, 2013).

4.2. Medidas dos comprimentos de trincas

Conforme indicado em 3.3.6, após os ensaios de tenacidade, os valores reais obtidos das trincas de fadiga e da propagação estável de trinca foram medidos em microscópio. Não se observou propagação de trinca no corpo de prova SE(B)_4. As imagens encontram-se a seguir. No canto superior direito de cada imagem tem-se os valores médios dos comprimentos, conforme eq. (25) e eq. (26).

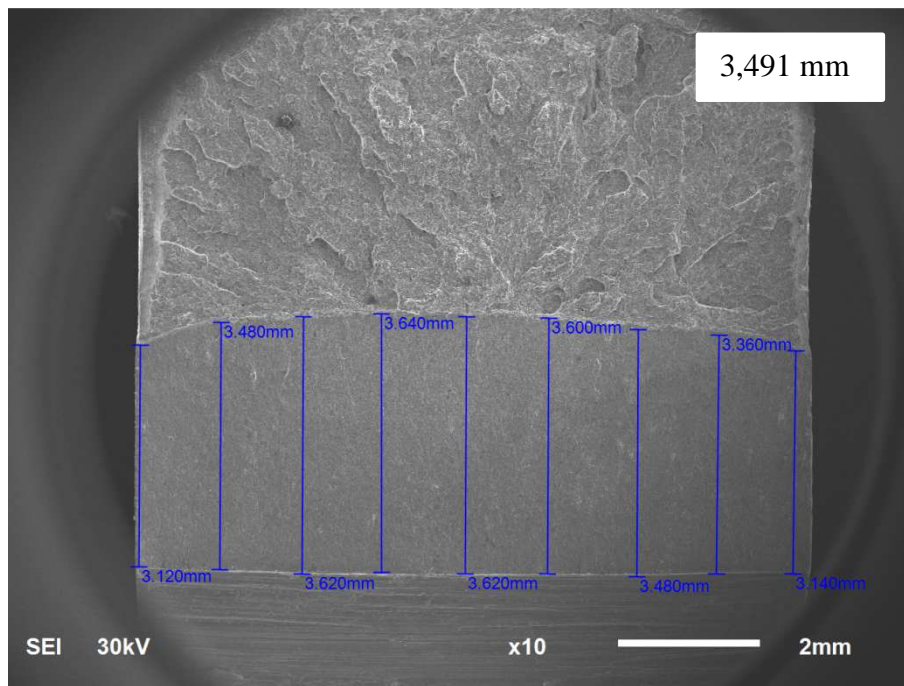


Figura 25 - Medição do tamanho médio de trinca de fadiga do corpo de prova SE(B)_1 (Realizada por MEV).

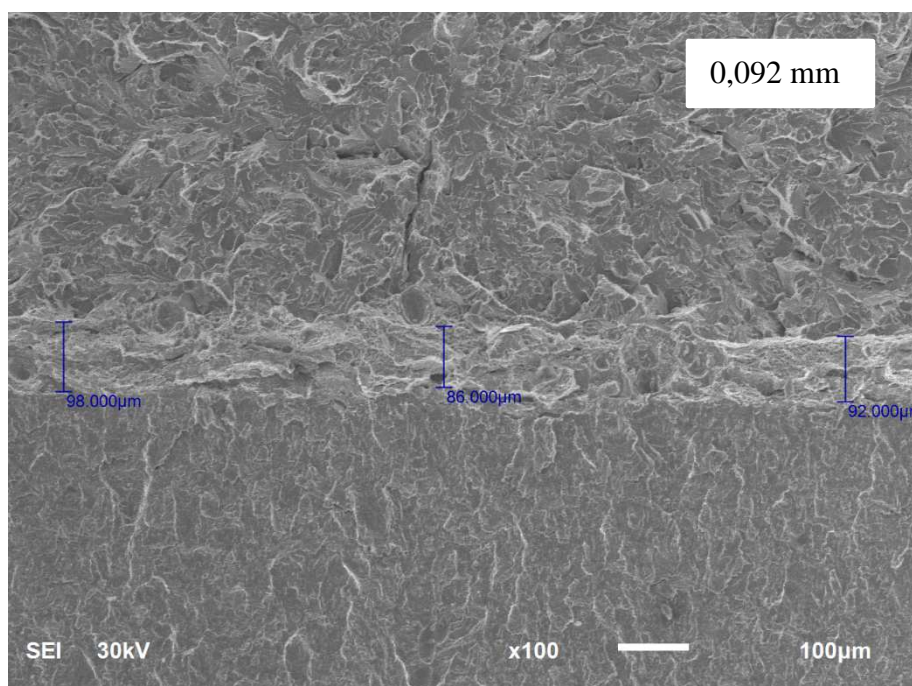


Figura 26 - Medida da propagação estável de trinca do corpo de prova SE(B)_1 (Realizada por MEV).

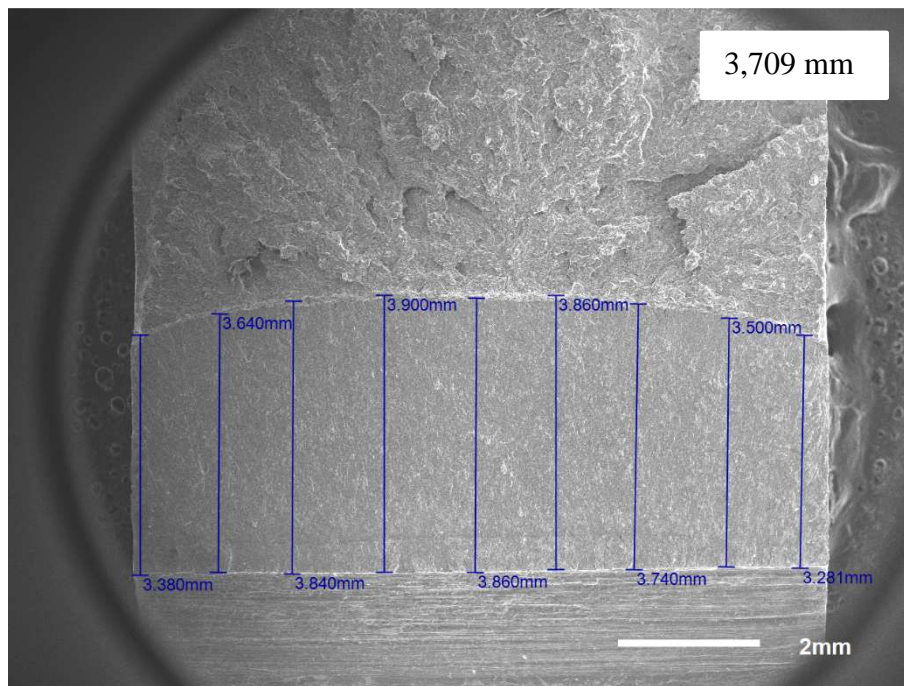


Figura 27 - Medição do tamanho médio de trinca de fadiga do corpo de prova SE(B)_2 (Realizada por MEV).

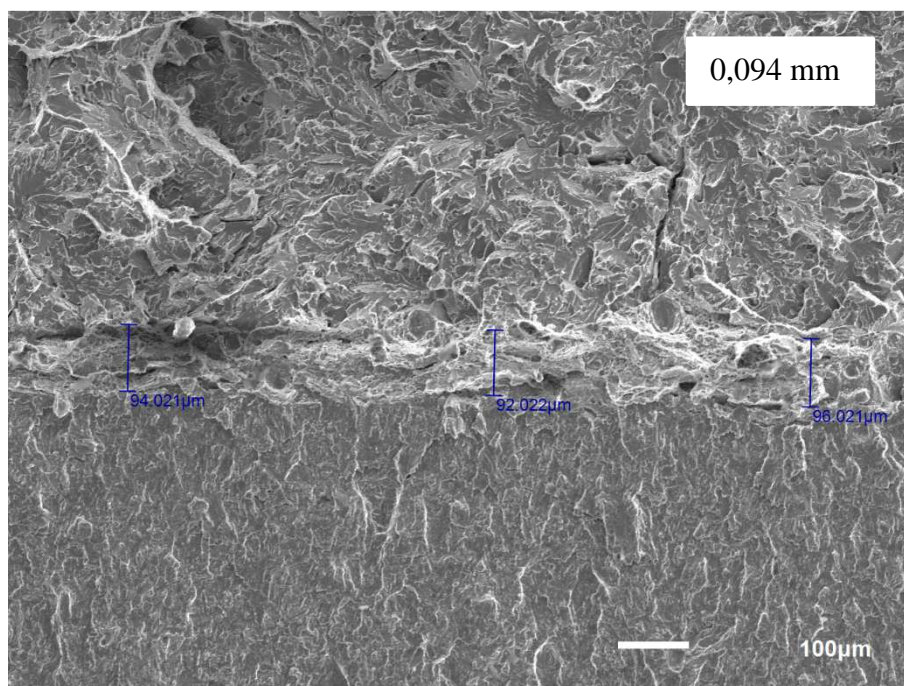


Figura 28 - Medida da propagação estável de trinca do corpo de prova SE(B)_2 (Realizada por MEV).

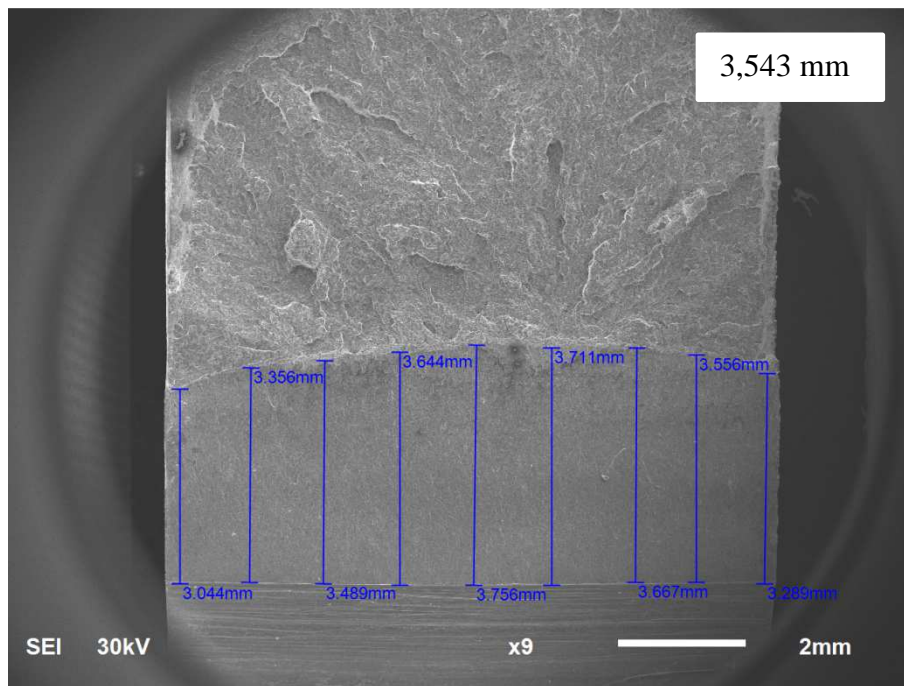


Figura 29 - Medição do tamanho médio de trinca de fadiga do corpo de prova SE(B)_3 (Realizada por MEV).

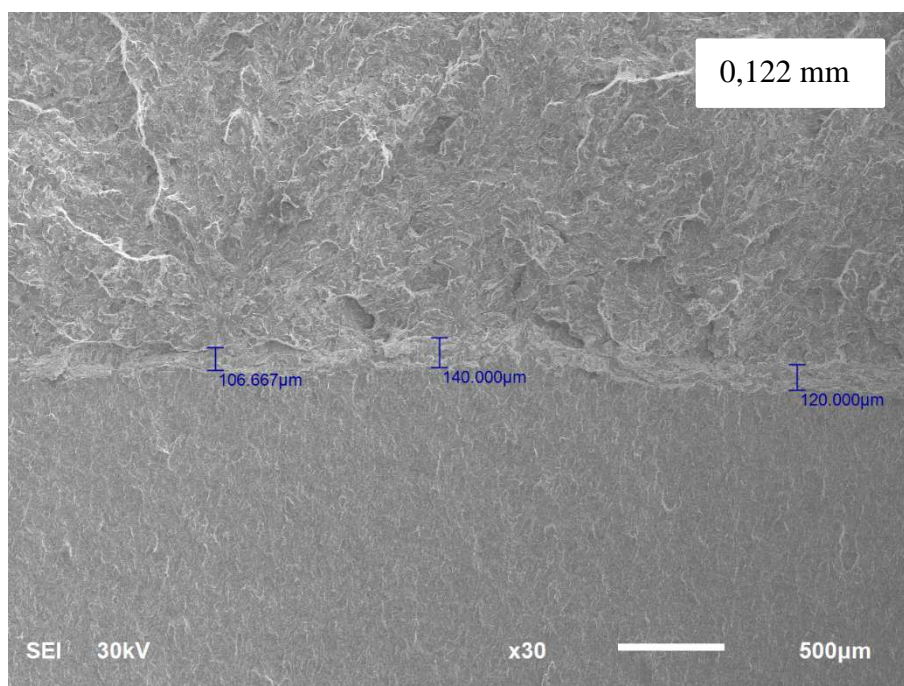


Figura 30 - Medida da propagação estável de trinca do corpo de prova SE(B)_3 (Realizada por MEV).

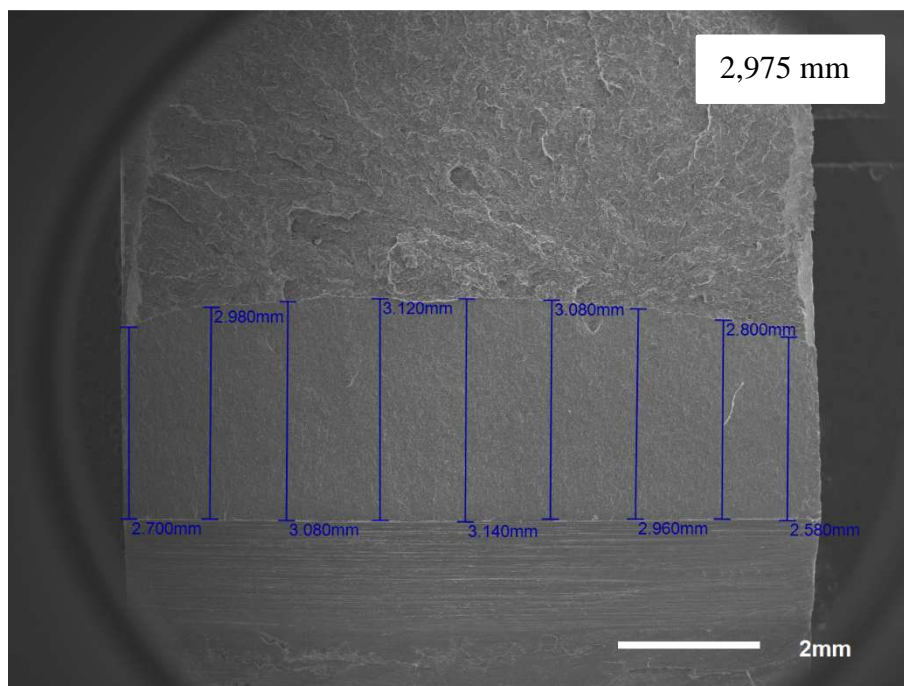


Figura 31 - Medição do tamanho médio de trinca de fadiga do corpo de prova SE(B)_4 (Realizada por MEV).

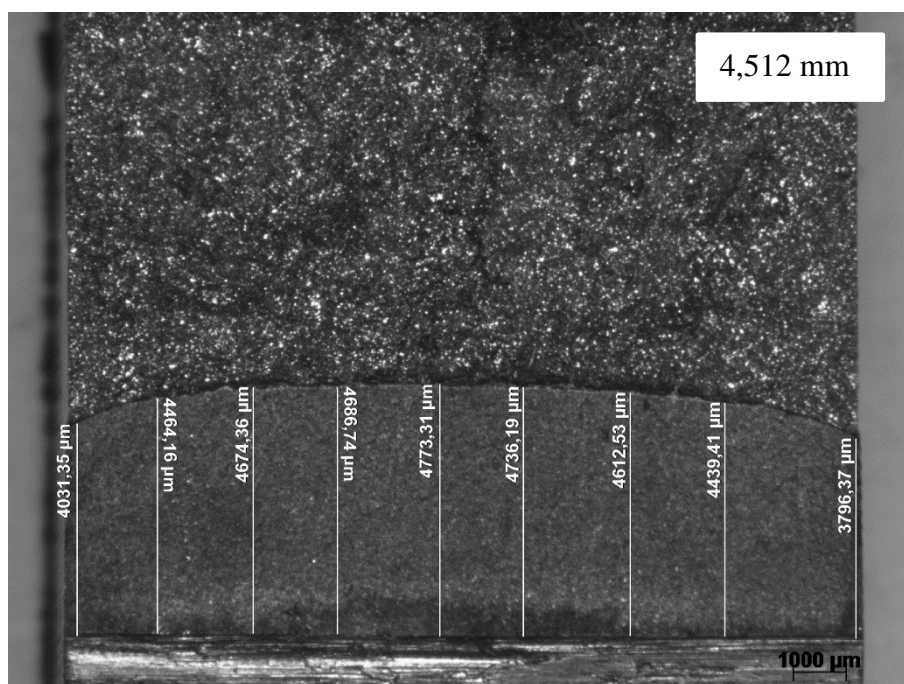


Figura 32 - Medição do tamanho médio de trinca de fadiga do corpo de prova SE(B)_5 (Realizada por microscopia óptica).

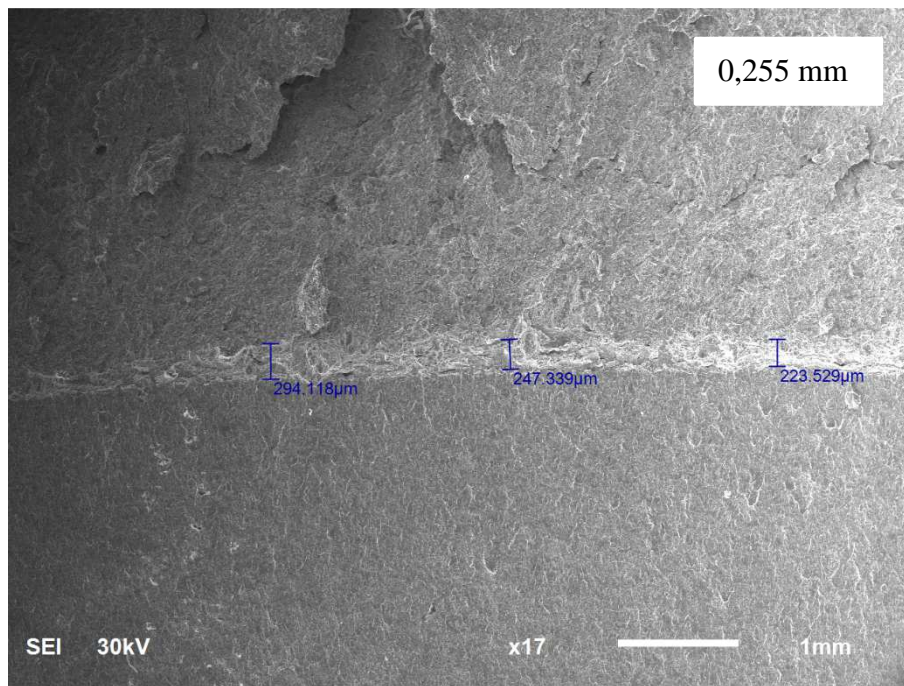


Figura 33 - Medida da propagação estável de trinca do corpo de prova SE(B)_5 (Realizada por MEV).

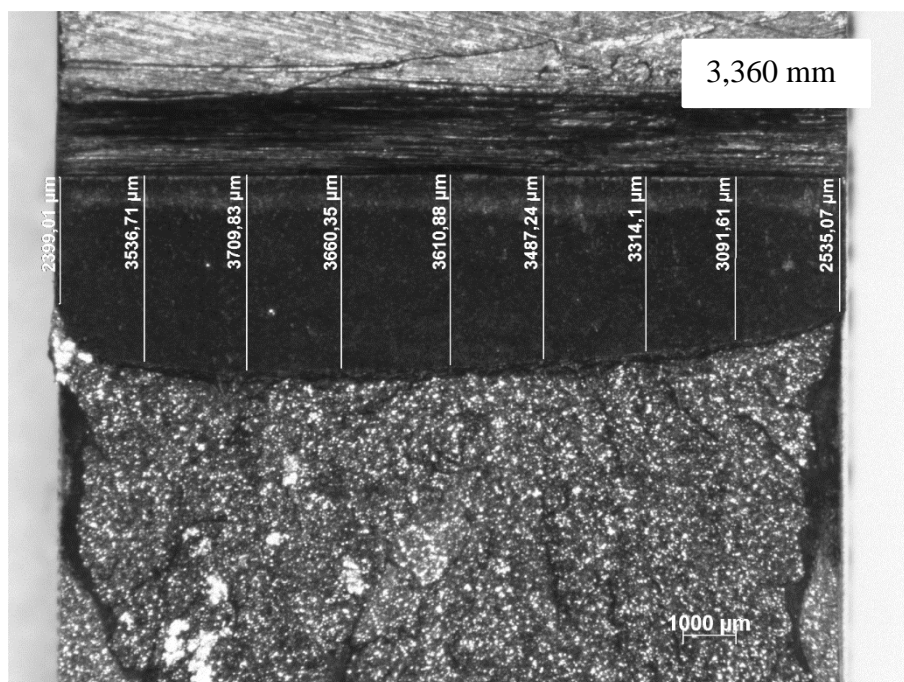


Figura 34 - Medição do tamanho médio de trinca de fadiga do corpo de prova SE(B)_6 (Realizada por microscopia óptica).

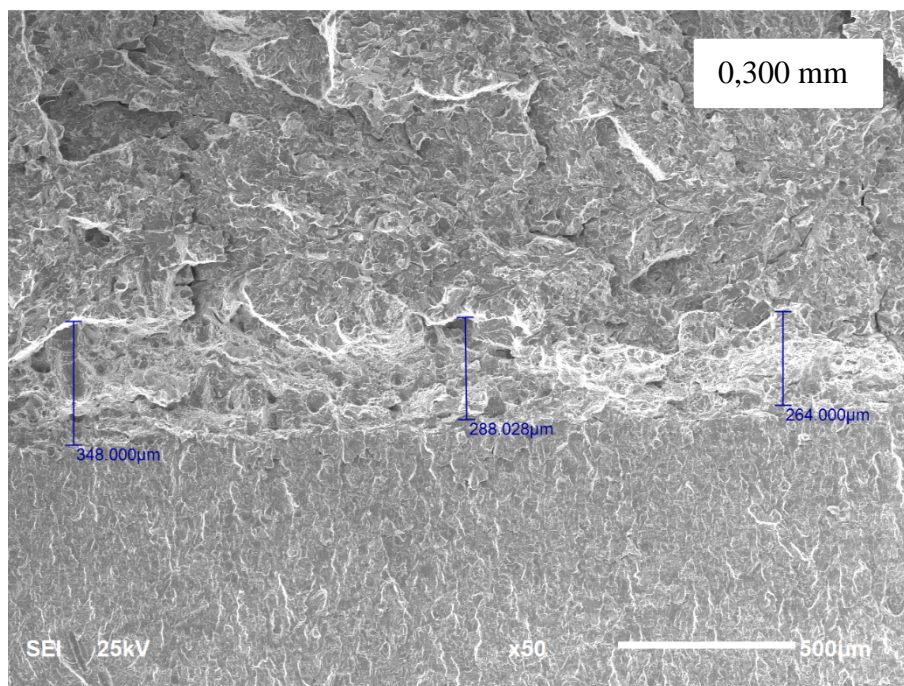


Figura 35 - Medida da propagação estável de trinca do corpo de prova SE(B)_6 (Realizada por MEV).

A tabela 7 reúne as informações das medições:

Tabela 7 - Dados das medições das pré-trincas de fadiga, tamanho inicial das trincas e valores médios da propagação estável de trinca.

Identificação dos corpos de prova	$a_{\text{real_fadiga}}$ (mm)	$a_{\text{real_0}}$ (mm)	$a_{\text{real_0}} / W$	Δa_{real} (mm)
SE(B)_1	3,491	10,491	0,525	0,092
SE(B)_2	3,709	10,709	0,535	0,094
SE(B)_3	3,543	13,043	0,522	0,122
SE(B)_4	2,975	12,475	0,499	Não houve propagação estável
SE(B)_5	4,512	16,512	0,550	0,255
SE(B)_6	3,360	15,360	0,512	0,300

Verifica-se que as dimensões da pré-trinca de fadiga ultrapassaram os tamanhos pré-determinados no item 3.3.2 (tabela 3). No entanto, os valores de a_{real_0} (tamanho de trinca real inicial, $a_{\text{real_fadiga}} + a_{\text{entalhe}}$) não excederam o valor de qualificação exigido (entre 0,45W e 0,7W) para que o ensaio se mantivesse válido.

4.3. Registros Carga versus CMOD

Nas figuras 36 a 39 encontram-se os registros dos ensaios de tenacidade à fratura, carga versus abertura da boca do entalhe (CMOD), referentes aos corpos de prova SE(B)_1, SE(B)_2, SE(B)_3 e SE(B)_4.

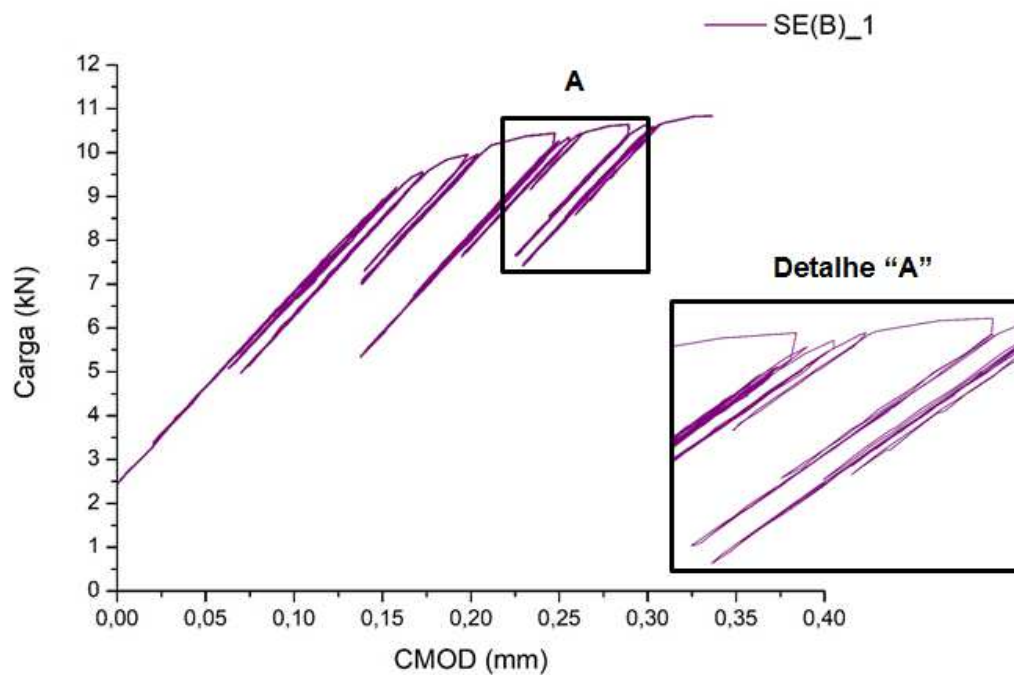


Figura 36 - Curva carga versus CMOD do corpo de prova SE(B)_1.

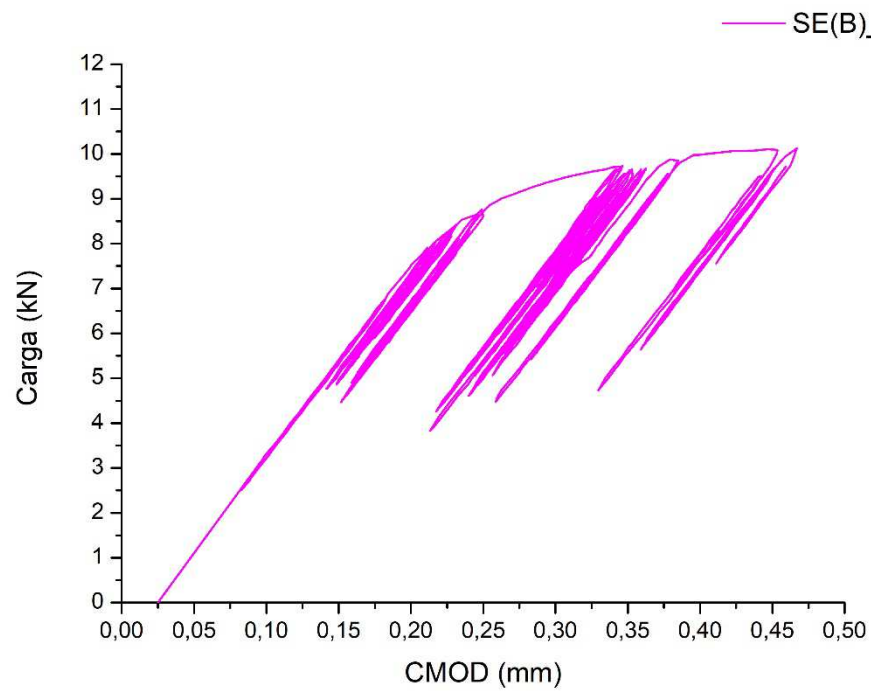


Figura 37 - Curva carga versus CMOD do corpo de prova SE(B)_2.

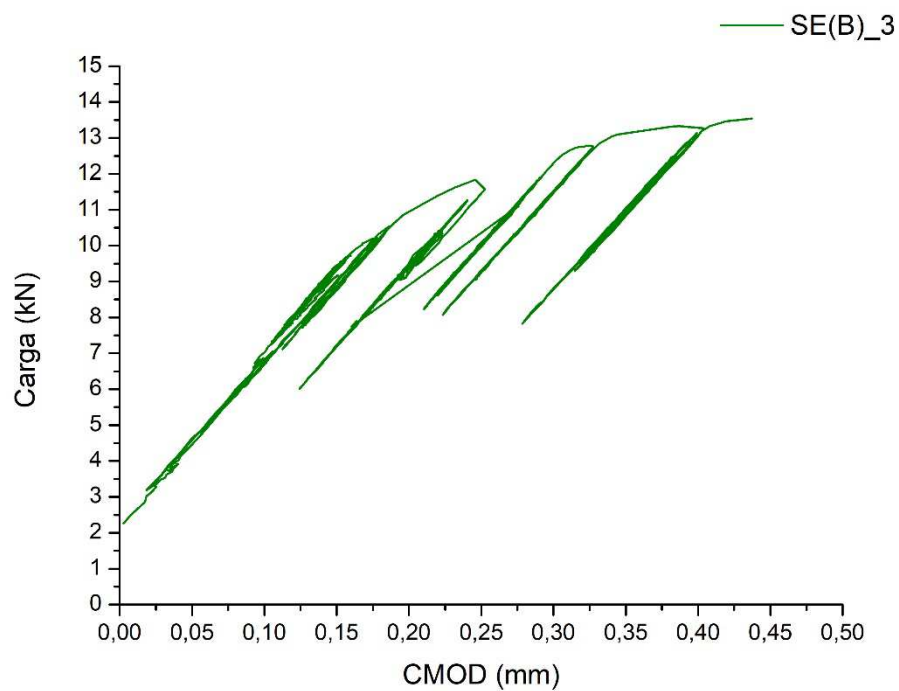


Figura 38 - Curva carga versus CMOD do corpo de prova SE(B)_3.

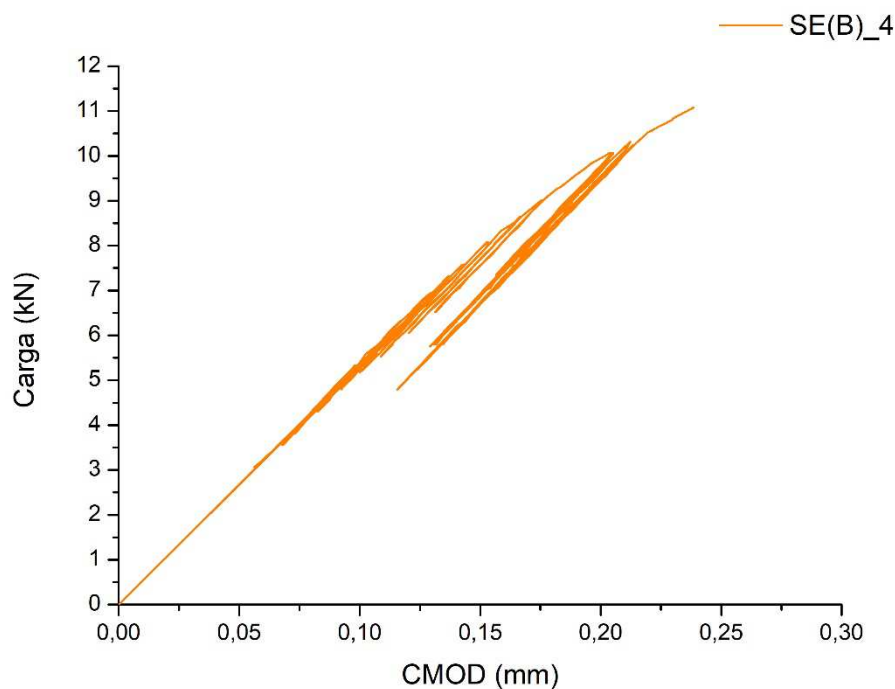


Figura 39 - Curva carga versus CMOD do corpo de prova SE(B)_4.

Pode-se observar que, para os corpos de prova de menor dimensão (i.e. SE(B)_1, SE(B)_2, SE(B)_3 e SE(B)_4), os registros dos ensaios apresentaram variação significativa:

- Para alcançar os valores de carga máxima / mínima pré-programada no software (*Unloading Compliance Method*), ocorreram diversos carregamentos / descarregamentos “parciais” não previstos (ver detalhe “A” na figura 36);

- Visualmente pode-se notar que os níveis de descarregamento não estão uniformes;

- Todos esses corpos de prova fraturaram durante o ensaio, atingindo as cargas máximas listadas na tabela 8.

Essas variações foram associadas à rigidez da máquina, cuja capacidade é de 100 kN e a precisão em torno de 2 kN. Para esses corpos de prova menores, uma variação de carga como essa é muito importante, visto que os mesmos suportam cargas máximas em torno de 10 kN – 13 kN. Desta maneira, as curvas carga versus CMOD obtidas para esses espécimes não possuem a forma típica encontrada na literatura (ver figura 19).

Observando especialmente a curva carga versus CMOD do corpo de prova SE(B)_4, verifica-se que o nível de carga alcançou quase 2x o valor de $P_{m\acute{a}x}$ logo no início do ensaio, possibilitando apenas a análise fractográfica do mesmo.

Tabela 8 - Carga máxima de obtida no ensaio de tenacidade à fratura dos corpos de prova SE(B)_1, SE(B)_2, SE(B)_3 e SE(B)_4.

Identificação dos corpos de prova	Carga máxima (kN)	Carga máxima em função de $P_{m\acute{a}x}$
SE(B)_1	10,83	2,25 ($P_{m\acute{a}x}$)
SE(B)_2	10,12	2,10 ($P_{m\acute{a}x}$)
SE(B)_3	13,54	2,22 ($P_{m\acute{a}x}$)
SE(B)_4	11,08	1,81 ($P_{m\acute{a}x}$)

A seguir encontram-se os registos do ensaio de tenacidade à fratura para os corpos de prova SE(B)_5 e SE(B)_6. A quantidade de registos obtidos no ensaio do corpo de prova SE(B)_6 foi maior do que no SE(B)_5 na tentativa de obter mais dados para a curva de resistência à fratura. Para esses corpos de prova, não foram observados desvios de carga importantes como os apresentados para os corpos de prova menores. É válido lembrar que a diferença entre os dois ensaios encontra-se na taxa de descarregamento (tabela 5), numa tentativa de obter melhor controle de carga na máquina de ensaio.

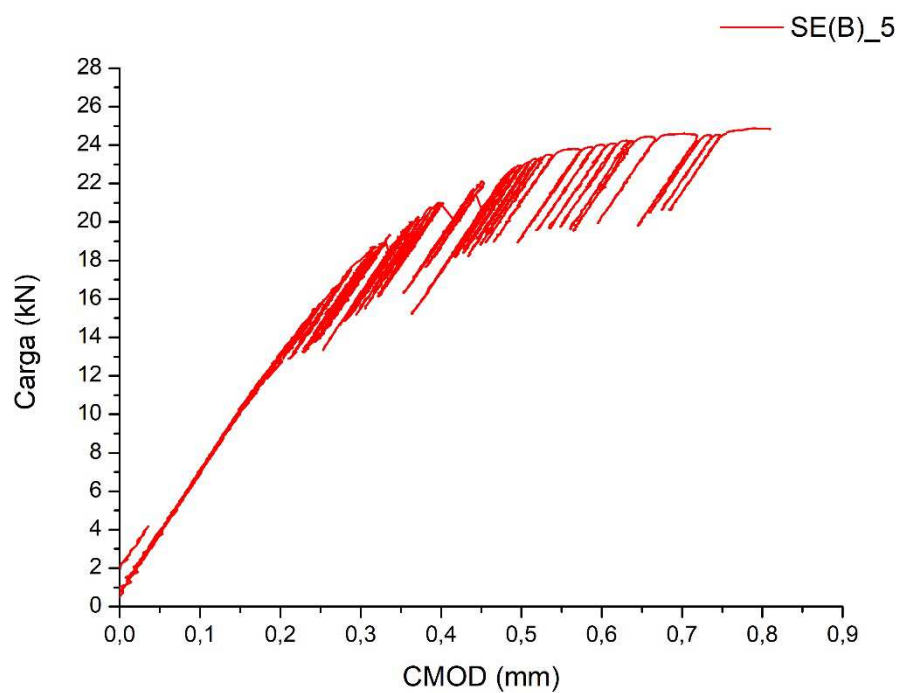


Figura 40 - Curva carga versus CMOD do corpo de prova SE(B)_5.

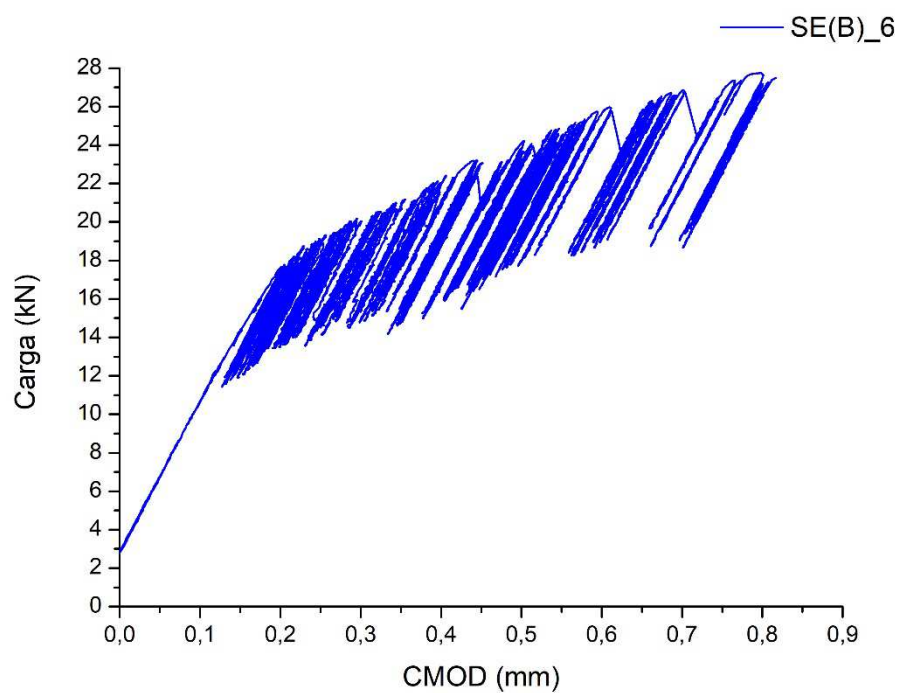


Figura 41 - Curva carga versus CMOD do corpo de prova SE(B)_6.

4.4. Curvas de resistência à fratura

4.4.1. Determinação de J e Δa experimentais

Para cada registro de ensaio, foram identificados os pontos apresentados no item 3.4.1 e, utilizando as eq. (27) e eq. (28), os valores incrementais de CMOD (ΔCMOD) e carga foram determinados. É importante ressaltar que, para esses cálculos, foram utilizados todos os carregamentos / descarregamentos que ocorreram durante o ensaio. Isso inclui os carregamentos que não foram previstos no momento da programação da máquina de ensaio para os corpos de prova SE(B)_1, SE(B)_2 e SE(B)_3. Em seguida, obtiveram-se os valores de *compliance* para cada rampa i , utilizando a eq. (29). Com a eq. (30), determinaram-se os tamanhos de trinca. Os valores de J puderam ser calculados utilizando as equações apresentadas em 3.4.4.

Os valores obtidos encontram-se nas tabelas 9 a 13, lembrando que os dados do corpo de prova SE(B)_4 foram descartados. A coluna “R” indica o número da rampa à qual os cálculos foram realizados.

Tabela 9 – Valores de J e Δa obtidos para o corpo de prova SE(B)_1.

SE(B)_1										
R	ΔC_{MOD} (mm)	ΔP (N)	$C_{(i)}$ (mm/N)	$a_{(i)}/W$	$a_{(i)}$ (mm)	$J_{el(i)}$ (kJ/m ²)	$J_{pl(i)}$ (kJ/m ²)	$J_{(i)}$ (kJ/m ²)	$\Delta a_{(i)}$ (mm)	$\Delta a_{(i)inc}$ (mm)
1	0,05655	2475,95	2,284E-05	0,5370	10,9862	0,00	0,00	0,00	0,49517	0,49517
2	0,04986	2190,30	2,276E-05	0,5493	10,9862	23,24	0,00	23,24	0,49517	0,00000
3	0,05663	2478,95	2,284E-05	0,5488	10,9751	21,75	0,00	21,75	0,48415	-0,01102
4	0,06162	2704,66	2,278E-05	0,5494	10,9872	26,08	0,00	26,08	0,49615	0,01201
5	0,07538	3308,83	2,278E-05	0,5489	10,9780	22,46	0,00	22,46	0,48697	-0,00918
6	0,05243	2297,23	2,282E-05	0,5489	10,9778	29,23	0,00	29,23	0,48676	-0,00021
7	0,02415	1070,33	2,256E-05	0,5492	10,9837	19,90	0,00	19,90	0,49266	0,00590
8	0,03691	1637,65	2,254E-05	0,5472	10,9449	22,50	0,00	22,50	0,45390	-0,03877
9	0,04312	1904,64	2,264E-05	0,5470	10,9407	24,30	0,00	24,30	0,44969	-0,00421
10	0,04462	1953,24	2,284E-05	0,5478	10,9564	26,65	0,00	26,65	0,46544	0,01575
11	0,04117	1797,00	2,291E-05	0,5493	10,9867	26,54	0,00	26,54	0,49574	0,03031
12	0,05275	2284,48	2,309E-05	0,5498	10,9970	29,16	0,00	29,16	0,50599	0,01025
13	0,04630	2029,75	2,281E-05	0,5512	11,0236	33,84	5,10	38,94	0,53265	0,02666
14	0,04191	1827,45	2,293E-05	0,5491	10,9821	34,23	6,26	40,49	0,49113	-0,04152
15	0,03463	1507,80	2,297E-05	0,5500	11,0004	28,89	16,00	44,89	0,50943	0,01830
16	0,04368	1905,06	2,293E-05	0,5503	11,0054	24,33	15,80	40,13	0,51442	0,00499
17	0,04389	1915,54	2,291E-05	0,5500	10,9993	28,81	15,93	44,74	0,50828	-0,00614
18	0,04032	1764,25	2,285E-05	0,5498	10,9969	31,97	15,87	47,84	0,50593	-0,00236
19	0,05368	2347,44	2,287E-05	0,5494	10,9886	26,02	16,09	42,11	0,49758	-0,00835
20	0,04712	2008,14	2,346E-05	0,5495	10,9906	29,84	15,96	45,80	0,49960	0,00202
21	0,04718	2046,50	2,305E-05	0,5539	11,0778	37,55	14,58	52,13	0,58680	0,08720
22	0,05541	2424,58	2,285E-05	0,5509	11,0179	30,80	16,19	46,99	0,52689	-0,05991
23	0,04485	1949,51	2,301E-05	0,5494	10,9885	33,83	16,57	50,39	0,49751	-0,02938
24	0,05504	2381,78	2,311E-05	0,5506	11,0111	29,14	16,11	45,25	0,52014	0,02263
25	0,04025	1535,57	2,621E-05	0,5513	11,0263	34,15	15,92	50,07	0,53531	0,01518
26	0,08139	3523,64	2,310E-05	0,5724	11,4482	26,37	9,06	35,43	0,95717	0,42186
27	0,03982	1729,55	2,302E-05	0,5512	11,0248	34,19	16,58	50,77	0,53377	-0,42340
28	0,04217	1818,34	2,319E-05	0,5507	11,0133	29,78	16,90	46,68	0,52229	-0,01148
29	0,04004	1712,84	2,337E-05	0,5519	11,0385	36,40	16,45	52,85	0,54746	0,02517
30	0,04718	2057,51	2,293E-05	0,5532	11,0650	32,09	17,25	49,35	0,57397	0,02651
31	0,03481	1513,55	2,300E-05	0,5500	10,9996	35,98	18,43	54,41	0,50864	-0,06533
32	0,04733	2005,12	2,360E-05	0,5505	11,0096	37,91	19,33	57,25	0,51862	0,00998
33	0,05567	2360,64	2,358E-05	0,5549	11,0983	34,36	25,19	59,54	0,60729	0,08867
34	0,05620	2412,32	2,330E-05	0,5547	11,0948	40,26	27,86	68,11	0,60384	-0,00345

Tabela 10 – Valores de J e Δa obtidos para o corpo de prova SE(B)_2.

SE(B)_2										
R	ΔC_{MOD} (mm)	ΔP (N)	$C_{(i)}$ (mm/N)	$a_{(i)}/W$	$a_{(i)}$ (mm)	$J_{el(i)}$ (kJ/m ²)	$J_{pl(i)}$ (kJ/m ²)	$J_{(i)}$ (kJ/m ²)	$\Delta a_{(i)}$ (mm)	$\Delta a_{(i)inc}$ (mm)
1	0,06238	2662,89	2,343E-05	0,5536	11,0725	12,44	1,29	13,73	0,36354	0,36354
2	0,05520	2366,72	2,332E-05	0,5529	11,0574	16,16	1,47	17,64	0,34840	-0,01514
3	0,05402	2352,43	2,296E-05	0,5502	11,0046	17,90	2,91	20,81	0,29555	-0,05285
4	0,04926	2179,46	2,260E-05	0,5475	10,9504	18,32	4,43	22,76	0,24142	-0,05413
5	0,06599	2866,80	2,302E-05	0,5507	11,0130	23,83	3,53	27,36	0,30404	0,06262
6	0,05041	2231,39	2,259E-05	0,5475	10,9492	23,30	4,87	28,16	0,24016	-0,06388
7	0,05230	2304,89	2,269E-05	0,5482	10,9638	18,25	6,48	24,73	0,25485	0,01469
8	0,05966	2743,86	2,174E-05	0,5409	10,8180	19,05	8,95	28,00	0,10895	-0,14590
9	0,07550	3293,94	2,292E-05	0,5499	10,9983	24,20	6,66	30,86	0,28932	0,18037
10	0,05487	2342,55	2,342E-05	0,5536	11,0719	33,72	24,51	58,24	0,36287	0,07354
11	0,06084	2626,49	2,316E-05	0,5517	11,0344	24,22	25,44	49,66	0,32542	-0,03744
12	0,07798	3364,62	2,318E-05	0,5518	11,0363	24,77	24,81	49,58	0,32726	0,00183
13	0,07385	3187,10	2,317E-05	0,5518	11,0353	24,01	24,68	48,70	0,32630	-0,00095
14	0,06470	2809,91	2,303E-05	0,5507	11,0141	24,03	25,14	49,17	0,30506	-0,02124
15	0,06970	3034,60	2,297E-05	0,5503	11,0056	24,99	25,31	50,30	0,29660	-0,00846
16	0,08814	3671,06	2,401E-05	0,5578	11,1555	33,54	24,33	57,87	0,44652	0,14993
17	0,09782	4189,50	2,335E-05	0,5531	11,0612	27,78	26,22	54,00	0,35223	-0,09429
18	0,06810	2942,44	2,314E-05	0,5516	11,0315	25,08	26,99	52,07	0,32250	-0,02973
19	0,07505	3242,60	2,315E-05	0,5516	11,0316	32,53	27,22	59,76	0,32264	0,00014
20	0,05181	2305,68	2,247E-05	0,5465	10,9309	26,75	30,16	56,91	0,22186	-0,10078
21	0,06746	2929,68	2,303E-05	0,5507	11,0142	27,13	28,78	55,91	0,30517	0,08331
22	0,07847	3370,95	2,328E-05	0,5526	11,0511	27,63	28,10	55,73	0,34214	0,03697
23	0,07101	3066,81	2,315E-05	0,5516	11,0328	29,17	28,67	57,84	0,32377	-0,01837
24	0,07394	1697,23	4,356E-05	0,6510	13,0204	56,44	-0,59	55,85	2,31145	1,98768
25	0,08567	3711,82	2,308E-05	0,5511	11,0221	30,79	68,75	99,54	0,31313	-1,99832
26	0,06042	2603,20	2,321E-05	0,5521	11,0412	20,98	68,63	89,60	0,33215	0,01903
27	0,07340	3170,38	2,315E-05	0,5516	11,0326	21,78	69,12	90,90	0,32364	-0,00851
28	0,08451	3658,87	2,310E-05	0,5512	11,0244	31,41	69,58	100,98	0,31542	-0,00822
29	0,07080	3043,53	2,326E-05	0,5524	11,0486	28,68	69,34	98,02	0,33959	0,02417
30	0,08116	3409,69	2,380E-05	0,5563	11,1263	32,60	68,99	101,59	0,41734	0,07775
31	0,09097	3915,04	2,323E-05	0,5522	11,0448	29,97	74,24	104,21	0,33578	-0,08156
32	0,07185	3088,66	2,326E-05	0,5524	11,0486	28,26	74,32	102,58	0,33960	0,00382
33	0,07190	3095,55	2,323E-05	0,5522	11,0436	33,85	74,80	108,65	0,33463	-0,00497
34	0,07182	3081,22	2,331E-05	0,5528	11,0554	32,00	92,17	124,17	0,34637	0,01174
35	0,04070	2327,73	1,748E-05	0,5026	10,0513	23,72	110,49	134,21	0,65771	-1,00408
36	0,02786	1252,96	2,223E-05	0,5447	10,8942	25,86	98,97	124,83	0,18522	0,84293
37	0,03605	1595,85	2,259E-05	0,5474	10,9485	22,88	97,55	120,42	0,23946	0,05425
38	0,04304	1889,14	2,278E-05	0,5489	10,9780	21,32	96,95	118,27	0,26897	0,02950
39	0,04632	2028,31	2,283E-05	0,5493	10,9857	25,34	96,86	122,20	0,27666	0,00769
40	0,04933	2155,59	2,288E-05	0,5496	10,9928	22,70	96,75	119,45	0,28382	0,00716

41	0,04956	2118,59	2,339E-05	0,5534	11,0675	27,76	94,99	122,75	0,35845	0,07463
----	---------	---------	-----------	--------	---------	-------	-------	--------	---------	---------

Tabela 11 – Valores de J e Δa obtidos para o corpo de prova SE(B)_3.

SE(B)_3										
R	ΔC_{MOD} (mm)	ΔP (N)	$C_{(i)}$ (mm/N)	$a_{(i)}/W$	$a_{(i)}$ (mm)	$J_{el(i)}$ (kJ/m ²)	$J_{pl(i)}$ (kJ/m ²)	$J_{(i)}$ (kJ/m ²)	$\Delta a_{(i)}$ (mm)	$\Delta a_{(i)inc}$ (mm)
1	0,03583	1708,86	2,096E-05	0,5346	13,3649	21,79	0,00	21,79	0,32189	0,32189
2	0,04602	2077,99	2,214E-05	0,5440	13,6009	25,19	0,00	25,19	0,55790	0,23601
3	0,05667	2649,89	2,139E-05	0,5380	13,4510	23,82	0,00	23,82	0,40801	-0,14989
4	0,06144	2895,44	2,122E-05	0,5367	13,4173	27,62	0,00	27,62	0,37431	-0,03371
5	0,02376	1111,71	2,137E-05	0,5379	13,4474	27,62	6,25	33,86	0,40442	0,03011
6	0,08244	3768,12	2,188E-05	0,5420	13,5488	25,60	4,51	30,11	0,50583	0,10141
7	0,03777	1715,39	2,202E-05	0,5430	13,5759	23,62	4,23	27,85	0,53293	0,02710
8	0,06632	3034,26	2,186E-05	0,5418	13,5449	32,06	13,34	45,40	0,50192	-0,03101
9	0,04569	2070,98	2,206E-05	0,5434	13,5845	33,73	12,81	46,54	0,54154	0,03961
10	0,05800	2630,60	2,205E-05	0,5433	13,5823	33,57	12,79	46,36	0,53931	-0,00223
11	0,05952	2685,78	2,216E-05	0,5442	13,6039	37,24	12,35	49,59	0,56087	0,02156
12	0,05348	2638,21	2,027E-05	0,5287	13,2183	30,42	18,58	49,00	0,17530	-0,38557
13	0,05184	2335,46	2,219E-05	0,5444	13,6107	41,97	12,67	54,64	0,56772	0,39242
14	0,07486	3380,96	2,214E-05	0,5440	13,6002	38,72	17,33	56,05	0,55716	-0,01056
15	0,05558	2490,49	2,231E-05	0,5454	13,6338	44,40	17,42	61,82	0,59084	0,03367
16	0,03501	1581,51	2,214E-05	0,5440	13,5996	34,35	35,28	69,63	0,55656	-0,03428
17	0,05196	2326,26	2,234E-05	0,5455	13,6379	41,75	34,70	76,45	0,59493	0,03837
18	0,03738	1692,40	2,208E-05	0,5436	13,5893	32,16	35,29	67,46	0,54628	-0,04865
19	0,04786	2183,49	2,192E-05	0,5423	13,5566	38,18	35,57	73,75	0,51363	-0,03265
20	0,06472	2892,51	2,238E-05	0,5458	13,6453	40,96	33,45	74,40	0,60234	0,08871
21	0,04935	2200,80	2,242E-05	0,5462	13,6542	34,79	33,57	68,36	0,61120	0,00885
22	0,05201	2317,41	2,244E-05	0,5463	13,6583	39,23	33,38	72,60	0,61534	0,00415
23	0,04092	1845,32	2,218E-05	0,5443	13,6069	36,96	34,15	71,11	0,56391	-0,05143
24	0,06271	2797,55	2,241E-05	0,5461	13,6528	37,07	33,51	70,58	0,60984	0,04593
25	0,07268	3235,77	2,246E-05	0,5465	13,6615	46,76	33,69	80,46	0,61853	0,00869

Tabela 12 – Valores de J e Δa obtidos para o corpo de prova SE(B)_5.

SE(B)_5										
R	ΔC_{MOD} (mm)	ΔP (N)	$C_{(i)}$ (mm/N)	$a_{(i)}/W$	$a_{(i)}$ (mm)	$J_{el(i)}$ (kJ/m ²)	$J_{pl(i)}$ (kJ/m ²)	$J_{(i)}$ (kJ/m ²)	$\Delta a_{(i)}$ (mm)	$\Delta a_{(i)inc}$ (mm)
1	0,06416	3936,88	1,630E-05	0,5608	16,8245	38,11	0,70	38,81	0,31252	0,31252
2	0,06258	3937,95	1,589E-05	0,5566	16,6976	36,76	2,91	39,67	0,18556	-0,12696
3	0,05815	3666,57	1,586E-05	0,5562	16,6867	32,83	2,93	35,76	0,17473	-0,01083
4	0,05427	3362,13	1,614E-05	0,5592	16,7759	33,91	2,34	36,24	0,26387	0,08915
5	0,06496	4073,74	1,595E-05	0,5572	16,7146	34,89	3,05	37,94	0,20260	-0,06128
6	0,06537	4034,31	1,620E-05	0,5599	16,7957	37,19	2,57	39,77	0,28366	0,08107
7	0,06212	3811,13	1,630E-05	0,5609	16,8255	35,89	2,79	38,68	0,31354	0,02988
8	0,07262	4483,57	1,620E-05	0,5598	16,7936	38,30	3,68	41,98	0,28161	-0,03194
9	0,06524	3977,34	1,640E-05	0,5619	16,8570	39,34	2,72	42,07	0,34499	0,06338
10	0,06348	3868,31	1,641E-05	0,5620	16,8594	39,57	3,73	43,31	0,34740	0,00242
11	0,06183	3767,15	1,641E-05	0,5620	16,8603	41,34	6,53	47,87	0,34831	0,00091
12	0,06001	3638,29	1,650E-05	0,5628	16,8852	40,86	6,55	47,41	0,37319	0,02488
13	0,07136	4322,16	1,651E-05	0,5630	16,8900	45,07	6,37	51,44	0,37795	0,00476
14	0,06554	4001,51	1,638E-05	0,5617	16,8498	43,63	7,58	51,20	0,33783	-0,04012
15	0,07550	4555,87	1,657E-05	0,5636	16,9083	45,56	7,08	52,63	0,39630	0,05847
16	0,08400	5199,69	1,615E-05	0,5593	16,7800	46,56	10,98	57,54	0,26798	-0,12832
17	0,08431	5084,26	1,658E-05	0,5637	16,9118	49,13	10,28	59,41	0,39975	0,13177
18	0,06916	4218,66	1,639E-05	0,5618	16,8539	48,40	12,39	60,79	0,34192	-0,05783
19	0,06642	4124,25	1,610E-05	0,5588	16,7643	46,74	13,95	60,69	0,25226	-0,08966
20	0,06605	4072,84	1,622E-05	0,5600	16,7998	47,81	13,69	61,51	0,28783	0,03557
21	0,06742	4113,26	1,639E-05	0,5618	16,8535	49,26	20,89	70,15	0,34147	0,05364
22	0,06292	3883,51	1,620E-05	0,5598	16,7952	49,51	21,36	70,87	0,28323	-0,05824
23	0,05952	3650,89	1,630E-05	0,5609	16,8260	51,91	21,60	73,51	0,31399	0,03076
24	0,05884	3603,73	1,633E-05	0,5611	16,8337	53,34	21,85	75,19	0,32169	0,00770
25	0,05518	3386,14	1,629E-05	0,5608	16,8238	49,89	23,22	73,12	0,31175	-0,00993
26	0,06389	3896,39	1,640E-05	0,5619	16,8556	54,90	28,24	83,14	0,34358	0,03183
27	0,05955	3653,41	1,630E-05	0,5609	16,8256	57,04	29,80	86,83	0,31359	-0,02999
28	0,07148	4385,72	1,630E-05	0,5608	16,8251	57,72	30,65	88,37	0,31309	-0,00050
29	0,06637	4014,62	1,653E-05	0,5632	16,8962	59,26	30,93	90,19	0,38421	0,07111
30	0,06775	4109,79	1,648E-05	0,5627	16,8821	57,11	33,81	90,92	0,37006	-0,01415
31	0,07087	4291,29	1,651E-05	0,5630	16,8908	60,04	35,12	95,16	0,37884	0,00878
32	0,06579	3976,35	1,654E-05	0,5633	16,9001	62,82	40,42	103,23	0,38807	0,00922
33	0,06511	3942,88	1,651E-05	0,5630	16,8904	63,57	49,90	113,47	0,37842	-0,00964
34	0,06052	3675,12	1,647E-05	0,5626	16,8770	64,44	58,69	123,14	0,36505	-0,01338
35	0,07847	4509,11	1,740E-05	0,5717	17,1523	66,92	58,38	125,30	0,64025	0,27521
36	0,06998	3953,53	1,770E-05	0,5746	17,2365	73,86	71,13	144,98	0,72452	0,08426

Tabela 13 – Valores de J e Δa obtidos para o corpo de prova SE(B)_6.

SE(B)_6										
R	ΔC_{MOD} (mm)	ΔP (N)	$C_{(i)}$ (mm/N)	$a_{(i)}/W$	$a_{(i)}$ (mm)	$J_{el(i)}$ (kJ/m ²)	$J_{pl(i)}$ (kJ/m ²)	$J_{(i)}$ (kJ/m ²)	$\Delta a_{(i)}$ (mm)	$\Delta a_{(i)inc}$ (mm)
1	0,07060	5731,54	1,232E-05	0,5124	15,3725	24,45	0,00	24,45	0,01253	0,01253
2	0,07347	5957,50	1,233E-05	0,5126	15,3794	25,83	0,00	25,83	0,01944	0,00691
3	0,06777	5547,60	1,222E-05	0,5109	15,3284	27,79	3,57	31,36	-0,03159	-0,05103
4	0,06854	5592,84	1,225E-05	0,5115	15,3453	28,06	4,17	32,23	-0,01471	0,01688
5	0,06993	5732,00	1,220E-05	0,5107	15,3213	27,74	5,77	33,51	-0,03873	-0,02402
6	0,06164	5092,07	1,210E-05	0,5093	15,2798	28,98	8,98	37,97	-0,08025	-0,04152
7	0,06563	5421,56	1,211E-05	0,5093	15,2803	29,76	10,03	39,79	-0,07970	0,00054
8	0,06814	5481,17	1,243E-05	0,5141	15,4217	32,10	9,74	41,84	0,06174	0,14145
9	0,07238	5770,61	1,254E-05	0,5156	15,4693	31,87	10,19	42,07	0,10931	0,04757
10	0,06851	5516,90	1,242E-05	0,5139	15,4162	31,71	11,96	43,67	0,05616	-0,05315
11	0,06940	5586,62	1,242E-05	0,5139	15,4183	32,65	15,67	48,33	0,05826	0,00211
12	0,07340	5940,46	1,236E-05	0,5130	15,3893	33,74	16,68	50,42	0,02930	-0,02897
13	0,06975	5705,61	1,223E-05	0,5111	15,3326	32,51	19,45	51,95	-0,02738	-0,05668
14	0,06898	5557,91	1,241E-05	0,5138	15,4132	34,88	19,93	54,81	0,05324	0,08063
15	0,07409	5974,14	1,240E-05	0,5136	15,4093	33,77	21,47	55,25	0,04934	-0,00391
16	0,06835	5449,20	1,254E-05	0,5156	15,4692	35,51	25,60	61,11	0,10925	0,05991
17	0,07514	6051,34	1,242E-05	0,5138	15,4153	37,27	27,45	64,72	0,05534	-0,05391
18	0,07519	6040,09	1,245E-05	0,5143	15,4287	38,56	30,00	68,56	0,06875	0,01341
19	0,08258	6677,01	1,237E-05	0,5131	15,3945	38,14	31,74	69,87	0,03448	-0,03427
20	0,07082	5684,02	1,246E-05	0,5145	15,4336	36,91	32,51	69,42	0,07363	0,03916
21	0,07122	5778,21	1,232E-05	0,5125	15,3759	42,38	38,27	80,65	0,01594	-0,05770
22	0,06846	5597,73	1,223E-05	0,5112	15,3348	40,93	41,61	82,54	-0,02516	-0,04110
23	0,08903	7234,23	1,231E-05	0,5123	15,3682	39,49	41,58	81,07	0,00822	0,03339
24	0,08898	7210,79	1,234E-05	0,5128	15,3825	38,13	41,46	79,59	0,02254	0,01432
25	0,07906	6402,70	1,235E-05	0,5129	15,3857	39,78	42,27	82,05	0,02567	0,00313
26	0,09635	7804,45	1,235E-05	0,5128	15,3850	42,09	42,12	84,21	0,02496	-0,00071
27	0,08459	6863,05	1,233E-05	0,5125	15,3762	39,24	43,08	82,32	0,01620	-0,00876
28	0,07352	5963,27	1,233E-05	0,5126	15,3779	39,77	43,37	83,14	0,01788	0,00168
29	0,08087	6554,74	1,234E-05	0,5127	15,3813	41,62	49,66	91,28	0,02133	0,00345
30	0,08672	7083,33	1,224E-05	0,5114	15,3406	41,62	50,15	91,77	-0,01939	-0,04072
31	0,08926	7227,04	1,235E-05	0,5129	15,3869	46,43	24,27	70,70	0,02686	0,04625
32	0,07744	6136,23	1,262E-05	0,5167	15,5016	45,20	24,38	69,57	0,14164	0,11478
33	0,09270	7296,28	1,270E-05	0,5179	15,5371	42,50	24,82	67,32	0,17706	0,03542
34	0,08512	6688,93	1,272E-05	0,5182	15,5455	48,09	25,40	73,49	0,18550	0,00844
35	0,07782	6091,55	1,278E-05	0,5189	15,5666	47,56	26,16	73,72	0,20659	0,02108
36	0,09211	7173,60	1,284E-05	0,5198	15,5931	46,63	29,42	76,05	0,23308	0,02649
37	0,11068	8606,65	1,286E-05	0,5200	15,6013	51,06	30,96	82,02	0,24134	0,00826
38	0,09486	7391,15	1,283E-05	0,5197	15,5907	49,73	32,51	82,24	0,23073	-0,01062
39	0,08373	6546,93	1,279E-05	0,5191	15,5725	47,63	33,78	81,41	0,21246	-0,01827
40	0,08282	6511,56	1,272E-05	0,5181	15,5431	48,04	35,52	83,56	0,18310	-0,02936
41	0,08710	6804,93	1,280E-05	0,5192	15,5764	49,16	37,55	86,71	0,21635	0,03325

42	0,08597	6661,07	1,291E-05	0,5207	15,6203	52,55	37,53	90,08	0,26031	0,04396
43	0,09320	7310,01	1,275E-05	0,5185	15,5558	51,47	40,44	91,91	0,19585	-0,06446
44	0,09104	7020,79	1,297E-05	0,5215	15,6451	52,78	42,72	95,50	0,28514	0,08929
45	0,08988	6931,59	1,297E-05	0,5215	15,6453	55,40	46,87	102,27	0,28533	0,00020
46	0,09551	7364,46	1,297E-05	0,5215	15,6458	57,41	61,26	118,66	0,28584	0,00051
47	0,09995	7730,85	1,293E-05	0,5210	15,6297	55,20	64,11	119,31	0,26967	-0,01617
48	0,09411	7364,99	1,278E-05	0,5189	15,5678	56,45	68,47	124,93	0,20779	-0,06188
49	0,08813	6925,65	1,273E-05	0,5182	15,5457	57,62	70,41	128,02	0,18569	-0,02210
50	0,09527	7440,07	1,280E-05	0,5193	15,5786	59,08	73,37	132,45	0,21857	0,03288
51	0,09582	7254,92	1,321E-05	0,5247	15,7420	65,66	90,22	155,88	0,38199	0,16342

Analisando os resultados obtidos, observa-se importante variação do valor de *compliance* nos corpos de prova ensaiados, principalmente nos menores. Em várias situações, o *compliance* da rampa ($i-1$) atingiu um valor maior do que na rampa seguinte. Idealmente, os valores de *compliance* deveriam crescer à medida que o ensaio ocorresse, indicando um aumento da flexibilidade elástica do corpo de prova. Como visto no item 3.4.2, os valores de *compliance* dependem do valor de carga e deslocamento da boca da trinca, expondo a grande influência que o controle de aquisição de dados exerce nesse tipo de ensaio. As diferentes variações de carga que ocorreram durante os testes e a necessidade de conversão de medidas de deformação para deslocamento da boca da trinca são dois fatores que podem ter influenciado negativamente na obtenção dos resultados.

Em consequência da variação do *compliance*, em algumas rampas obtiveram-se valores de $a_{(i-1)}/W$ inferiores à $a_{(i)}/W$, o que não condiz fisicamente. À medida que o corpo de prova está sendo carregado a incrementos de carga maiores, o ligamento remanescente passa a ser afetado de duas maneiras: permanecendo do mesmo tamanho, indicando que não houve propagação dúctil de trinca e o valor de $a_{(i)}/W$ é conservado, ou então será reduzido, indicando propagação dúctil de trinca e aumentando o valor de $a_{(i)}/W$. Uma vez o ligamento remanescente reduzido, a sua dimensão referente ao incremento $a_{(i)}/W$ anterior é irreversível, inviabilizando a ideia de se ter um $a_{(i)}/W$ menor que $a_{(i-1)}/W$. Este fato resulta em alguns valores negativos de propagação de trinca $\Delta a_{(i)inc}$, que representa o valor de propagação a cada "rampa". O valor negativo de propagação estável de trinca tem sido reportado na literatura e diz-se ocorrer por fatores de fricção, instrumentação utilizada nos ensaios, desalinhamento do corpo de prova

com a célula de carga e/ou talvez pelo efeito físico do comportamento do material diante ao embotamento na ponta da trinca. (SILVA, 2018) (UNDERWOOD, 1994) (VOSS *et al.*, 1985).

Ainda com relação aos valores de *compliance*, pode-se observar na tabela 14 e figura 42 que os valores médios obtidos decrescem à medida que a geometria do espécime aumenta, indicando a maior rigidez dos corpos de prova mais robustos.

Tabela 14 - Valores médios de compliance por ensaio.

Identificação dos corpos de prova	C médio (mm/N)
SE(B)_1	2,307E-05
SE(B)_2	2,342E-05
SE(B)_3	2,195E-05
SE(B)_4	
SE(B)_5	1,639E-05
SE(B)_6	1,253E-05

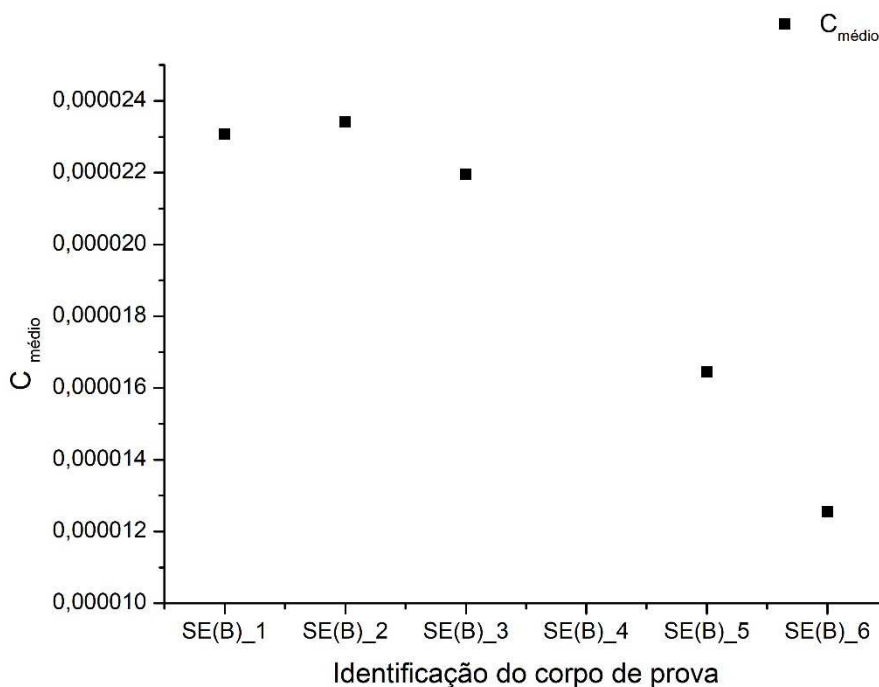


Figura 42 - *Compliance* médio em função da geometria do corpo de prova.

Apesar da variação do *compliance* ao longo dos ensaios, pôde-se verificar que a ordem de grandeza desses dados estava correta ao correlacionar os valores de comprimento de trinca iniciais mensurado com os calculados para a primeira “rampa”, conforme apresentados na tabela 15.

Tabela 15 - Tamanho de trinca inicial mensurado e calculado na primeira “rampa”.

Identificação dos corpos de prova	a_{real_0} (mm)	$a_{\text{calculado}_1}$ (mm)
SE(B)_1	10,731	10,986
SE(B)_2	10,709	11,072
SE(B)_3	13,492	13,365
SE(B)_4	12,475	
SE(B)_5	16,512	17,016
SE(B)_6	15,360	15,370

Na tabela 16 estão dispostos os valores totais de propagação estável de trinca mensurado e o calculado (Δa_{total} , referente ao $\Delta a_{(i)}$ na última rampa i).

Tabela 16 – Propagação de trinca mensurado e calculada.

Identificação dos corpos de prova	Δa_{real} (mm)	Δa_{total} (mm)
SE(B)_1	0,092	0,5626
SE(B)_2	0,094	0,3585
SE(B)_3	0,122	0,6185
SE(B)_4		
SE(B)_5	0,255	0,7245
SE(B)_6	0,300	0,38199

Percebe-se que os valores de propagação de trinca calculado para todos os corpos de prova estão superestimados. Esse efeito é menos significativo para o corpo de prova SE(B)_6, cujos valores mensurados e calculados apresentam coerência.

4.4.2. Curvas R dos corpos de prova SE(B)_5 e SE(B)_6

As figuras 43, 44 e 45 apresentam os valores de J em função da propagação de trinca obtida para os corpos de prova SE(B)_1, SE(B)_2 e SE(B)_3, respectivamente, sem quaisquer limites ou linhas de exclusão. No entanto, para esses corpos de prova, os pontos obtidos não foram considerados válidos para relacionar com a curva de resistência à fratura do material e foram aqui disponibilizadas apenas para caráter informativo.

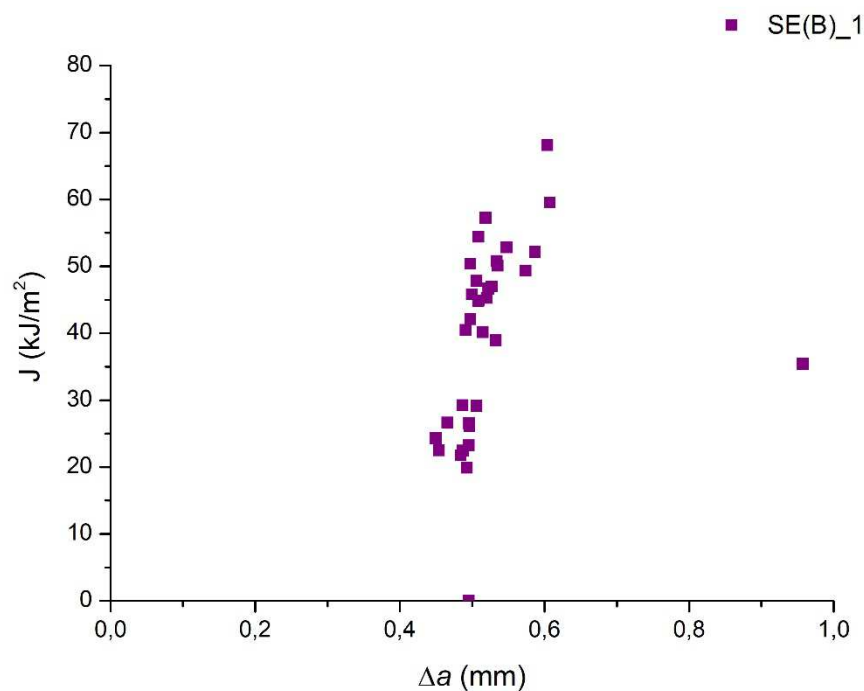


Figura 43 - J em função de Δa para o corpo de prova SE(B)_1.

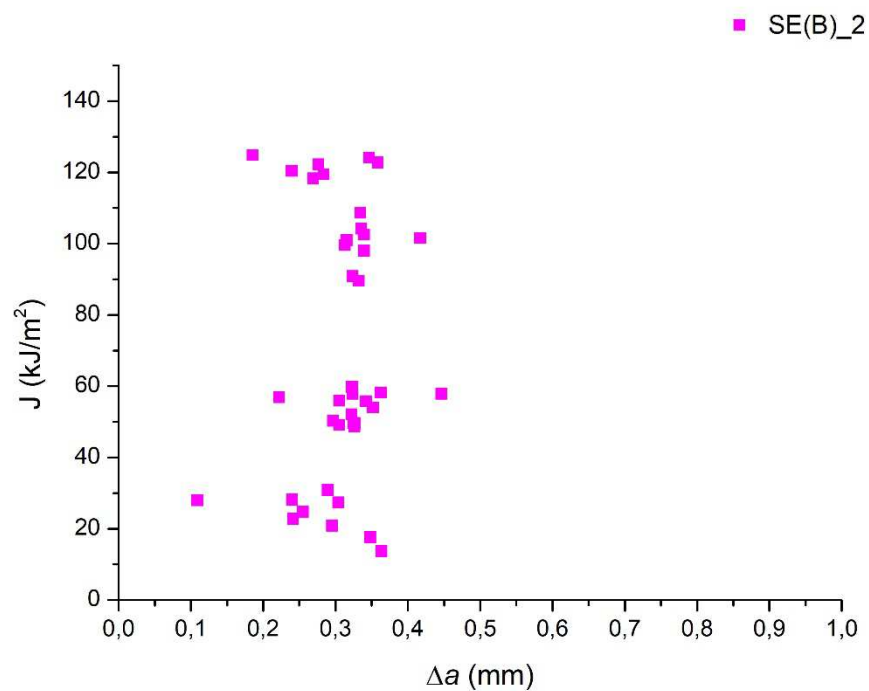


Figura 44 - J em função de Δa para o corpo de prova SE(B)_2.

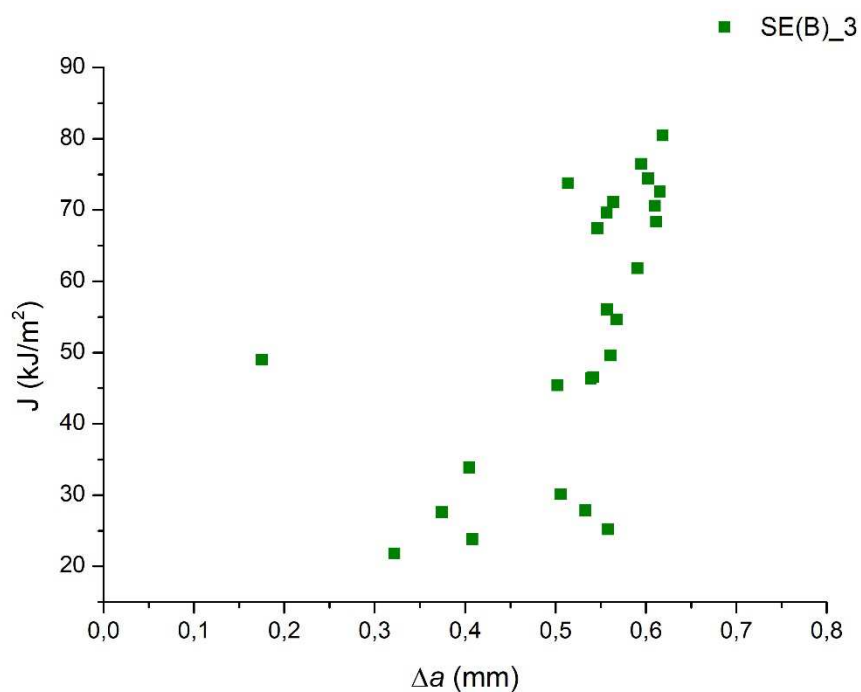


Figura 45 - J em função de Δa para o corpo de prova SE(B)_3.

As figuras 46 e 47 apresentam a curva de resistência obtida para o corpo de prova SE(B)_5 com a delimitação dos limites máximos de J e Δa e com as

linhas de construção, exclusão à 0,15 mm, *offset* 0,2 mm, *offset* 0,5 mm e de exclusão a 1,5 mm, conforme citado em 2.3.2.

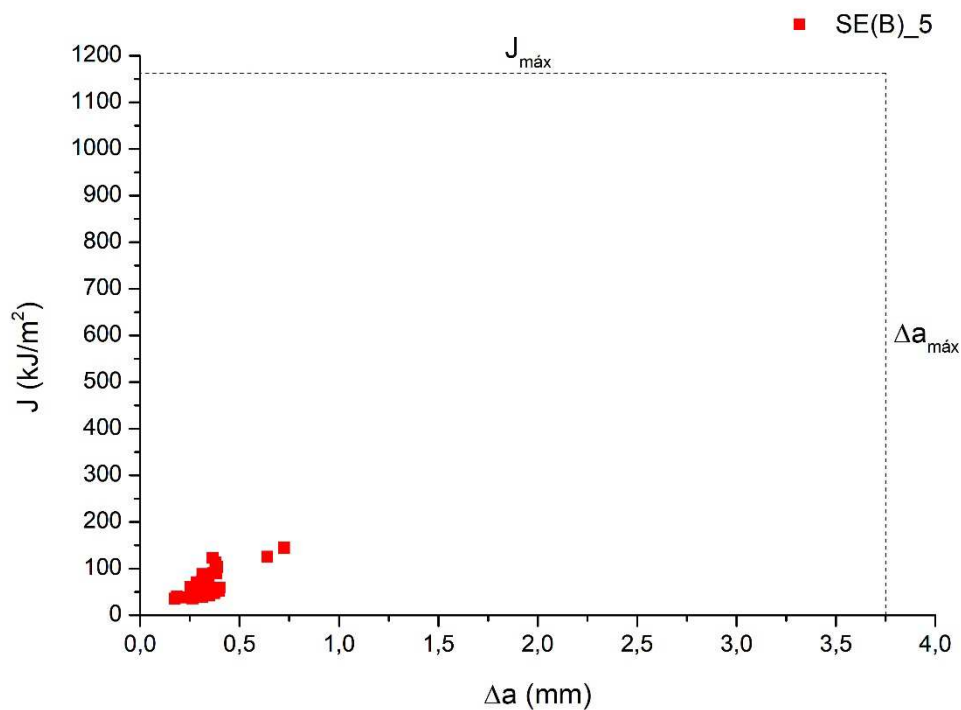


Figura 46 – Curva de resistência para o corpo de prova SE(B)_5: Limites máximos de J e Δa .

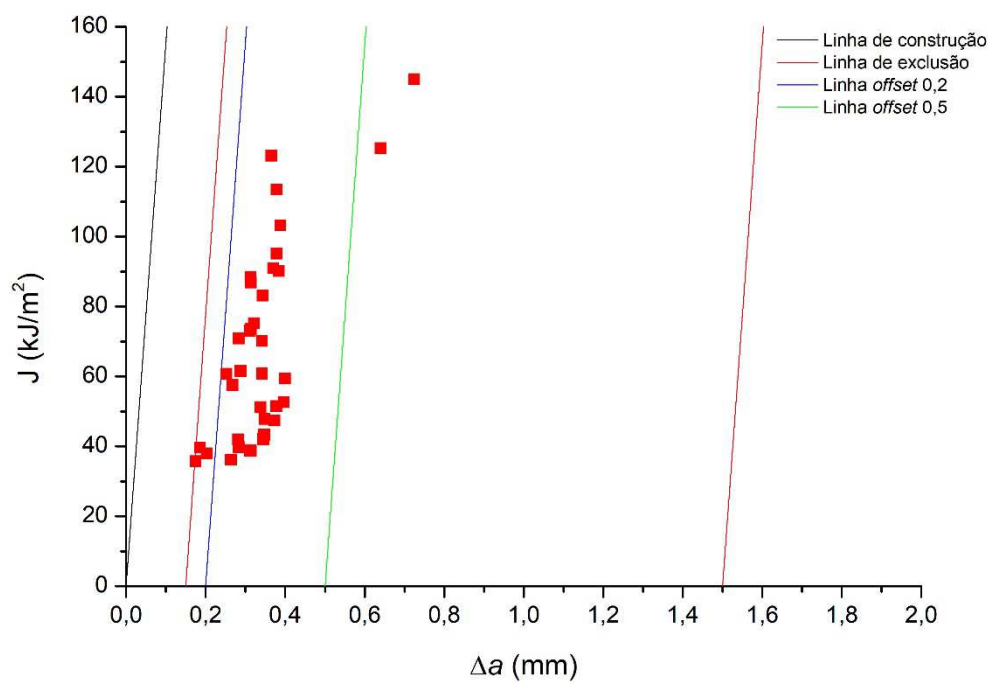


Figura 47 – Curva de resistência para o corpo de prova SE(B)_5: Linhas de construção, exclusão à 0,15 mm, *offset* 0,2 mm, *offset* 0,5 mm e de exclusão a 1,5 mm.

Verifica-se na figura 47 que a maioria dos pontos obtidos se encontram entre a linha de exclusão a 0,15 mm e a linha *offset* 0,5 mm. Uma hipótese associada a este fato é o de que o crescimento obtido é referente apenas ao embotamento da trinca, embora a norma ASTM E1820 considere que apenas os pontos à esquerda da linha de exclusão a 0,15 mm estejam associados a isso. Todos os dados desse ensaio foram considerados qualificáveis segundo a ASTM E1820.

Os pontos foram ajustados por meio da regressão que obedece à lei de potência da eq. (42). A partir de então, o valor de J_Q foi obtido à partir da interseção da linha *offset* 0,2 mm com a curva de potência. Como $B > 10 J_Q / \sigma_y$ e $b_0 > 10 J_Q / \sigma_y$, J_Q é considerado o valor crítico a partir do qual ocorre propagação estável de trinca, J_{IC} .

$$J = 187,79 \Delta a^{0,9822} \quad (42)$$

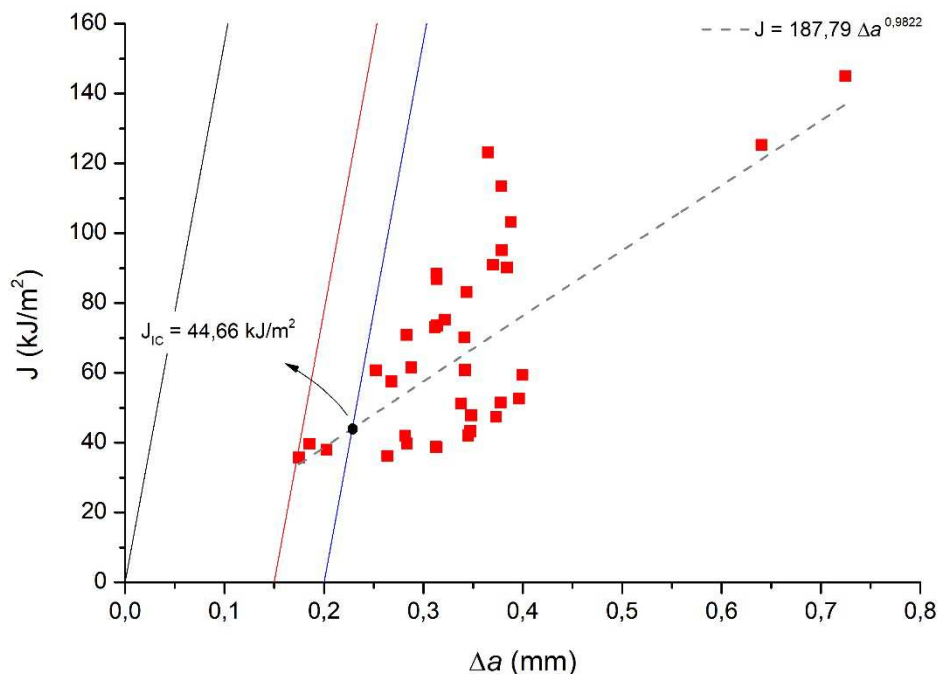


Figura 48 – Curva de resistência para o corpo de prova SE(B)_5: Determinação de J_{IC} .

Analogamente, as figuras 49 e 50 dispõem a curva de resistência à fratura para o corpo de prova SE(B)_6 com os limites de J e Δa máximo e as linhas auxiliares mencionadas em 2.3.2.2.

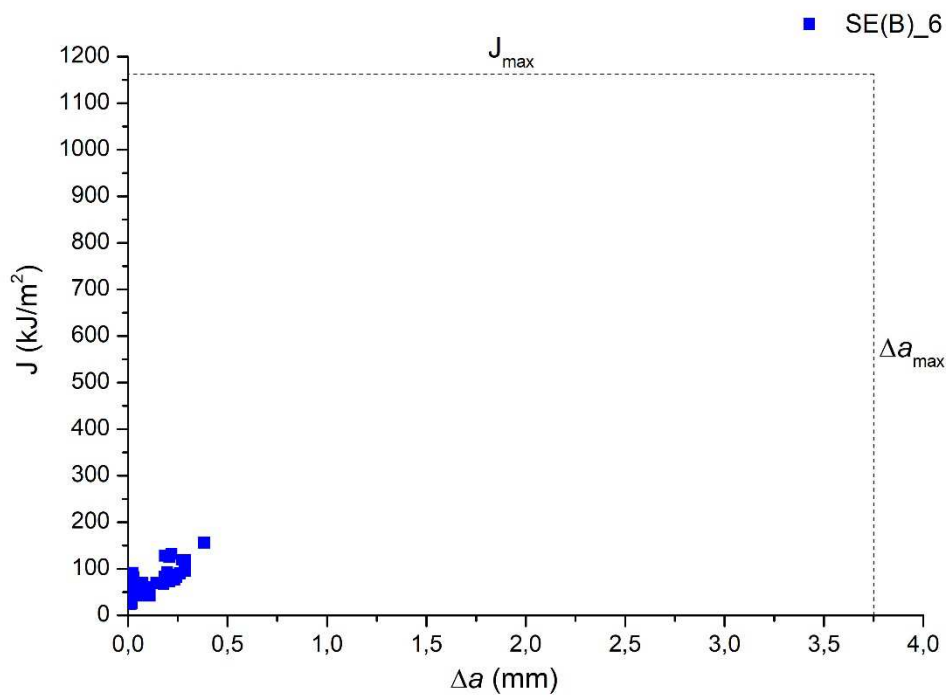


Figura 49 – Curva de resistência para o corpo de prova SE(B)_6: Limites máximos de J e Δa .

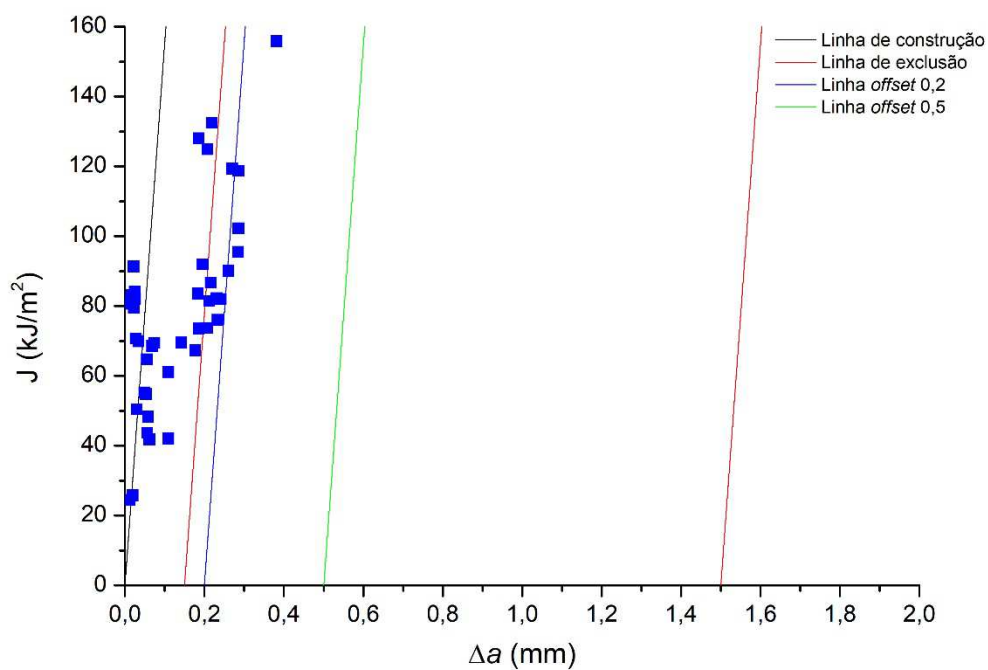


Figura 50 – Curva de resistência para o corpo de prova SE(B)_6: Linhas de construção, exclusão à 0,15 mm, offset 0,2 mm, offset 0,5 mm e de exclusão a 1,5 mm.

No caso do corpo de prova SE(B)_6, observa-se que grande quantidade de pontos obtidos encontram-se entre a linha de construção e a linha de exclusão a 0,15 mm, indicando o arredondamento da boca da trinca. Conforme preconização da norma ASTM E1820, os dados a esquerda da linha de exclusão a 1,5 mm foram descartados e a curva R foi obtida por meio da lei de potência da eq. (43) com os dados restantes.

$$J = 464,16 \Delta a^{1,1646} \quad (43)$$

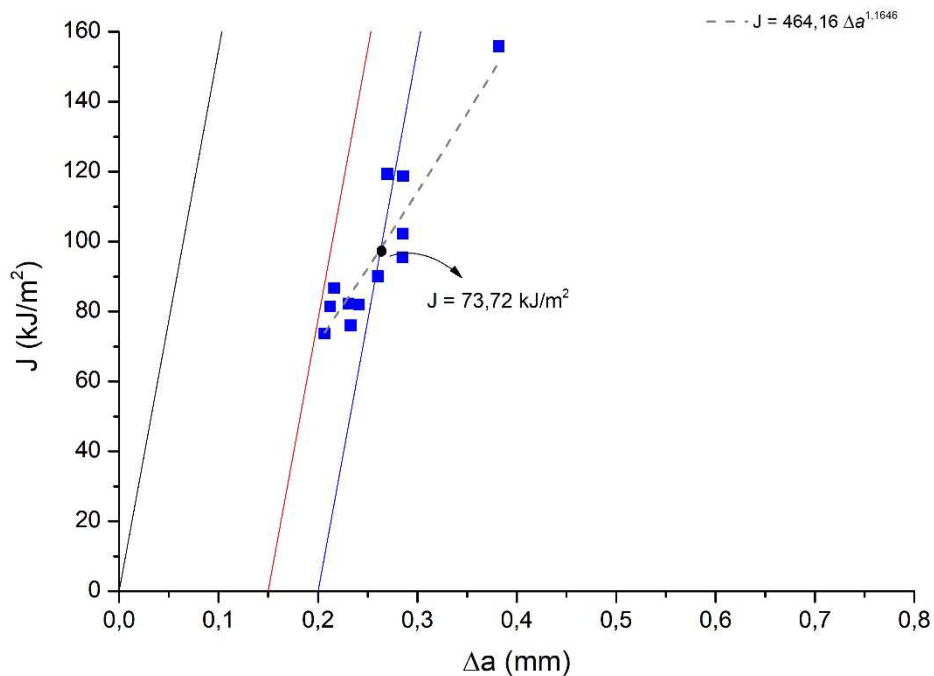


Figura 51 – Curva de resistência para o corpo de prova SE(B)_6: Determinação de J_{IC} .

Embora o coeficiente de potência C_2 da curva de ajuste (eq. (24)) para esse caso seja maior do que 1,0 mm, optou-se por determinar, mesmo assim J_Q por meio da interseção da linha *offset* 0,2 mm com a curva ajustada. Uma vez que $B > 10 J_Q / \sigma_y$ e $b_0 > 10 J_Q / \sigma_y$, J_Q é considerado J_{IC} .

Com base na tabela 17, observa-se que os valores de J_{IC} obtidos para ambos os ensaios apresentam uma variação de cerca de 60%. Uma hipótese relacionada a essa diferença é com relação à taxa de descarregamento aplicada em cada um dos ensaios. O ensaio no corpo de prova SE(B)_5 foi realizado à uma taxa de descarregamento inferior ao do corpo de prova SE(B)_6, e os resultados de J_{IC} foram também inferiores. Uma investigação mais completa dessa questão é sugerida para futuros trabalhos na área.

Tabela 17 - Valores de J_{IC} para os corpos de prova SE(B)_5 e SE(B)_6.

Identificação dos corpos de prova	J_{IC} (kJ/m ²)
SE(B)_5	44,66
SE(B)_6	73,72

4.5. Análise fractográfica

Nas figuras 52 e 53 são mostradas as fractografias obtidas por MEV das superfícies de fratura do corpo de prova SE(B)_6. Podem-se diferenciar claramente três regiões: região de fadiga (pré-trincamento), região de propagação dúctil e região de fratura frágil (após fragilização do espécime com nitrogênio). Na figura 53 têm-se a ampliação em 800x da região de propagação dúctil da trinca durante o teste e é notada claramente a formação de *dimples* que, como visto em 2.1.1.1., caracterizam a fratura dúctil de um material. Com exceção do corpo de prova SE(B)_4, todos os corpos de prova apresentaram estrutura semelhante.

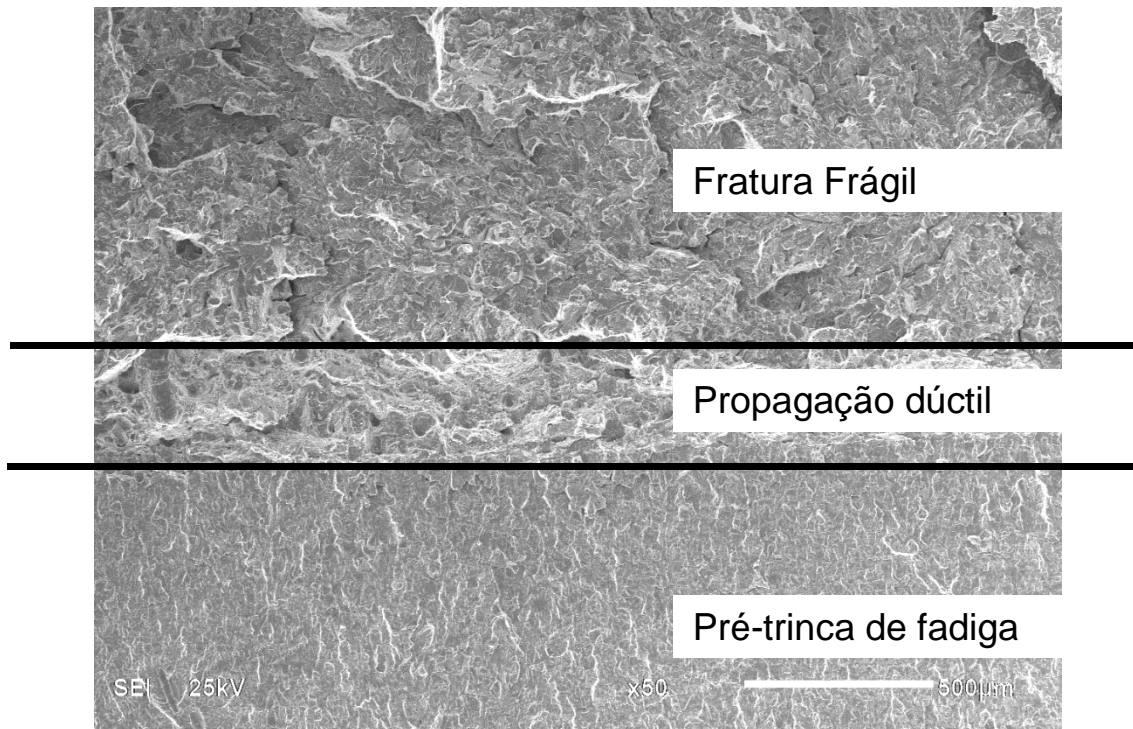


Figura 52 – Fractografia da superfície do corpo de prova SE(B)_6: Ampliação de 50x interface entre pré-trinca de fadiga, propagação de trinca e fratura frágil.

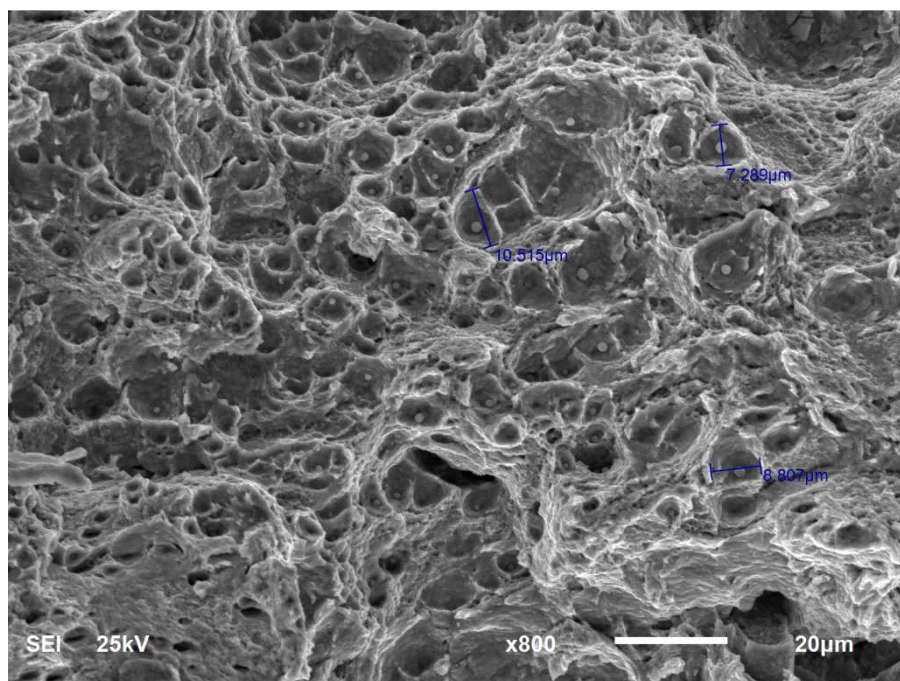


Figura 53 – Fractografia da superfície do corpo de prova SE(B)_6: Ampliação de 800x sobre a propagação de trinca.

Observando as imagens obtidas por MEV para o corpo de prova SE(B)_4 com ampliação de 8x (figura 54) e 400x (figura 55), pode-se identificar claramente a interface entre a pré-trinca de fadiga e a fratura frágil que ocorreu

logo no início do ensaio, ao ocorrer a aplicação de uma carga de quase 2x o valor de $P_{m\acute{a}x}$.

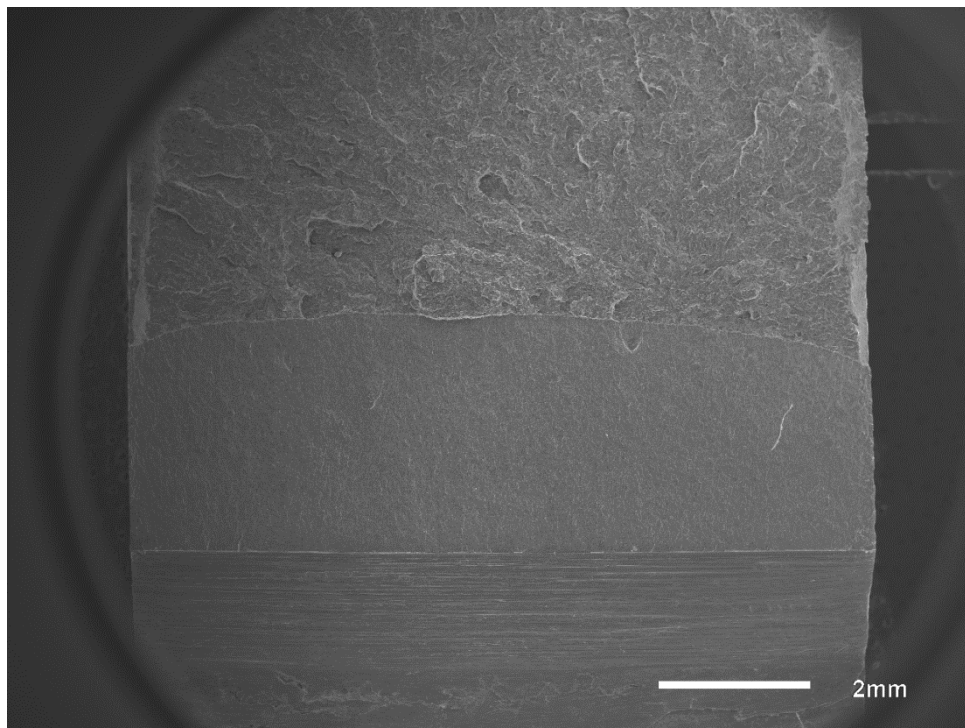


Figura 54 – Superfície do corpo de prova SE(B)_4: Ampliação de 8x.

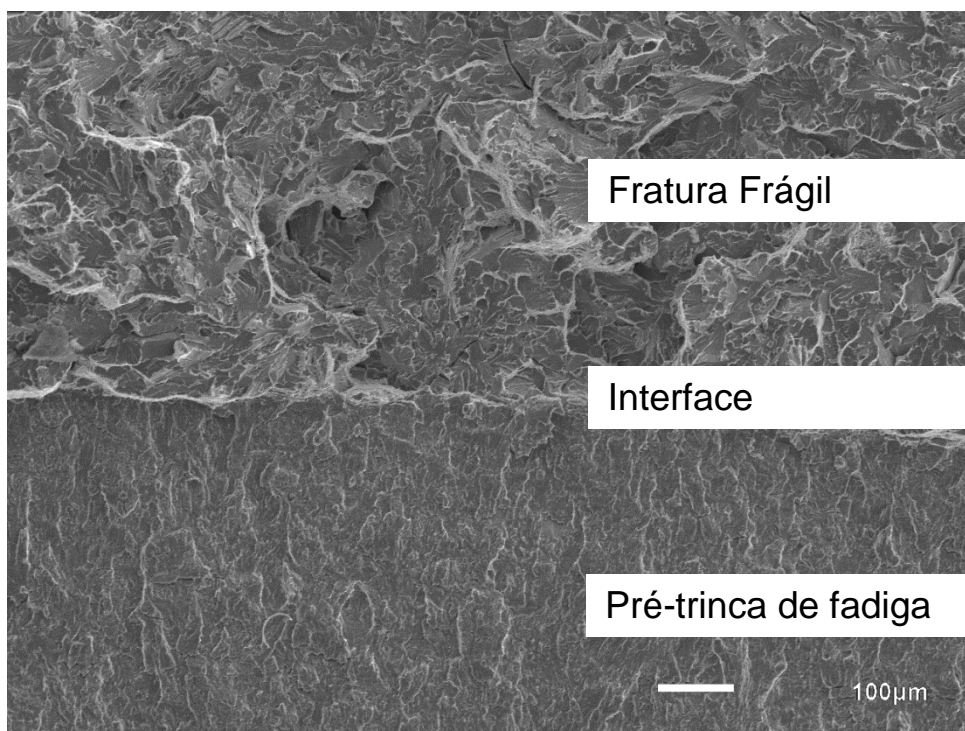


Figura 55 - Fractografia da superfície do corpo de prova SE(B)_4: Ampliação de 400x.

5. Conclusões

O presente trabalho apresentou a determinação experimental de curvas de resistência à propagação de trincas para o aço estrutural 42CrMo4 em corpos de prova SE(B) com razão $a/W = 0,5$, utilizando a técnica de corpo de prova único através do método dos descarregamentos parciais. Os resultados obtidos nessa dissertação permitiram estabelecer as seguintes conclusões:

- A metodologia dos descarregamentos parciais para a obtenção de curvas de resistência requer equipamentos bem aferidos e com excelente precisão para aquisição dos dados;

- Apesar da variação do *compliance* ao longo dos ensaios, pode-se verificar que a ordem de grandeza desses dados estava correta ao correlacionar os valores de comprimento de trinca iniciais mensurado e os calculados;

- Percebeu-se que os valores de propagação de trinca calculado para todos os corpos de prova estão superestimados. Esse efeito é menos significativo para o corpo de prova SE(B)_6,

- Não foi possível, com a máquina disponível, a determinação de curvas de resistência utilizando de corpos de prova pequenos, com espessuras de 10 mm e larguras de 20 mm e 25 mm;

- Obtiveram-se curvas de resistência à fratura para os ensaios com os corpos de prova com espessura de 15 mm e largura de 30 mm. Os valores de J crítico para o início da propagação estável de trinca foram determinados a partir da interseção da linha de embotamento (offset 2,0 mm) e a curva de ajuste dos pontos considerados.

- Acredita-se que o material utilizado não seja apropriado para levantamento de curvas R segundo a norma ASTM E1820. O crescimento de trinca obtido pode ter sido referente apenas ao embotamento da trinca.

6. Sugestões para trabalhos futuros

Para uma investigação mais completa e validação da metodologia aplicada nesta dissertação, os seguintes tópicos são propostos para futuros trabalhos:

- Obtenção de curvas de resistência do aço 42CrMo4 à partir de ensaios em corpos de prova SE(B) mais robustos, com no mínimo $W = 35$ mm;
- Utilização do modo de controle por CMOD ao invés da carga durante o ensaio de tenacidade à fratura;
- Realizar comparação da tenacidade à fratura em corpos de prova SE(B) de mesma geometria, porém com diferentes razões a/W ;
- Verificação da influência da taxa de descarregamento nos resultados dos ensaios;
- Uso da técnica de descarregamentos parciais em corpos de prova do tipo C(T);
- Aplicar a metodologia descrita nesse trabalho em outros materiais de engenharia, priorizando materiais mais dúcteis para obtenção de maior propagação estável de trinca.

7. Referências bibliográficas

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E1820: Standard test method for measurement of fracture toughness**. USA, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E8M – 16a: Standard test methods for tension testing of metallic materials**. West Conshohocken. 2016

ANDERSON, T. L. **Fracture Mechanics: fundamentals and applications**. 3ª ed. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2005, 640p.

ARAÚJO, A. A. **Curvas de resistência CTOD-R da interface METAL-CLAD de tubos API X55 cladeados por soldagem com inconel 625**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.

BARENBLATT, G. I. **The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture**. Advances in Applied Mechanics, Vol. VII, Academic Press, 1962, p. 55-129.

BEGLEY, J. A.; LANDES, J. D. **The J-integral as a fracture criterion**. ASTM STP 514, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1972, p. 1-20.

BURDEKIN, F. M.; STONE, D. E. W. **The crack opening displacement approach to fracture mechanics in yielding materials**. Journal of Strain Analysis, Vol. 1, 1966, p. 145-153.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8ª ed. LTC, Rio de Janeiro, 2013. 817p.

CHIODO, M. S. G. **Procedimento de avaliação da integral J e CTOD para dutos com trincas circunferenciais submetidos à flexão e aplicação à instalação de risers pelo método carretel.** Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009.

CLARKE, G. A. **Single specimen test for JIC determination revisited fracture mechanics.** In ROBERTS, R., Fracture Mechanics, ASTM STP 743, American Society for Testing and Materials, 1991, p. 553-575.

CRAVERO, S. **Desenvolvimento de procedimentos para avaliação de curvas J-R em espécimes à fratura SE(T) utilizando o método de flexibilidade.** Tese, Universidade de São Paulo, 2007.

CROFTON, S. **ME3 Fundamentals of fracture mechanics.** Lecture notes 2014-15. Imperial College London, UK.

DET NORSKE VERITAS. **DNV-RP-F108: fracture control for pipeline installation methods introducing cyclic plastic strain.** Noruega, 2006.

DONATO, G. H. B. **Efeitos de heterogeneidades mecânicas sobre as forças motrizes de trincas em juntas soldadas: Determinação experimental de tenacidade e extensão de metodologias de avaliação de criticidade de defeitos.** Tese de Doutorado, USP, 2008.

DUGDALE, D. S. **Yielding in steel sheets containing slits.** Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 8, 1960, p. 100-104.

FONTES, O. H. P. M. **Curvas de resistência e tenacidade à fratura de laminado fibra metal glare em baixa temperatura.** Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

FRANCISCO, J. C. S. **Avaliação da tenacidade a fratura do aço API 5L X70 utilizado na fabricação de dutos transportadores de gás e petróleo.** Dissertação de Mestrado, USP, 2009.

GRIFFITH, A. A. **The phenomena of rupture and flow in solids.** Philosophical Transactions, Series A, Vol. 221, 1920, p.163-198.

HUTCHINSON, J. W. **Singular behavior at the end of a tensile crack tip in a hardening material.** Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 16, 1968, p. 13-31.

IRWIN, G. R. **Analysis of stresses and strains near the end of a crack transversing a plate.** Journal of Applied Mechanics, Vol. 24, 1957, p.361-370.

IRWIN, G. R. **Onset of fast crack propagation in high strength steel and aluminium alloys.** Sagamore Research Conference Proceedings, Vol. 2, 1956, p. 289-305.

IRWIN, G. R. **Plastic zone near a crack and fracture toughness.** Sagamore Research Conference Proceedings, Vol. 4, Syracuse University Research Institute, Syracuse, NY, 1961, p. 63-78.

JOYCE, J. A. **Manual on elastic-plastic fracture: Laboratory test procedures.** Pennsylvania: ASTM manual series-MNL 27, 1996.

LANDES, J. D.; BEGLEY, J. A. **The effect of specimen geometry on J_{IC} .** ASTM STP 514, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1972, p. 24-29.

MARTINS, G. P. **Determinação dos parâmetros de iniciação J_i e δ_i em junta de aço ASTM A 516 grau 65-N, soldada por arco submerso.** Dissertação, Universidade Federal de Minas Gerais, 1985.

MARTINS, I. P. **Curvas J-R e CTOD-R dos aços estruturais segundo normas ASTM e BSI.** Monografia de Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

MATHIAS, L. L. S. **Avaliação experimental de curvas J-R em juntas soldadas circunferenciais de risers rígidos de aço API 5L X80 utilizando corpos de prova SE(T) e SE(B).** Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2013.

MEDINA, J. A. H. **Avaliação de previsão de fratura elasto-plástica.** Tese de Doutorado, PUC-Rio, 2014.

MENEZES, J. T. O. **Curvas de resistência de material de solda de aço API X65 utilizando a técnica de normalização.** Monografia de Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

RICE, J. R. **A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks.** Journal of Applied Mechanics, Vol. 35, 1968, p. 379-386.

RICE *et al.* **Plane Strain Deformation near a crack tip in a power-law hardening material.** Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 16, 1968, p. 1-12.

ROCHA, M. A. C. **Análise das propriedades Mecânicas do aço SAE 4140 com estrutura Bifásica.** Dissertação de Mestrado, 2004.

RUGGIERI, C. **Further results in J and CTOD estimation procedures for SE(T) fracture specimens – Part I: homogeneous materials.** Engineering Fracture Mechanics, v. 79, p. 245-265.

SHIH, C. F. **Relationship between the J-integral and the crack opening displacement for stationary and extending cracks.** Journal of the mechanics and physics of solids, Vol. 29, 1981, p. 305-326.

SILVA, M. C. **Caracterização das propriedades mecânicas e metalúrgicas do aço API 5L X80 e determinação experimental de curvas J-R para avaliação da tenacidade à fratura.** Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004.

SILVA, T. M. **Aplicação da integral-J em aços de diferentes limites de escoamento.** Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, 2018.

SOUZA, T. L. F. **Análise comparativa da resistência à fratura dos aços SAE 1020 e SAE 4140.** Monografia de Graduação, PUC-Rio, 2017.

SURESH, S. **Fatigue of materials.** Second Edition. Massachussets Institute of Tecnology. Cambridge University Press, 2006.

UNDERWOOD, J. H.; TROIANO, E. J.; Abbott, R. T., **Simpler Jlc Test and Data Analysis Procedures for High-Strength Steels,** American Society for Testing and Materials, ASTM STP 1207, v. 24, Philadelphia, 1994, p. 410-421.

VALIM, M. T. **Tenacidade à fratura da junta soldada obtida a arco submerso de aço API 5L grau X-80.** Dissertação de mestrado, PUC-Rio, 2005.

VOSS, B.; MAYVILLE, R. A. **The use of the partial unloading compliance method for the determination of J-R curve and JIC.** American Society for Testing and Materials, ASTM STP 856, v. 24, Philadelphia, 1985, p. 117-130.

WELLS, A. A. **Unstable crack propagation in metals: Cleavage and fast fracture.** Proceedings of the Crack Propagation Symposium, Vol. 1, Paper 84, Cranfield, UK, 1961.

ZHU, X. **J-integral resistance curve testing and evaluation.** Journal of Zhejiang University Science A. v. 10, 2009, p. 1541- 1560.

ZHU, X. K; JOYCE, J. A. **Review of fracture toughness (G, K, J, CTOD, CTOA) testing and standardization.** Engineering Fracture Mechanics, 2012.