

KARINA DE PAULA SILVA

**ESTIMATIVA DA TENACIDADE À FRATURA
CONFORME A ASTM E1820 VIA ELEMENTOS
FINITOS**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2025

KARINA DE PAULA SILVA

**ESTIMATIVA DA TENACIDADE À FRATURA
CONFORME A ASTM E1820 VIA ELEMENTOS
FINITOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de concentração: Materiais de Processos de Fabricação.

Orientadora: Profa. Dr. Rosenda Valdes Arencibia

Uberlândia – MG

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

S586e
2025 Silva, Karina de Paula, 1995-
 Estimativa da tenacidade à fratura conforme a ASTM E1820 via
 elementos finitos [recurso eletrônico] / Karina de Paula Silva. - 2025.

 Orientadora: Rosenda Valdés Arencibia.
 Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
 Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica.
 Modo de acesso: Internet.
 Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2025.5093>
 Inclui bibliografia.
 Inclui ilustrações.

 1. Engenharia Mecânica. I. Valdés Arencibia, Rosenda, 1969-,
 (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-
 graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621.01

 André Carlos Francisco
 Bibliotecário-Documentalista - CRB-6/3408



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica

Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-
MG, CEP 38400-902

Telefone: (34) 3239-4282 - www.posmecanicaufu.com.br - secposmec@mecanica.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, nº 652, PPGEM				
Data:	17/01/2025	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	[16:00]
Matrícula do Discente:	12212EMC007				
Nome do Discente:	Karina de Paula Silva				
Título do Trabalho:	Estimativa da Tenacidade à Fratura Conforme a ASTM E1820 via Elementos Finitos				
Área de concentração:	Materiais e Processos de Fabricação				
Linha de pesquisa:	Tribologia e Materiais				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Desenvolvimento de Ensaio Charpy Convencional e Miniaturizado para Arames de Dutos Flexíveis				

Reuniu-se por videoconferência a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Prof. Dr. Waldek Wladimir Bose Filho - USP/UFU; Prof. Dr. Antonio Piratelli Filho - UnB e Profª Drª Rosenda Valdés Arencibia - UFU, orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr(a). Rosenda Valdés Arencibia, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovada.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente

ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Rosenda Valdes Arencibia, Professor(a) do Magistério Superior**, em 23/01/2025, às 10:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Waldek Wladimir Bose Filho, Usuário Externo**, em 23/01/2025, às 11:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Antonio Piratelli Filho, Usuário Externo**, em 23/01/2025, às 16:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6001652** e o código CRC **D5E5E810**.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Cheily, e ao meu pai, Cláudio, expresso meu profundo agradecimento pelo amor, apoio e encorajamento constantes. Vocês sempre estiveram ao meu lado, acreditando em mim e me inspirando a alcançar meus objetivos.

Ao meu filho, Pedro, que trouxe luz e alegria à minha vida, tornando cada desafio mais significativo. Agradeço a ele por ser minha fonte de inspiração e motivação constante.

Agradeço também, a todos os meus irmãos e irmãs, cujo apoio e incentivo foram fundamentais ao longo desta jornada acadêmica.

Às minhas amigas Lohanna, Marina, Ana Luiza e Lorryne, meu sincero agradecimento por todo o apoio na minha jornada na pós-graduação. Sou extremamente grata por ter vocês ao meu lado.

Às minhas amadas avós Natalicia, Maria Alice (in memoriam) e meu querido avô Adilson, expresso minha profunda gratidão por todo o suporte emocional e pelos valores que me transmitiram.

À minha orientadora, Professora Rosenda, pelas valiosas contribuições ao longo deste trabalho, pela dedicação, pela motivação e pelo apoio que me forneceu. Não há palavras que expressem toda a minha gratidão por você e pela equipe do Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD). Especialmente ao Bruno Cunha Carneiro e Joyce Antunes da Silva. Expresso minha gratidão à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela concessão da bolsa de estudos, que foi fundamental para a viabilização deste trabalho. Agradeço também à Universidade Federal de Uberlândia (UFU) por fornecer a estrutura e o ambiente acadêmico propícios para o desenvolvimento da pesquisa e ao Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica da UFU.

A todas as outras pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, meu sincero agradecimento.

SILVA, K. P. **Estimativa da Tenacidade à Fratura Conforme a ASTM E1820 via Elementos Finitos**. 2025. 69 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG.

Resumo

A necessidade de compreender e prever o comportamento dos materiais frente à propagação de trincas é um desafio contínuo, especialmente em aplicações críticas onde falhas podem gerar consequências graves. A abordagem tradicional, baseada em ensaios experimentais, apresenta limitações práticas, como a exigência de corpos de prova específicos, dificultando sua aplicação em determinados contextos. Para contornar esses desafios, este estudo propõe uma alternativa baseada em simulações numéricas realizadas pelo Método de Elementos Finitos (MEF), empregando o *software* Abaqus. O objetivo principal é desenvolver e validar uma metodologia numérica que permita replicar e, quando necessário, substituir ensaios experimentais para determinação do J_{IC} . A partir de resultados experimentais prévios de tenacidade à fratura realizados em corpos de prova do tipo compacto C(T) fabricados em aço AISI 4340-28 HRC e 40 HRC, é possível estruturar a simulação com condições de contorno e comparar os resultados simulados com os experimentais. O desenvolvimento inclui a modelagem da geometria do corpo de prova, a implementação das propriedades mecânicas de tração do material e a calibração do modelo com base em curvas força-deslocamento e na relação J_{IC} . A metodologia proposta é aplicada para estimar a tenacidade à fratura de dois aços utilizados na fabricação de arames de armaduras. Os resultados obtidos mostram que as simulações numéricas via elementos finitos são eficazes para a determinação da tenacidade à fratura conforme as diretrizes da norma ASTM E1820, uma vez que os valores de J_{IC} simulados apresentam concordância com os dados experimentais. O erro sistemático associado aos valores simulados de J_{IC} é de $-12,5 \text{ kJ/m}^2$ e de $-12,33 \text{ kJ/m}^2$ para o AISI 4340-40 HRC e 28 HRC, respectivamente. Este fato atribui uma boa exatidão ao valor de tenacidade à fratura obtido via simulação. Essa abordagem não apenas se mostra economicamente vantajosa, mas também amplia as possibilidades de análise em casos em que ensaios físicos seriam inviáveis. Este estudo contribui para o avanço das práticas de caracterização de materiais, promovendo maior segurança e eficiência no desenvolvimento e previsão das propriedades mecânicas dos materiais de engenharia, e assim possibilita aos projetistas a seleção mais adequada e rápida dos possíveis materiais.

Palavras-chaves: Tenacidade à fratura; Integral J; ASTM E1820; Simulação Numérica; Método de Elementos Finitos.

SILVA, K. P. **Estimation of Fracture Toughness According to ASTM E1820 Using Finite Element Analysis**. 2025. 69 p. Dissertation, Federal University of Uberlândia, Uberlândia – MG.

Abstract

The need to understand and predict the behavior of materials under crack propagation remains a continuous challenge, especially in critical applications where failures can lead to severe consequences. The traditional approach, based on experimental testing, presents practical limitations such as the requirement for specific specimen geometries, which hinders its application in certain contexts. To overcome these challenges, this study proposes an alternative approach based on numerical simulations using the Finite Element Method (FEM), implemented through the Abaqus software. The main objective is to develop and validate a numerical methodology capable of replicating and, when necessary, replacing experimental tests for the determination of J_{IC} . Based on previous experimental results of fracture toughness obtained from compact tension C(T) specimens made of AISI 4340 steel at 28 HRC and 40 HRC, it is possible to structure the simulation with appropriate boundary conditions and compare the simulated results with the experimental data. The development includes modeling the specimen geometry, implementing the material's tensile mechanical properties, and calibrating the model based on load-displacement curves and J_{IC} values. The proposed methodology is applied to estimate the fracture toughness of two steels used in the manufacturing of reinforcement wires. The results obtained show that finite element simulations are effective for determining fracture toughness in accordance with the ASTM E1820 standard, as the simulated J_{IC} values are consistent with the experimental data. The systematic error associated with the simulated J_{IC} values is -12.5 kJ/m^2 for AISI 4340 at 40 HRC and -12.33 kJ/m^2 for AISI 4340 at 28 HRC, indicating a high degree of accuracy in the simulated fracture toughness values. This approach not only proves to be economically advantageous but also expands the possibilities for analysis in situations where physical testing would be unfeasible. This study contributes to the advancement of material characterization practices, promoting greater safety and efficiency in the development and prediction of the mechanical properties of engineering materials, thus enabling designers to more quickly and appropriately select potential materials.

Keywords: Fracture toughness; J-Integral; ASTM E1820; Numerical Simulation; Finite Element Method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Composição de um duto flexível. Adaptado de COSER, 2019 apud FREIRE, 2023.	7
Figura 2.2 - Geometrias da seção transversal dos arames. Direção de retirada dos CPs (RIGONI et al., 2023).	7
Figura 2.3 - Geometria e dimensões dos CPs do tipo C(T) proposto na ASTM E1820 (ASTM, 2024).	8
Figura 2.4 - Geometria e dimensões dos CPs de acordo com a ASTM E1820 (ASTM, 2024).	8
Figura 2.5 - Geometria dos CPs SE(B) fabricados a partir dos arames (RIGONI et al., 2023).	9
Figura 2.6 - Dimensões de um CPs fabricado a partir de um arame (RIGONI et al., 2023)....	9
Figura 2.7 - Valores de KJc para um material proveniente de dois fornecedores a temperatura ambiente (Adaptado de Rigoni et al., 2023).	10
Figura 2.8 - Esquema representativo dos diferentes tipos de mecânica à fratura (Modificada de ANDERSON, 2005).	14
Figura 2.9 - Os três modos de fratura de uma trinca (KUMAR, 2020).	15
Figura 2.10 - Zona plástica na frente da trinca definida inicialmente por Irwin et. al (1958) e Irwin (1960) (Modificada de ANDERSON, 2005).	16
Figura 2.11 - Relação entre KC e a espessura do corpo de prova (Modificada de MEDINA, 2014).	17
Figura 2.12 - Geometria e dimensões do corpo de prova SE(B) definidas na norma ASTM E1820 (ASTM, 2024).	18
Figura 2.13 - Geometrias e dimensões dos dois possíveis corpos de prova C(T) conforme definidos na norma ASTM E1820 (ASTM, 2024).	19
Figura 2.14 - Geometria e dimensões do corpo de prova DC(T) definidas na norma ASTM E1820 (ASTM, 2024).	19
Figura 2.15 - Representação esquemática de um caminho escolhido no método Integral J (Modificada de LÓPEZ, 2010).	21
Figura 2.16 - Curva JR (Modificada de ANDERSON, 2005).	22
Figura 2.17 - Microestrutura do aço AISI 4340-40 HRC (ALMEIDA et al., 2023).	28

Figura 2.18 - Microestrutura do aço AISI 4340-28 HRC, plano S-L. Ataque: Nital 2 % (ALMEIDA et al., 2023).	29
Figura 2.19 - Sugestão de corpo de prova entalhado recomendado pela norma ISO 16573 (ISO, 2015b). Adaptado de Alvarenga (2022).	29
Figura 2.20 - Configuração geométrica e dimensões do CP para o ensaio de tração, especificadas em milímetros (ASTM E8/E8M, 2024).....	30
Figura 2. 21 - Geometria e dimensões do CP compacto usados para ensaios de resistência à fratura (ASTM E1820, 2024).	31
Figura 2.22 - Máquina de fadiga servo-hidráulica Instron® modelo 8801 (BASÍLIO, 2022)..	32
Figura 2.23 - Dimensões dos corpos de prova C(T) especificadas pela ASTM E1820 (ASTM, 2024).....	33
Figura 2.24 - Microestrutura dos (a) Aços A (ARENCIBIA et al., 2024) e (b) Aço B (ARENCIBIA et al., 2023).	36
Figura 3.1 - Interface do <i>software</i> Abaqus/CAE 2020.....	38
Figura 3.2 - Desenho técnico do corpo de prova C(T) da norma ASTM E1820 (ASTM, 2024).	38
Figura 3.3 – Geometria no <i>software</i> Abaqus/CAE 2020.	39
Figura 3.4 - Curva tensão em função da deformação para o aço liga 4340 com dureza 40 HRC.	39
Figura 3.5 - Tipos de elementos finitos adotados: a) C3D15 e b) C3D20R.	40
Figura 3.6 - (a) Representação da ponta da trinca (b) Relação a/W	41
Figura 3.7 - Detalhes da malha e dos 61 vetores alinhados à ponta da trinca.....	41
Figura 3.8 - Estratégia adotada para refinamento de malha para o modelo do ensaio convencional.	43
Figura 3.9 - Convergência de malha para o ensaio convencional.	44
Figura 3.10 - Definição de linhas de construção para qualificação de dados (ASTM E1820, 2024).	45
Figura 3.11 - Definição das regiões para Qualificação dos dados (ASTM E1820, 2024).....	46
Figura 4.1 - Curvas $J \times \Delta a$ obtidas conforme norma ASTM E1820 (ASTM, 2024) para o AISI 4340-28 HRC (SILVA, 2023).	49
Figura 4.2 - Curva $J \times \Delta a$ obtida conforme norma ASTM E1820 (ASTM, 2024) para o AISI 4340-40 HRC (ALVARENGA, 2022).	49
Figura 4.3 - Erro sistemático associado à simulação dos valores de J-integral simulados para o aço AISI 4340-40 HRC.	51

Figura 4.4 - Valores de J simulados, indicando um erro sistemático negativo para o aço AISI 4340-40 HRC.	51
Figura 4.5 - Erro sistemático associado aos valores simulados de J após o refinamento da malha, para o aço AISI 4340-40 HRC.	53
Figura 4.6 - Valores de J simulados após o refinamento da malha, indicando um erro sistemático negativo, porém menor.	53
Figura 4.7 - Valores de erro sistemático (em módulo) associado à J_{IC} antes e após o refinamento da malha.	54
Figura 4.8 - Distribuição de tensões na simulação numérica do corpo de prova compacto C(T) fabricado em aço AISI 4340-40 HRC.	55
Figura 4.9 - Campo de deformação do corpo de prova C(T) fabricado em aço AISI 4340-40 HRC.	55
Figura 4.10 - Distribuição da deformação plástica na ponta da trinca do corpo de prova C(T) fabricado em aço AISI 4340-40 HRC.	56
Figura 4.11 - Curva J-R do Aço A obtida via elementos finitos e a ASTM E1820 (ASTM, 2024).	57
Figura 4.12 - Curva J-R do Aço B obtida via elementos finitos e a ASTM E1820 (ASTM, 2024).	57
Figura 4.13 - Valores de tenacidade à fratura J_{IC} para o Aço A, Aço B, 4340-28 HRC e 4340-40 HRC. Valores obtidos via elementos finitos e a ASTM E1820 (ASTM, 2024).	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Composição química dos aços utilizados nos ensaios (ALMEIDA et al., 2023).	27
Tabela 2.2 - Propriedades mecânicas de tração e dureza.....	30
Tabela 2.3 - Composição química dos aços A e B em % de peso (ARENCIBIA et al., 2024).	35
Tabela 2.4 - Propriedade mecânicas dos Aços A e B (ARENCIBIA et al. 2024).....	36
Tabela 4.1 - Valores de J_{IC} experimentais para os materiais ensaiados.....	50
Tabela 4.2 - Valores de J-integral obtidos via simulação (S) e experimentais (E) para o aço AISI 4340-40 HRC.....	50
Tabela 4.3 - Valores de J-integral obtidos via simulação após o refinamento da malha (R) e experimentais (E) para o aço AISI 4340-40 HRC.	52

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

Δa_{\max}	Comprimento máximo da trinca
(E)	Valor Experimental
(R)	Valor após refinamento da malha
(S)	Valor via Simulação
\underline{T}	Vetor Tensão
a_o	Comprimento do entalhe
\underline{u}	Vetor deslocamento na direção x
σ_F	Limite de resistência à tração do material
σ_{OUT}	Limite de resistência à tração
σ_Y	Limite de escoamento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
B	Espessura do corpo de prova
b_o	Largura inicial do corpo de prova
C(T)	Compacto de tração
C_1	Coeficientes ajustados
C_2	coeficientes ajustados
CP	Corpo de prova
CST	Corrosão Sob Tensão
CTOA	<i>Crack Tip Opening Angle</i>
CTOD	<i>Crack Tip Opening Displacement</i>
D	Diâmetro do corpo de prova

d	Diâmetro do corpo de prova de tração
DC(T)	Compacto de tração circular
E	Módulo de Elasticidade do Material
E_s	Erro sistemático
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
FEM	<i>Finite Element Method</i>
f_{ij}	Função angular de tensão
G	Taxa de liberação de energia elástica
GDS	<i>Glow Discharge Spectrometry</i>
Integral J	Integral J
J_{IC}	Tenacidade à fratura de iniciação elastoplástica
J_Q	Valor inicial de J_{IC} a ser validado
K	Fator de intensidade de tensão
k	Fator de escala
K_C	Fator de intensidade de tensão
K_{IC}	Fator de intensidade de tensão em um estado plano de deformação para pontos no início ou próximo do início da trinca
K_I	Tenacidade à fratura no estado plano de deformação para o modo I de fratura
K_{II}	Tenacidade à fratura no estado plano de deformação para o modo II de fratura
K_{III}	Tenacidade à fratura no estado plano de deformação para o modo III de fratura
K_J	Fator de Intensidade de Tensão
K_{Jc}	Fator de Intensidade de Tensão Crítico
K_{JIC}	Tenacidade à fratura
LAMEF	Laboratório de Metalurgia Física
LLD	<i>Load line displacement</i>

LTAD	Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste
MEEP	Mecânica de Fratura Elasto-Plástica
MEF	Método de Elementos Finitos
MFEP	Mecânica da Fratura Elastoplástica
MFLE	Mecânica da Fratura Linear-Elástica
NAMEF	Núcleo em Mecânica da Fratura e Integridade Estrutural
PIB	Produto Interno Bruto
r	Raio do entalhe
RVDT	<i>Rotary Variable Differential Transformer</i>
r_y	Raio de arredondamento na ponta da trinca
s	Comprimento do caminho escolhido
SE(B)	Flexão a três pontos
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
ν	Coeficiente de Poisson
$V(E)$	Valor experimental
$V(S)$	Valor simulado de tenacidade
W	Densidade de energia de deformação
Γ	Contorno a ser seguido em sentido anti-horário
σ	Tensão aplicada
σ_Y	Limite de escoamento do material
σ_{ys}	Limite de escoamento

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	1
INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivo Principal.....	2
1.2. Objetivos Específicos	3
1.3. Justificativas	3
1.4. Estrutura de Trabalho	4
CAPÍTULO II	6
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1. Fundamentos da Mecânica da Fratura	6
2.2. Elementos Finitos	22
2.3. Ensaio utilizando o método da Integral J	25
CAPÍTULO III	37
METODOLOGIA.....	37
3.1. Simulação via elementos finitos para análise e determinação dos valores de tenacidade à fratura	37
3.2. Validação da simulação	47
3.3. Aplicação da metodologia para determinar a tenacidade de outros materiais.....	47
CAPÍTULO IV	48
RESULTADOS	48
4.1. Resultados experimentais dos ensaios para determinação de J_{IC} (ASTM E1820)	48
4.2. Resultados preliminares da simulação dos valores de J_{IC}	50
4.3. Resultados definitivos da simulação dos valores de J_{IC}	52
4.4. Resultados da aplicação da simulação para obtenção da tenacidade à fratura em outros materiais	56
CAPÍTULO V	59
CONCLUSÕES	59
CAPÍTULO VI	61
PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A tenacidade à fratura é uma propriedade fundamental na ciência dos materiais, que caracteriza a capacidade de um material de resistir à propagação de trincas e à falha sob carga mecânica. Esta é definida como a resistência ao crescimento de trincas antes da fratura final (AHMADI et al., 2015). O conceito de tenacidade à fratura está intimamente relacionado ao fator de intensidade de tensão, um parâmetro-chave na mecânica de fratura elástica linear (THIERCELIN et al., 1987).

A ocorrência de fraturas se tornou um desafio para a humanidade a partir do momento em que o ser humano começou a construir estruturas e usá-las em seu dia a dia. À medida que a tecnologia se desenvolve, a superação desse desafio se torna cada vez mais difícil devido a que tecnologias mais complexas implicam, consequentemente, em fraturas e comportamentos estruturais mais difíceis de serem previstos. De acordo com Anderson (2005), um estudo econômico estimou que em 1978 o custo oriundo de fraturas nas estruturas fabricadas nos Estados Unidos era de \$119 bilhões de dólares, o que naquela época correspondia a aproximadamente 4 % do produto interno bruto do país. Esse mesmo estudo mostrou, portanto, que somente com os estudos existentes sobre a mecânica da fratura, seria possível minimizar o valor de custo com fraturas em \$28 bilhões.

O ensaio de tenacidade à fratura envolve vários métodos e parâmetros para caracterizar a resistência de um material à propagação de trincas. Diferentes parâmetros da mecânica da fratura, como o fator de intensidade de tensão (K), a taxa de liberação de energia (G), Integral J (J), o deslocamento da abertura na ponta da trinca ($CTOD$) e o ângulo de abertura na ponta da trinca ($CTOA$) são usados para quantificar a tenacidade à fratura (ZHU e JOYCE, 2012). Esses parâmetros ajudam a entender como os materiais se comportam sob diferentes condições de carga e cenários de trincas.

A integral J, foco deste estudo, é um método que fornece uma medida da taxa de liberação de energia na ponta da trinca e é usada para avaliar a resistência de um material à propagação de trincas (RICE, 1968). Este método pode ser muito útil em casos em que há variações espaciais nas propriedades do material, pois fornece uma medida abrangente da resistência à fratura (FISCHER et al., 2014).

A integral J é utilizada para determinar a tenacidade à fratura dos materiais quantificando a energia necessária para o crescimento e propagação de trincas (PÉREZ-GALMÉS et al., 2018). Ao analisar os valores da integral J obtidos em ensaios experimentais, os pesquisadores podem avaliar a capacidade do material de resistir à fratura sob diferentes condições de carga. Anderson (2005) afirma que método da Integral J é capaz de prover parâmetros que podem ser utilizados como critérios na análise de fraturas.

Neste contexto de ensaios de fratura normatizados, a ASTM E1820 (ASTM, 2024) oferece uma abordagem sistemática para avaliar a tenacidade à fratura utilizando a integral J como um parâmetro-chave. A proposta da norma é baseada em conceitos de mecânica de fratura Elasto-Plástica (MEEP) e fornece um método para a realização de ensaios que podem determinar com precisão o comportamento de fratura de materiais (TANKASALA et al., 2020).

No entanto, a integral J é um método destrutivo e inviável em algumas situações, além de exigir a utilização de corpos de prova (CP) projetados especificamente para este fim. Vale ressaltar que nem sempre há material disponível e suficiente para fabricar os CPs para este ensaio. Além disso, o ensaio é complexo, exige a utilização de máquinas robustas, controle rigoroso das condições de ensaio e um alto nível de experiência técnica para garantir a validade dos resultados. A necessidade de medições confiáveis de vários mensurandos, tais como força, deslocamento e comprimento da trinca durante seu crescimento, aliada às etapas de preparação do CP e análise dos dados, tornam o ensaio desafiador.

Ao final deste trabalho, espera-se demonstrar a eficácia e a exatidão dos valores de tenacidade à fratura obtidos via simulações numéricas e o método da integral J proposto pela ASTM E1820 (ASTM, 2024). Além disso, a comparação entre os resultados simulados e os experimentais permitirá identificar possíveis limitações e vantagens de cada abordagem, contribuindo para o aprimoramento das técnicas de caracterização de materiais e auxiliando no desenvolvimento de metodologias mais robustas e confiáveis para a avaliação da integridade estrutural.

1.1. Objetivo Principal

O objetivo deste trabalho é analisar a tenacidade à fratura obtida via modelamento

numérico e corroborar os resultados simulados com aqueles decorrentes de ensaios convencionais (Integral J) de acordo com as determinações da norma ASTM E1820 (ASTM, 2024).

1.2. Objetivos Específicos

Visando atingir o objetivo geral, tem-se os seguintes objetivos específicos:

Desenvolver, documentar e validar uma metodologia para a simulação numérica da tenacidade à fratura de materiais utilizando o método de elementos finitos (MEF) no *software* ABAQUS, seguindo as diretrizes da norma ASTM E1820 (ASTM, 2024).

Comparar os resultados das simulações com dados experimentais para avaliar a precisão e a eficácia da abordagem numérica na determinação da tenacidade à fratura do aço AISI 4340.

Determinar a tenacidade à fratura de componentes dos quais não se dispõe de material suficiente para fazer ensaios convencionais e analisar os resultados obtidos visando avaliar o potencial de uso da simulação bem como suas vantagens, limitações e potenciais melhorias.

1.3. Justificativas

A análise da tenacidade à fratura é essencial para prever a integridade estrutural de materiais e garantir a segurança e eficiência de componentes em operação. No entanto, a realização de ensaios experimentais pode ser inviável em situações em que a integridade dos componentes seria comprometida ou quando não há material suficiente para a fabricação de corpos de prova (CPs) conforme exigido por normas técnicas. Este é o caso de arames utilizados em dutos flexíveis da indústria de óleo e gás, que, devido às suas dimensões e geometria, não permitem a fabricação de CPs recomendados pela norma ASTM E1820 (ASTM, 2024). Esses arames, responsáveis pela resistência mecânica, estão sujeitos à corrosão sob tensão em condições específicas, como a presença de CO₂ e água do mar, tornando necessária a avaliação de sua tenacidade à fratura para garantir a confiabilidade operacional.

Diante disso, este estudo propõe avaliar a tenacidade à fratura utilizando modelagem numérica, seguindo as diretrizes da ASTM E1820 (ASTM, 2024), e resultados de ensaios de tração e estimativa do comprimento de trinca. Essa abordagem busca preencher lacunas na

literatura, oferecendo um método sistemático para avaliar materiais que não permitem a realização de ensaios convencionais. Além de contribuir para a qualificação de materiais e fornecedores, os resultados esperados podem otimizar estratégias de manutenção e previsão da vida útil de componentes em serviço, reduzindo custos, aumentando a segurança e minimizando riscos ambientais.

1.4. Estrutura de Trabalho

O Capítulo 2 aborda a revisão bibliográfica, na qual são discutidos os fundamentos da mecânica da fratura e os principais conceitos relacionados à tenacidade dos materiais. São apresentados aspectos teóricos essenciais, como o fator de intensidade de tensão (K), a norma ASTM E1820, o método da Integral J e sua aplicação na avaliação da resistência à propagação de trincas. Além disso, é detalhado o método dos elementos finitos (MEF), ressaltando sua utilidade na simulação de fenômenos complexos e sua crescente aplicação na previsão de propriedades mecânicas de materiais. São detalhados os ensaios de tenacidade à fratura realizados segundo a metodologia da Integral J, com a caracterização dos materiais testados, incluindo o aço AISI 4340 em diferentes níveis.

O Capítulo 3, intitulado Metodologia, descreve os procedimentos utilizados na pesquisa. Inicialmente, Em seguida, o capítulo aborda a modelagem numérica realizada com o *software* Abaqus, destacando as condições de contorno adotadas, a geração da malha de elementos finitos e os critérios para validação dos resultados. A metodologia inclui ainda a comparação entre os valores obtidos por meio de ensaios convencionais e aqueles derivados das simulações.

No Capítulo 4, intitulado Resultados, são apresentados e analisados os dados obtidos ao longo do estudo. Primeiramente, são discutidos os resultados dos ensaios experimentais para determinação da tenacidade à fratura, fornecendo uma base de comparação para as simulações numéricas. Em seguida, são expostos os resultados preliminares da simulação, destacando as diferenças e semelhanças em relação aos valores experimentais. A partir da análise dos erros sistemáticos e da calibração do modelo, são apresentados os resultados definitivos da simulação dos valores de J_{IC} . O capítulo também explora a aplicação da metodologia em outros materiais.

O Capítulo 5, intitulado Conclusões, sintetiza as principais descobertas do estudo, destacando a eficácia da abordagem proposta para a determinação da tenacidade à fratura. São discutidas as vantagens e limitações da metodologia baseada em simulações numéricas,

bem como a confiabilidade dos resultados obtidos em comparação com os ensaios experimentais.

Por fim, o Capítulo 6, Propostas para Trabalhos Futuros, apresenta sugestões para a continuidade da pesquisa, considerando possíveis aprimoramentos na metodologia adotada. São indicadas direções para investigações adicionais

Encerrando a dissertação, são apresentadas as Referências Bibliográficas, que reúnem os principais artigos, normas e livros consultados ao longo do estudo, garantindo a fundamentação teórica e metodológica do trabalho.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os conceitos teóricos que norteiam o tema da pesquisa, com intuito de embasar o estudo e facilitar sua compreensão e apoio às conclusões. Inicialmente, são apresentados os fundamentos da tenacidade à fratura, seguido do método da integral J, elementos finitos, e ensaios utilizando o método da Integral J.

2.1. Fundamentos da Mecânica da Fratura

A análise da tenacidade à fratura desempenha um papel fundamental na avaliação da resistência de materiais a falhas catastróficas, permitindo a previsão de sua integridade estrutural e a tomada de decisões em relação à segurança e eficiência de componentes em operação. No entanto, nem sempre é possível fazer ensaios experimentais para determinação à tenacidade à fratura de componentes que estão em operação sem comprometer a integridade destes. Em outros casos, não há material suficiente para fabricar os CPs requisitados pelas normas técnicas que regulamentam estes ensaios.

Tal é o caso dos arames utilizados em dutos flexíveis da indústria de óleo e gás. Estes dutos flexíveis são compostos por várias camadas de materiais diferentes, cada uma tendo somente uma função, como mostra a Fig. 2.1. Vale destacar que as armaduras metálicas provêm resistência às tensões axiais e de pressão, mas ainda possibilitam certos valores de flexão do tubo devido as suas estruturas helicoidais. Entretanto, estas armaduras foram projetadas para suportar somente carregamentos mecânicos, sendo fabricadas a partir de aços ao carbono. O gás CO₂ tende a permear através das camadas poliméricas de vedação, e um rasgamento da capa externa permite o ingresso de água do mar até o ambiente anular.

Isto compõe uma combinação particular de condições, e os aços ao carbono responsáveis por suportar os carregamentos mecânicos encontram-se sujeitos à corrosão sob tensão (CST).

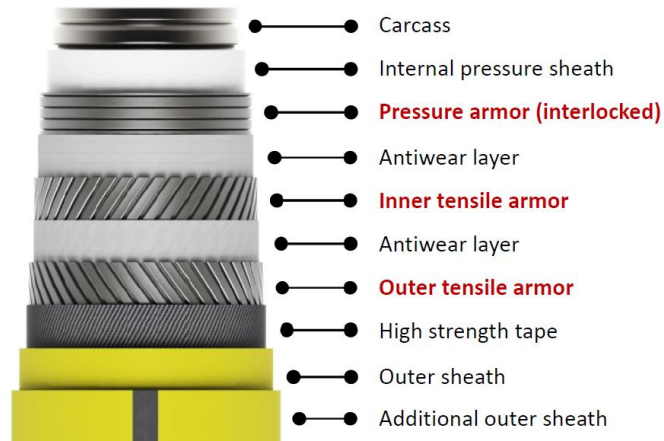


Figura 2.1 - Composição de um duto flexível. Adaptado de COSER, 2019 apud FREIRE, 2023.

De maneira geral, estes arames são fornecidos em três geometrias diferentes (Fig. 2.2), com dimensões da seção transversal que variam de 3,8 mm × 10 mm até 10 mm × 23 mm. Desta forma, os CPs podem ser retirados nas direções indicadas na Fig. 2.2. Nesta figura em cor amarela é representado um CP SE(B) e em verde, azul e vermelho CPs Charpy entalhados em V nas configurações *sub-size* com dimensões de 2,5 mm × 10 mm × 55 mm e 5 mm × 10 mm × 55 mm.

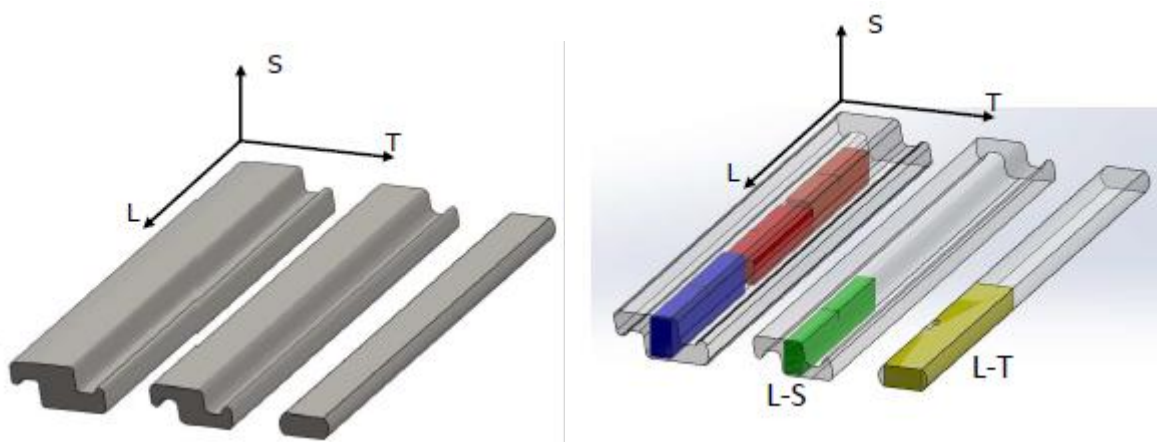


Figura 2.2 - Geometrias da seção transversal dos arames. Direção de retirada dos CPs (RIGONI et al., 2023).

A configuração e as dimensões da seção transversal destes arames não permitem a fabricação de CPs do tipo *Compact Specimen*, C(T), recomendados pela ASTM E1820 (ASTM, 2024), Fig. 2.3.

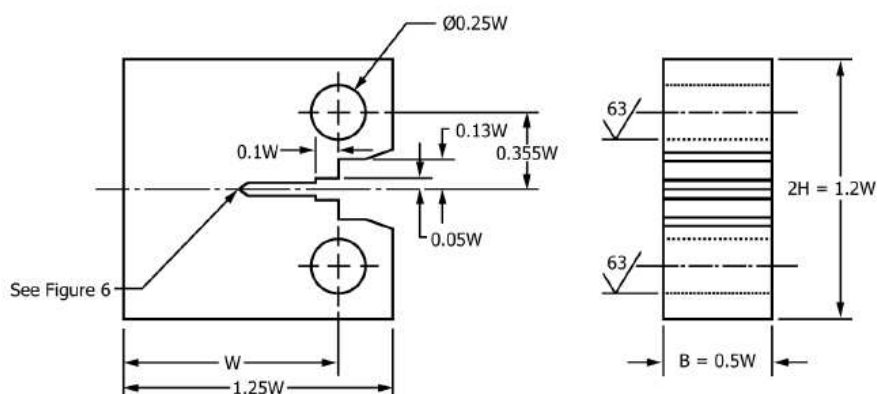


Figura 2.3 - Geometria e dimensões dos CPs do tipo C(T) proposto na ASTM E1820 (ASTM, 2024).

Assim sendo CPs com a geometria e as dimensões mostradas na Fig. 2.4 estão sendo fabricados e ensaiados pelo Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) para determinar a tenacidade à fratura. Estes CPs são cobertos também pela norma ASTM E1820 (ASTM, 2024).

Vale destacar que este laboratório, junto com o Núcleo em Mecânica da Fratura e Integridade Estrutural (NAMEF) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) e o Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) uniram esforços visando à determinação de um procedimento que permita avaliar a qualidade dos arames utilizados nos dutos flexíveis.

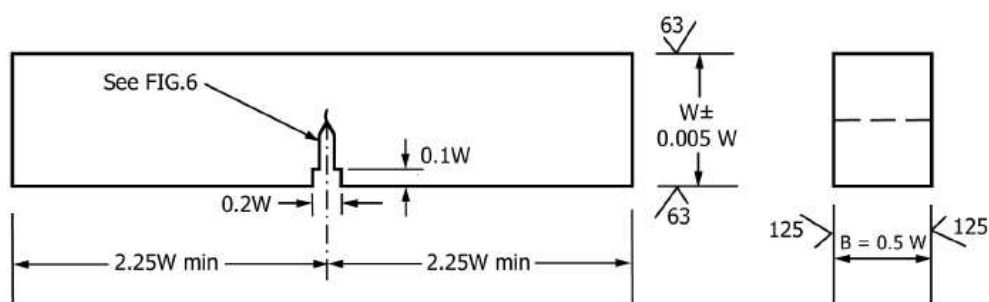


Figura 2.4 - Geometria e dimensões dos CPs de acordo com a ASTM E1820 (ASTM, 2024).

No LAMEF, os CPs do tipo SE(B) (Flexão 3 pontos) são fabricados com a maior dimensão possível, independentemente da relação W/B não convencional, na orientação L-T. As demais relações são mantidas conforme normas internacionais ($S/W=4$ e $a/W=0,5$). O não atendimento pleno das determinações da ASTM E1820 (ASTM, 2024) pode comprometer a

confiabilidade e a comparabilidade dos resultados destes ensaios. A Figura 2.5 mostra a geometria e a Fig. 2.6 as dimensões de um CPs SE(B) fabricado a partir dos arames.

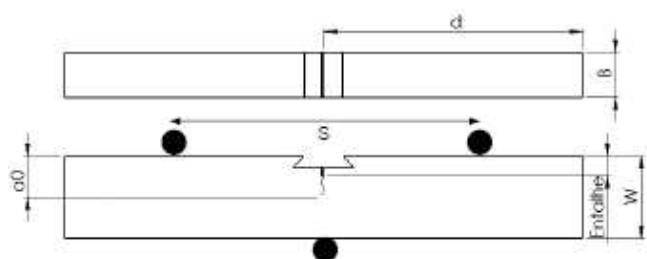


Figura 2.5 - Geometria dos CPs SE(B) fabricados a partir dos arames (RIGONI et al., 2023).

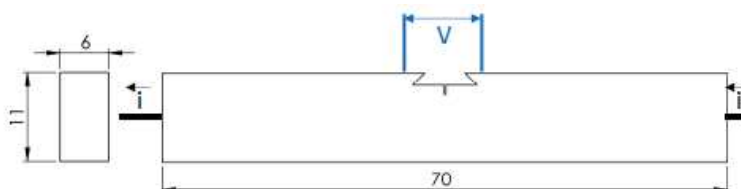


Figura 2.6 - Dimensões de um CPs fabricado a partir de um arame (RIGONI et al., 2023).

A partir dos resultados dos ensaios, Rigoni et al., (2023) determinarão o K_J , que poderá ser utilizado em análise de integridade estrutural. Para tanto estes resultados serão correlacionados. Entretanto, estabelecer correlações entre resultados obtidos a partir de ensaios em CPs com diferentes geometrias e dimensões, fabricados a partir de diferentes materiais, é difícil porque os parâmetros de saída como tenacidade à fratura dependem de outras variáveis além da configuração e dimensões dos CPs. Dentre elas podem ser citadas o limite de escoamento e a microestrutura.

Desta forma, estudos adicionais devem ser conduzidos para contribuir para a definição de um procedimento de qualificação desses materiais e consequentemente dos fornecedores dos arames, garantindo maior confiabilidade nos processos operacionais dos dutos flexíveis, redução de custos com manutenção e minimização de riscos de falhas que poderiam comprometer a produção, a segurança e o meio ambiente. Vale destacar que estudos prévios mostraram uma variabilidade expressiva nos valores das propriedades mecânicas de um determinado material para fornecedores diferentes, como mostra a Fig. 2.7. Como exemplo é destacado o material A com dois fornecedores. Se observa uma diferença de 100 % nos valores de Fator de Intensidade de Tensão Crítico (K_{Jc}) a temperatura ambiente.

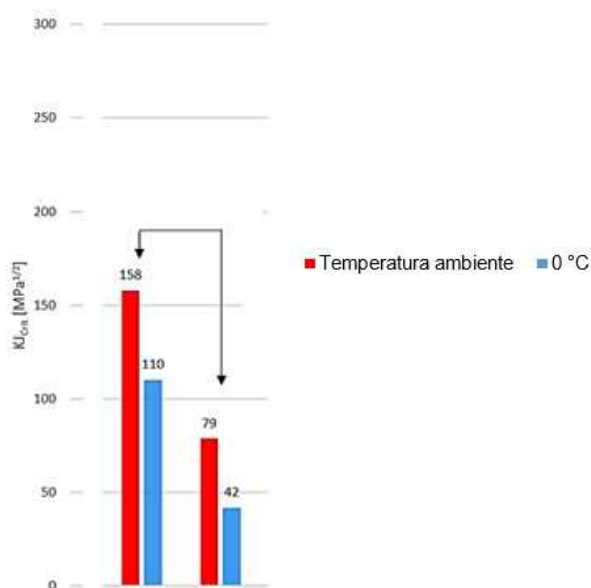


Figura 2.7 - Valores de K_{Ic} para um material proveniente de dois fornecedores a temperatura ambiente (Adaptado de Rigoni et al., 2023).

Neste contexto, a proposta deste estudo é avaliar a tenacidade à fratura por meio de modelagem numérica, seguindo as diretrizes da norma ASTM E1820 (ASTM, 2024), é de suma importância.

Sendo assim, desde que os seres humanos começaram a construir e utilizar estruturas, as fraturas têm representado um desafio persistente. Com o avanço tecnológico, essa dificuldade se intensifica, pois tecnologias mais sofisticadas acarretam fraturas e comportamentos estruturais cada vez mais difíceis de prever. Segundo Anderson (2005), um estudo econômico indicou que, em 1978, as fraturas em estruturas nos Estados Unidos geraram um custo de 119 bilhões de dólares, equivalente a cerca de 4 % do produto interno bruto (PIB) do país na época. O autor destacou que, com base nos conhecimentos já existentes sobre mecânica da fratura, seria possível reduzir esse custo em 28 bilhões de dólares.

Segundo Anderson (2005), duas causas principais são frequentemente apontadas como responsáveis pela maioria das fraturas estruturais: descuido durante as fases de projeto, construção ou operação da estrutura; e a introdução de novos processos ou materiais, os quais podem acarretar comportamentos imprevisíveis ou indesejáveis. A primeira razão é comum, já que certos métodos de produção são altamente intrincados e frequentemente resultam em estruturas microscópicas inesperadas nos itens fabricados. Adicionalmente, as simulações realizadas durante a fase de projeto e construção das estruturas raramente conseguem replicar completamente as condições reais de funcionamento. Muitas vezes, são feitas suposições e simplificações que podem levar a equívocos. Quanto à segunda causa,

esta vem se tornando comum devido ao avanço tecnológico e à introdução de novos materiais, os quais podem gerar comportamentos estruturais complexos e de difícil previsão.

Esse cenário evidencia a importância de entender a tenacidade à fratura, a qual pode ser considerada como uma propriedade crítica que descreve a capacidade de um material de resistir à propagação de trincas sob carga. A origem dessa propriedade está na estrutura interna e na composição dos materiais, que determinam sua resistência ao crescimento de trincas. Essa propriedade pode ser conceituada, de forma geral, como sendo a resistência do material à propagação de uma trinca. De acordo com Zhu e Joyce (2012), por meio da determinação experimental da tenacidade à fratura os métodos utilizados na mecânica da fratura se desenvolveram, bem como suas aplicações na engenharia.

Zhu e Joyce (2012) destacam que a medição experimental e a padronização das técnicas utilizadas para determinação da tenacidade à fratura desempenham um papel imperativo na aplicação de métodos de mecânica de fratura para avaliação de integridade estrutural, projeto de tolerância a danos, avaliação de adequação ao serviço e análise de resistência residual para diferentes componentes e estruturas de engenharia. Os valores de tenacidade à fratura também podem servir como base na caracterização do material, avaliação de desempenho e garantia de qualidade para estruturas típicas de engenharia, incluindo vasos de pressão nuclear e tubulações, vasos e tanques petroquímicos, oleodutos e gasodutos e estruturas automotivas, de navios e aeronaves.

Ao longo do desenvolvimento da mecânica da fratura, diferentes parâmetros foram propostos para estimar a tenacidade à fratura do material, quais sejam: o fator de intensidade de tensão (K); a integral-J e o deslocamento de abertura na ponta da trinca ($CTOD$).

Irwin (1957) introduziu o conceito do fator K , um parâmetro que quantifica a intensidade dos campos elásticos na região da ponta de uma trinca, sendo uma referência na mecânica da fratura linear. Em contrapartida, Rice (1968) propôs a integral-J, que descreve a intensidade dos campos elastoplásticos formados na ponta da trinca, sendo assim associada à mecânica da fratura elastoplástica. Wells (1963) apresentou o conceito de $CTOD$, utilizado como parâmetro de fratura e que pode ser aplicado de forma equivalente ao fator K ou à integral-J. Métodos experimentais específicos foram desenvolvidos para medir cada um desses parâmetros, que servem para descrever a tenacidade à fratura.

Vale destacar que a terminologia e os conceitos relacionada aos ensaios e avaliações de tenacidade à fratura foram definidos pela ASTM E1820 (ASTM, 2024). Esta e outras normas que padronizam os ensaios para determinação da tenacidade à fratura têm contribuído para a simplificação dos ensaios, bem como para aumentar a exatidão dos resultados decorrentes (Zhu e Joyce, 2012). Pode ser acrescentado que essa padronização possibilita a comparação dos resultados obtidos por diferentes pesquisadores e laboratórios,

bem como para a unificação dos esforços existentes para avaliação de tenacidade à fratura. Zhu e Joyce (2012), afirmam que o desempenho do material durante a realização de um ensaio de tenacidade à fratura depende de três fatores relacionados ao material, quais sejam o comportamento a fratura, o comportamento da deformação e o efeito da restrição da geometria.

O comportamento de fratura remete aos micro-mecanismos de fratura que o material pode possuir, sendo normalmente descritos como frágil ou dúctil. Uma fratura considerada frágil é identificada por uma separação normal à tensão de aplicação e sua superfície é lisa com quase nenhuma deformação plástica macroscópica e pouca microdeformação. Nesse tipo de fratura, na ponta da trinca há o desenvolvimento de uma zona de deformação elástica linear, e a tenacidade de iniciação da trinca domina a resistência à fratura do material, com apenas uma pequena contribuição da resistência à propagação da trinca além da iniciação. Em geral, a quantidade de energia que se faz necessária para propagar a trinca além de sua iniciação é baixa, levando à uma falha instável e instantânea. Dessa forma, a tenacidade medida é, normalmente, um valor pontual e caracterizado pelo fator K ou pela taxa de liberação de energia G no início da trinca. O primeiro método de determinar valores do fator de intensidade de tensão em um estado plano de deformação para pontos no início ou próximo do início da trinca (K_{IC}) é descrito pela norma ASTM E399 (ASTM, 2024).

A fratura dúctil é caracterizada pela propagação da trinca devido ao crescimento e coalescência de microvazios. Durante esse processo, uma maior quantidade de energia é absorvida, resultando em uma extensão de trinca lenta e estável. Diferentemente do observado na fratura frágil, a dominância na ponta da trinca deixa de ser elástica e passa a ser plástica. Em resumo, a resistência do material à fratura se eleva à proporção que há o crescimento da trinca. Consequentemente, a tenacidade descrita não é pontual e sim uma curva de resistência, denominada curva- R , a qual pode ser avaliada tanto pela integral- J quanto pelo $CTOD$ (δ).

A integral- J quantifica uma energia elástica não-linear, e seu uso para determinar a tenacidade à fratura elastoplástica requer cuidados. Normalmente, uma curva J - R é construída, representando a resistência do material à propagação estável da trinca em termos de J . A norma ASTM E1820 (ASTM, 2024) foi desenvolvida com o objetivo de regulamentar a determinação das curvas de tenacidade de iniciação elastoplástica (J_{IC}), assim como a curva J - R .

Uma consideração adicional para avaliar o desempenho de um material em um ensaio de tenacidade à fratura é a análise do comportamento da resistência e deformação do material. Esse comportamento pode ser classificado como elástico linear, elástico não linear ou elastoplástico. Geralmente, essa característica é crucial na escolha do método de ensaio

de fratura a ser empregado e, por conseguinte, no parâmetro utilizado para descrever a tenacidade do material.

A utilização de técnicas da mecânica da fratura, incluindo o *CTOA* e outros métodos não mencionados aqui, possibilita a consideração da tenacidade à fratura como um critério de projeto para componentes mecânicos ou estruturais. No entanto, as dimensões dos corpos de prova dos ensaios podem significativamente afetar as condições de tensão na ponta da trinca, levando a resultados imprecisos (ZHU e JOYCE, 2012). Em situações de alta restrição geométrica, as tensões na ponta da trinca tendem a ser mais elevadas, o que pode resultar em uma fratura mais frágil ou na redução da região sob a curva de tenacidade à fratura dúctil do material. Por outro lado, em casos de baixa restrição, as tensões na ponta da trinca são menores, minimizando a probabilidade de fratura frágil e aumentando a área sob a curva de tenacidade à fratura dúctil do material.

Essa restrição geométrica costuma ser determinada com base no tipo de estado de tensão gerado na ponta da trinca, que pode ser o plano de deformação e o plano de tensão. O plano de deformação é associado ao menor valor de tenacidade à fratura. Para mitigar os efeitos das dimensões do corpo de prova, as normas ASTM E399 (ASTM, 2024) e ASTM E1820 (ASTM, 2024) estabelecem faixas limites para as dimensões da trinca inicial, do ligamento e da espessura.

Como mostra a Figura 2.8, em estudos mais recentes, além da mecânica da fratura linear-elástica (MFLE) e da mecânica da fratura elastoplástica (MFEP), uma terceira abordagem foi desenvolvida. Essa nova abordagem inclui o tempo como uma das variáveis do processo de fratura, fazendo surgir a Mecânica da Fratura Dinâmica, a Mecânica da Fratura Viscoelástica e a Mecânica da Fratura Viscoplastica (ANDERSON, 2005).

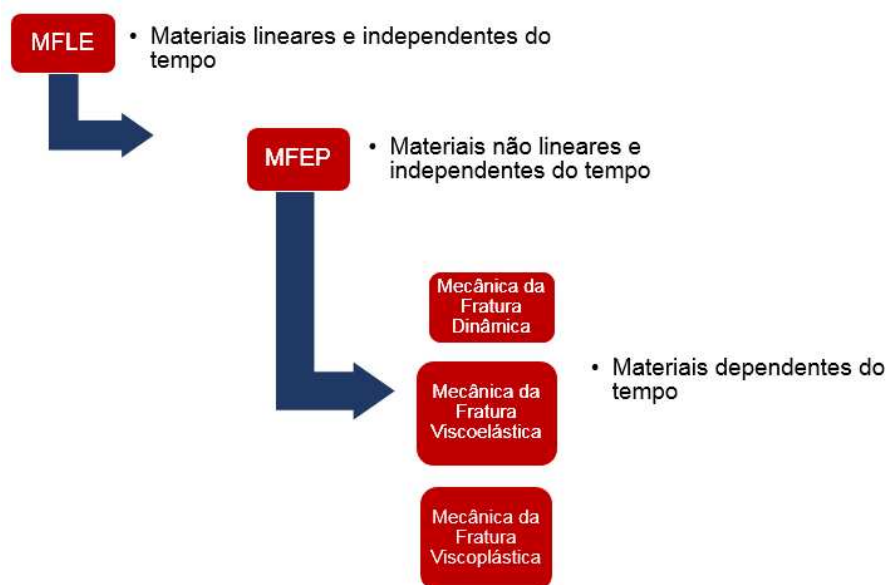


Figura 2.8 - Esquema representativo dos diferentes tipos de mecânica à fratura (Modificada de ANDERSON, 2005).

Uma contribuição importante para o entendimento dos ensaios de tenacidade à fratura foi dada por Zhu e Joice (2012). Estes autores tiveram o mérito de reunir em 41 páginas os aspectos mais importantes sobre o assunto, e para tanto 295 estudos foram considerados. Um panorama histórico, bem como o estado da arte dos ensaios de tenacidade à fratura, avaliação e padronização foram apresentados para materiais metálicos estruturais em termos da mecânica da fratura elástica linear e da mecânica da fratura elástica-plástica. Dentre os métodos abordados está a integral J objeto de estudo.

2.1.1. Fator de intensidade de tensão K

Antes de 1960, os conceitos de mecânica da fratura se limitavam a materiais que seguiam a Lei de Hooke, ou seja, materiais lineares que falhavam de forma frágil, estabelecendo assim a mecânica da fratura linear-elástica (MFLE). Na MFLE, o parâmetro utilizado para avaliar a tenacidade à fratura de materiais metálicos é o fator de intensidade de tensão, K .

De acordo com López (2010), em 1927, Westergaard definiu que, para examinar as distribuições de tensões na ponta de uma trinca, era necessário dividir os modos pelos quais as superfícies da trinca se moviam em três tipos (Fig. 2.9). O Modo I é caracterizado por deslocamentos locais na direção y que são simétricos em relação aos planos $x-y$ e $x-z$, sendo o mais comum e fácil de simular em ensaios laboratoriais. No Modo II, os deslocamentos são relativos entre as superfícies da fratura, ocorrendo ao longo do eixo x e sendo simétricos em

relação ao plano x-y e assimétricos em relação ao plano x-z. Já o Modo III, conhecido como modo de torção, é caracterizado por deslocamentos locais na direção z e é assimétrico em relação aos planos x-y e x-z.

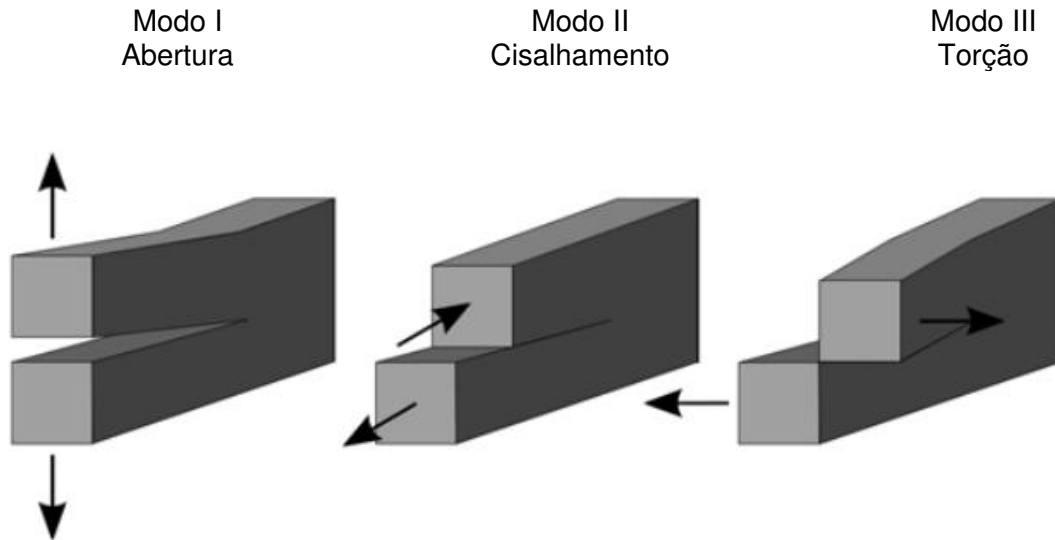


Figura 2.9 - Os três modos de fratura de uma trinca (KUMAR, 2020).

Cada um desses modos de fratura está associado a um campo de tensões distinto e, portanto, a um fator de intensidade de tensão K específico, conhecidos como K_I , K_{II} e K_{III} para os modos I, II e III, respectivamente. No entanto, há situações em que o campo de tensões na ponta da trinca pode ser influenciado por dois ou até os três tipos de modos de fratura simultaneamente, resultando no que é chamado de modo misto.

Irwin (1957) e Williams (1957) desenvolveram equações capazes de relacionar o valor de K_I com o campo de tensão em uma trinca, considerando uma trinca com comprimento $2a$ ao longo da espessura e localizada no centro de uma placa infinita sob uma tensão remota σ , conforme mostrado na Eq. (2.1).

$$\sigma_{ij} = \frac{K_j}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad (2.1)$$

Na Equação (2.1), os índices i e j representam as coordenadas retangulares x e y ou as coordenadas polares r e θ , considerando a origem na ponta da trinca. As funções $f_{ij}(\theta)$ são as funções angulares de tensão, r é a distância da ponta da trinca e σ é a tensão aplicada.

O equacionamento proposto por Williams (1957) incluía, além do termo mencionado na Eq. (2.1), termos de ordem superior. Posteriormente, esse segundo termo foi identificado

como tensão-T. A Equação (2.1) indica que o campo elástico próximo à ponta da trinca é singular, visto que conforme r se aproxima de zero, as tensões tendem ao infinito.

Na realidade, não é possível que as tensões atinjam valores infinitos na ponta da trinca. Mesmo em materiais com baixa capacidade de deformação, pequenas deformações plásticas na região da ponta da trinca impedem que as tensões se tornem infinitas. Portanto, as tensões permanecem finitas nesse contexto. Irwin et al. (1958) e Irwin (1960) desenvolveram uma estimativa para o comprimento da zona plástica localizada à frente da ponta da trinca (r_y), conforme indicado na Eq. (2.2) e ilustrado na Fig. 2.10. Na Equação (2.2), σ_{ys} representa o limite de escoamento do material.

$$r_y = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (2.2)$$

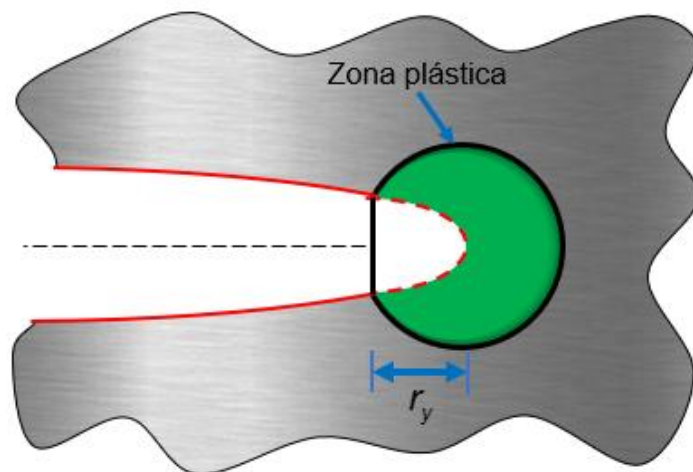


Figura 2.10 - Zona plástica na frente da trinca definida inicialmente por Irwin et. al (1958) e Irwin (1960) (Modificada de ANDERSON, 2005).

É importante ressaltar que a Eq. (2.2) é precisamente válida somente para materiais que exibem um comportamento com uma pequena região de escoamento. Se o material apresentar um comportamento plástico mais pronunciado, o comprimento da zona plástica será maior, aproximadamente o dobro de r_y . Nesses casos, a extensão da zona plástica será significativamente maior devido à maior deformação plástica induzida na região da ponta da trinca (RODRIGUES, 2020).

Irwin (1957) definiu ainda, por meio das soluções por ele encontradas para o comportamento elástico de uma trinca e pela teoria da energia de Griffith (1920), uma relação entre K_{IC} e a taxa de liberação de energia elástica, G , como mostra a Eq. (2.3).

$$K = \sqrt{\frac{G \cdot E}{(1 - \nu^2)}} \quad (2.3)$$

Na Equação (2.3), E representa o módulo de elasticidade do material e ν é o coeficiente de Poisson.

As tensões ou deformações na ponta da trinca podem aumentar até atingir um valor crítico. Nesse ponto, o fator de intensidade de tensão K_I passa a ser denominado K_C e a fratura do material pode ocorrer. Estudos realizados por Irwin et al. (1958) demonstraram que, para um mesmo material, o valor de K_C varia com a espessura do corpo de prova devido às restrições de plasticidade na região da trinca.

Conforme a espessura do corpo de prova aumenta, o valor de K_C tende a diminuir até atingir estabilidade, devido à predominância do estado plano de deformação. O ponto em que essa estabilidade de K_C é alcançada determina o K_{IC} do material, conhecido como tenacidade à fratura no estado plano de deformação para o modo I de fratura, como ilustrado na Fig. 2.11. Este valor representa a tenacidade mínima que um material possui e é um parâmetro crucial para o projeto de componentes mecânicos e estruturais. Posteriormente, foi estabelecido que, para corpos de prova com espessuras reduzidas, o estado plano de tensão predomina, enquanto para corpos de prova mais espessos, o estado plano de deformação é predominante.

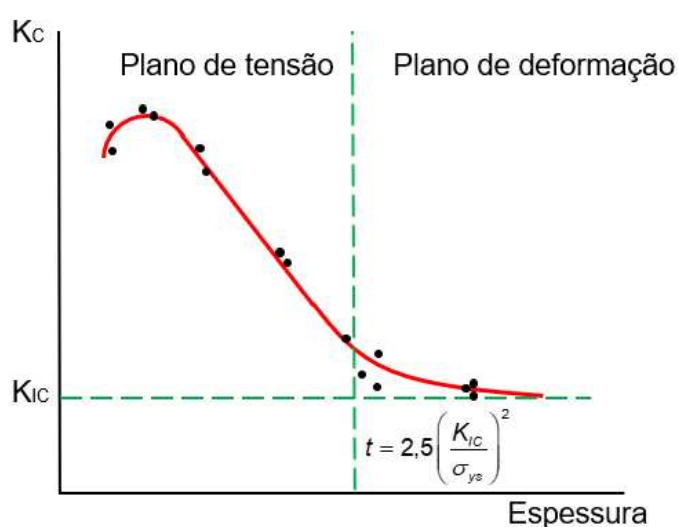


Figura 2.11 - Relação entre K_C e a espessura do corpo de prova (Modificada de MEDINA, 2014).

Após todo o trabalho desenvolvido pelos estudiosos, principalmente Irwin, a *American Society for Testing and Materials* (ASTM), regulamentou normas para padronização da

definição de K_{IC} , bem como métodos e corpos de prova para ensaios de determinação experimental do valor desse parâmetro.

2.1.2. Norma ASTM E1820

A norma ASTM E1820 (ASTM, 2024) definiu a crescente necessidade de uma abordagem unificada para medir parâmetros de tenacidade à fratura, como a integral J, que quantifica a taxa de liberação de energia associada ao crescimento de trincas em materiais dúcteis. Antes disso, existiam várias normas, incluindo a ASTM E399 (ASTM, 2024) para medir o fator de intensidade de tensão (K) e a ASTM E813 (ASTM, 1981) para a integral J, mas faltava uma norma abrangente que integrasse vários parâmetros de tenacidade à fratura em uma metodologia de ensaio único.

A ASTM E1820 (ASTM, 2024) apresenta procedimentos e orientações destinados à determinação da tenacidade à fratura de materiais metálicos por meio dos parâmetros K , J e $CTOD$ (δ). A medição da tenacidade pode ser efetuada sob a forma de uma curva R ou como um valor pontual, sendo que a tenacidade à fratura obtida conforme este método é específica para o modo de abertura (Modo I) de carregamento.

Destaca-se que, até a versão ASTM E1820 (ASTM, 2024), a avaliação de K_{IC} era possível tanto por este método quanto pelo método ASTM E399 (ASTM, 2024). Com o intuito de evitar redundâncias, a avaliação de K_{IC} foi deliberadamente excluída deste procedimento, direcionando-se o usuário para o método de ensaio proposto pela ASTM E399 (ASTM, 2024).

Os corpos de prova (CPs) recomendados para este ensaio compreendem o tipo dobra de borda única (SE(B)), compacto (C(T)) e compacto em forma de disco (DC(T)), cujas geometrias são mostradas nas Fig. 2.12, Fig. 2.13 e Fig. 2.14, respectivamente. Todos os CPs possuem entalhes afiados dotados de trinca de fadiga.

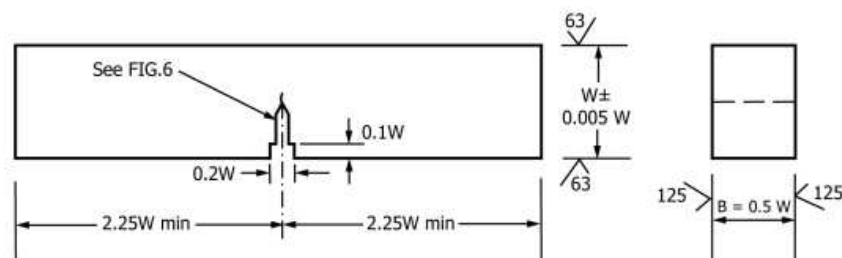


Figura 2.12 - Geometria e dimensões do corpo de prova SE(B) definidas na norma ASTM E1820 (ASTM, 2024).

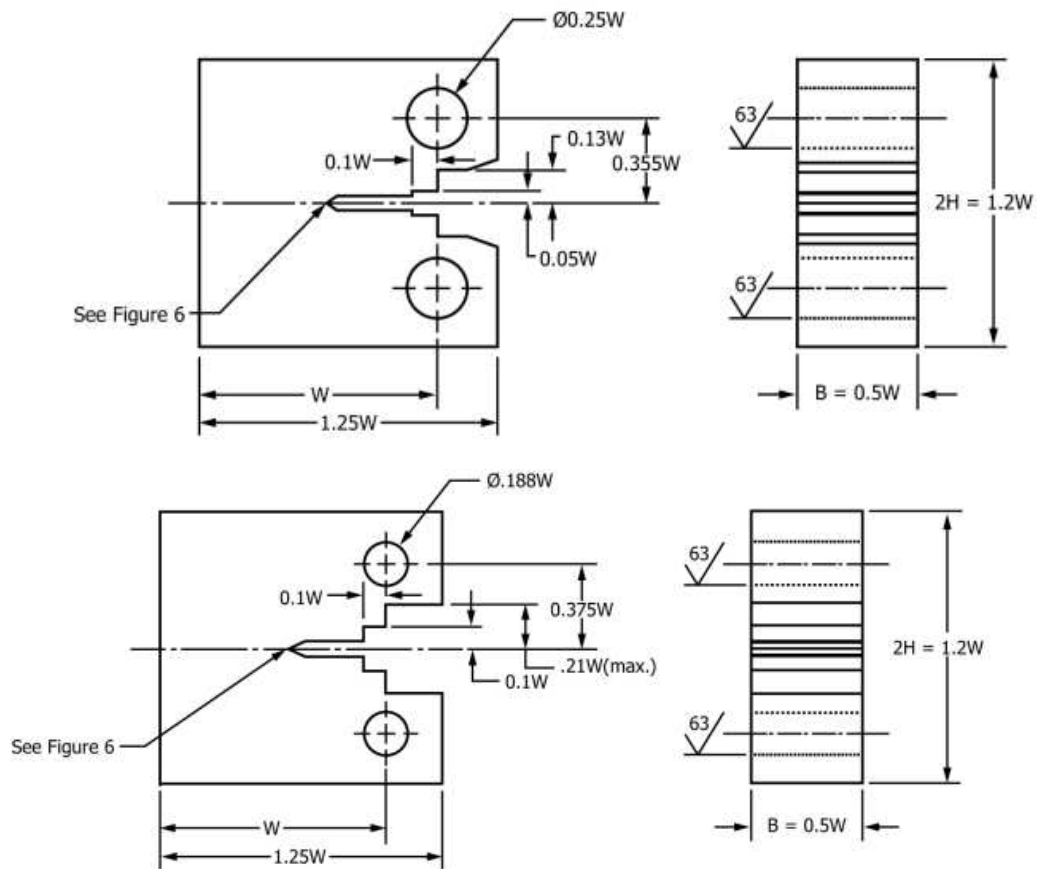


Figura 2.13 - Geometrias e dimensões dos dois possíveis corpos de prova C(T) conforme definidos na norma ASTM E1820 (ASTM, 2024).

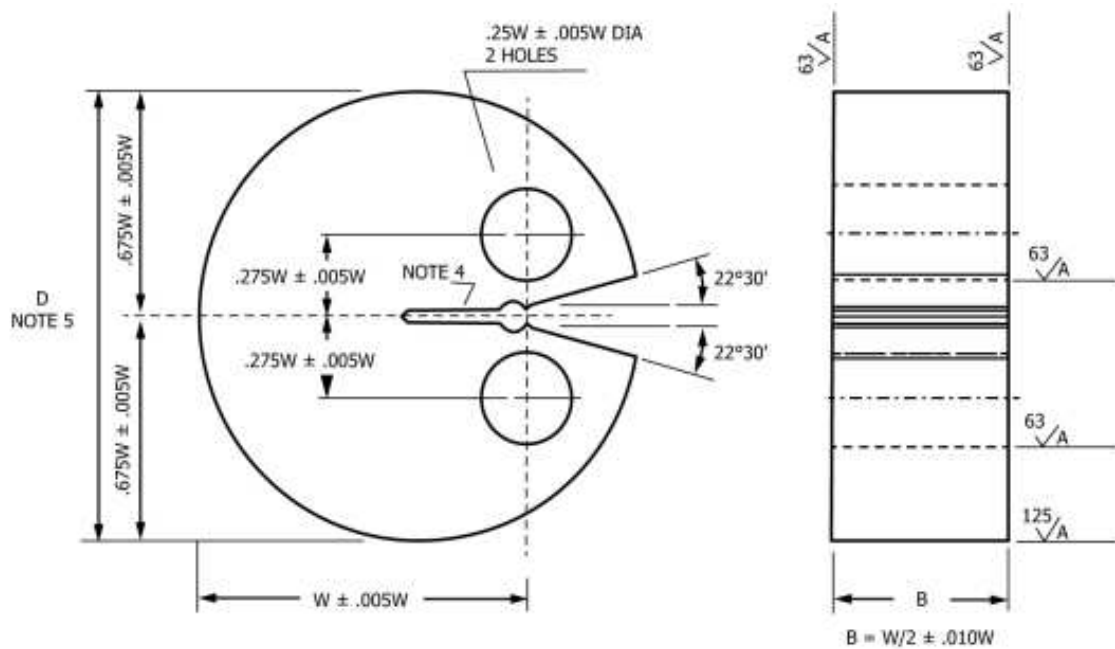


Figura 2.14 - Geometria e dimensões do corpo de prova DC(T) definidas na norma ASTM E1820 (ASTM, 2024).

No que tange aos requisitos dimensionais dos CPs, estes variam conforme a análise de tenacidade à fratura em questão. As diretrizes são estabelecidas mediante a consideração da tenacidade do material, sua resistência ao fluxo e os requisitos individuais de qualificação do valor de tenacidade almejado. Importante salientar que outros métodos padrão para determinação da tenacidade à fratura, utilizando os parâmetros K , J e $CTOD$, estão contidos nos métodos de ensaio da norma ASTM E399 (ASTM, 2024). O propósito deste método de ensaio é viabilizar uma abordagem unificada para a determinação de todos os parâmetros de tenacidade relevantes a partir de um único ensaio.

2.1.3. Método da Integral J

Zhu e Joyce (2012) destacam que para aços estruturais na presença de plasticidade em larga escala, a mecânica de fratura linear elástica linear (MFLE) não permite caracterizar com precisão o comportamento da fratura e, portanto, um modelo alternativo de mecânica de fratura deve ser considerado para esta finalidade.

Diferentemente da MFLE, que não considera a ausência de deformação plástica na ponta da trinca, a Mecânica da Fratura Elastoplástica (MFEP) permite a investigação do crescimento da trinca e da tenacidade à fratura levando em conta a deformação plástica na ponta da trinca (HAAG, 2012). A MFEP oferece duas abordagens distintas: o método *Crack Tip Opening Displacement* (CTOD) e o método da Integral J . Enquanto o primeiro se baseia em princípios físicos, o segundo é fundamentado em equações de balanço de energia.

De acordo com Anderson (2005), ambos os métodos (CTOD e Integral J) são capazes de fornecer parâmetros que podem ser empregados como critérios na análise de fraturas. Além disso, seus valores críticos demonstram pouca sensibilidade às dimensões do corpo de prova em consideração, o que significa que a MFEP possui restrições dimensionais menos rigorosas do que a MFLE.

Com base na teoria de deformação da plasticidade, Rice (1968) propôs um novo parâmetro de fratura que foi chamado de integral J e definido como mostrado na Eq. (2.4). Este método pode ser entendido como um balanço energético que visa generalizar a taxa de liberação de energia potencial na trinca em relação à variação do comprimento dela. A Integral J possibilita caracterizar a fratura em materiais não lineares, a partir da idealização da deformação elastoplástica presente nesses materiais como uma deformação “elástica não linear”. A Equação (2.4) mostra a equação da Integral J obtida por Rice (1968).

$$J = \int_{\Gamma} \left(W dy - \underline{T} \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \right) ds \quad (2.4)$$

Na Equação (2.4), Γ é o contorno escolhido a ser seguido (Fig. 2.15), percorrido em sentido anti-horário, com início e final não coincidentes em cada uma das faces da trinca, W é a densidade de energia de deformação, \underline{T} é o vetor tensão definido pela normal \underline{n} ao contorno, \underline{u} é o vetor deslocamento na direção x e s é o comprimento do caminho escolhido.

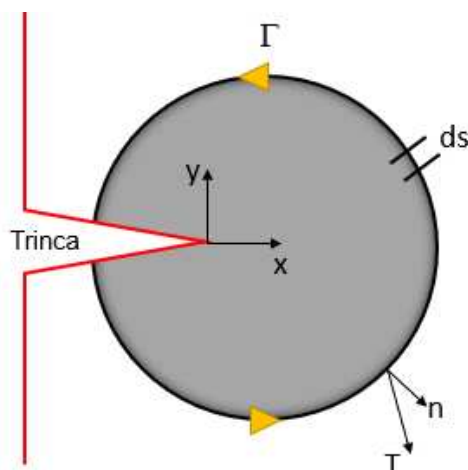


Figura 2.15 - Representação esquemática de um caminho escolhido no método Integral J (Modificada de LÓPEZ, 2010).

Vale ressaltar que a Integral J é calculada de forma independente do caminho, ou seja, ela não depende do estado de tensões na frente da trinca (RICE, 1968). Ao se tratar de materiais não lineares, a propagação da trinca ocorre de forma lenta, pois há uma resistência do material oriunda da deformação que ele experimenta à medida que a trinca se propaga. Medina (2014) afirma que esse crescimento é estável e lento. No ensaio da Integral J é necessário medir a força aplicada e o deslocamento na linha de aplicação da força. A norma ASTM E1820 (ASTM, 2024) propõe a construção de uma curva J - R para obtenção de um valor J_{IC} , o que requer a medição do comprimento da trinca durante o ensaio. O parâmetro J_{IC} é interpretado como o valor da Integral J a partir do qual tem-se o início de uma propagação dúctil da trinca, como mostra a Fig. 2.16.

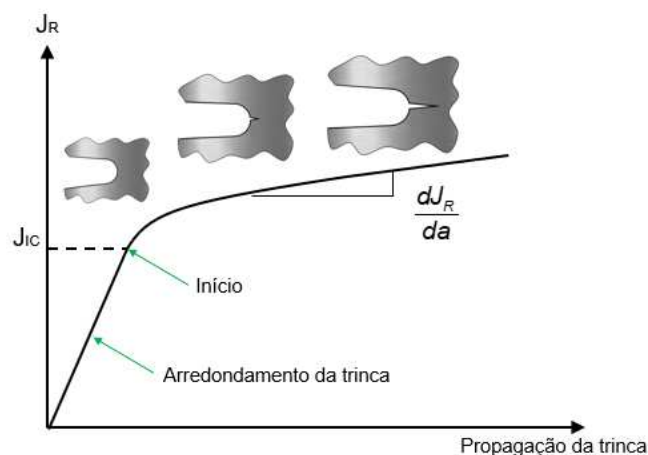


Figura 2.16 - Curva JR (Modificada de ANDERSON, 2005).

Entretanto, a definição do valor de J_{IC} é feita arbitrariamente, tendo em vista que é improvável definir o ponto exato onde ocorre o início da estabilidade do crescimento da falha (ANDERSON, 2005), convencionou-se, por norma, adotar o valor de energia ao observar um valor de crescimento de trinca de 0,2 mm.

Existem dois tipos de ensaio da integral J , quais sejam: o ensaio de múltiplos corpos de prova e o ensaio de um único corpo de prova. No ensaio de múltiplos corpos de prova, vários corpos de prova são carregados até ocorrer uma propagação dúctil da trinca. Após isso, o corpo de prova é descarregado, fraturado e o comprimento da trinca é medido na superfície de fratura. Cada um deles é utilizado para gerar um único ponto na curva $J-R$.

2.2. Elementos Finitos

O método dos elementos finitos (MEF) é uma técnica computacional poderosa amplamente utilizada para resolver problemas complexos de engenharia e física. Envolve a discretização de um domínio contínuo em partes menores e mais simples chamadas elementos finitos, que podem ser analisados individualmente. Este método é particularmente eficaz para problemas envolvendo análise estrutural, transferência de calor, dinâmica de fluidos e mais, pois permite a aproximação de geometrias complexas e condições de contorno.

No cerne do MEF, está na subdivisão de uma estrutura física em um número finito de elementos conectados em pontos conhecidos como nós. Esta discretização transforma as equações diferenciais governantes do sistema em um conjunto de equações algébricas que podem ser resolvidas numericamente. O princípio básico do MEF é utilizar métodos variacionais para derivar essas equações, que podem ser implementadas por meio de várias

técnicas numéricas, como o método de Galerkin (LOGG, 2007; ARNOLD et al., 2006). A escolha dos elementos, como elementos lineares ou de ordem superior, influencia significativamente a precisão e a eficiência computacional da solução (BERTRAND et al., 2014; HENNING et al., 2014).

A versatilidade do MEF é evidente em suas aplicações em diversos campos. Por exemplo, tem sido empregado com sucesso em engenharia estrutural para analisar o estresse e a deformação em materiais (GONZALEZ-PEREZ e FUENTES-AZNAR, 2017; SCOTT e HAUKAAS, 2008). A capacidade do método de lidar com condições de contorno e propriedades de materiais complexos o torna ideal para simular cenários do mundo real, como o comportamento de acionamentos de engrenagens sob múltiplos pontos de restrição (GONZALEZ-PEREZ e FUENTES-AZNAR, 2017). Além disso, o MEF é utilizado em mecânica dos fluidos para modelar o fluxo de fluidos e distribuições de pressão em meios porosos, mostrando sua adaptabilidade a diferentes fenômenos físicos (SCI, 2019; YI, 2014).

Avanços recentes no MEF incluem o desenvolvimento de métodos adaptativos multiescala que aprimoram a eficiência computacional refinando a malha dinamicamente com base no comportamento da solução (HENNING et al., 2014; BAINES et al., 2013). Além disso, a integração de técnicas de aprendizado de máquina com o MEF é uma área de pesquisa emergente voltada para otimizar os processos de design e análise (MELESHKO, 2018). Essas inovações destacam a evolução contínua do MEF, tornando-o uma ferramenta crucial na engenharia moderna e na pesquisa científica.

Sendo assim, a determinação da tenacidade à fratura utilizando métodos de elementos finitos tornou-se uma área crítica de pesquisa em diversos materiais, incluindo metais, compósitos e cerâmicas. A análise de elementos finitos fornece um arcabouço robusto para simular a propagação de trincas e avaliar o desempenho do material sob estresse, o que é essencial para prever os mecanismos de falha em aplicações de engenharia.

Jeon et al., (2015) demonstra a aplicação da análise de danos por elementos finitos para prever a tenacidade à fratura do aço inoxidável fundido CF8M envelhecido. Suas descobertas indicam que as curvas de resistência J para os materiais não envelhecidos e envelhecidos podem ser previstas com precisão usando locais de deformação de fratura multiaxiais, destacando a eficácia do Método de Elementos Finitos (MEF) em capturar os efeitos do envelhecimento térmico no comportamento de fratura. Da mesma forma, utilizou o MEF para avaliar a tenacidade à fratura interlaminar em laminados de compósitos, empregando o método de extensão virtual de trinca para simular condições de carga e avaliar taxas de liberação de energia de deformação (LI et al., 2011). Isso ilustra a versatilidade do MEF em diferentes contextos de material, de metais a compósitos.

No âmbito dos materiais compósitos, conduziu um estudo de elementos finitos para

analisar a tenacidade à fratura de compósitos de carbono/epóxi. Seus resultados, obtidos por meio de um modelo bidimensional usando o ABAQUS, mostraram uma forte correlação entre resultados experimentais e numéricos, reforçando a confiabilidade do MEF na previsão da tenacidade à fratura em estruturas compostas (TOYGAR et al., 2006). Além disso, explorou a tenacidade à fratura de ligas de alto teor de Al-Zn-Mg-Cu, empregando análise de elementos finitos juntamente com métodos experimentais para entender a influência de características microestruturais no comportamento de fratura (GAO et al., 2022).

Além disso, o trabalho sobre a resistência à fratura do grafeno enfatiza a importância das características microestruturais na determinação da tenacidade à fratura. O estudo utilizou microscopia de força atômica e modelagem por elementos finitos para avaliar a resistência do grafeno policristalino, revelando que as orientações dos contornos de grão afetam significativamente a tenacidade à fratura (ZHANG et al., 2014). Isso destaca o papel crítico da análise microestrutural em conjunto com o MEF para prever com precisão o desempenho do material.

A aplicação do MEF se estende também aos materiais dentários, onde investigou a tenacidade interfacial de cerâmicas dentárias em camadas. Sua abordagem envolveu a análise de elementos finitos para derivar valores de tenacidade à fratura, demonstrando a aplicabilidade do método em materiais biomédicos (ANUNMANA et al., 2010). Além disso, empregou o MEF para analisar interfaces adesivas/dentina, confirmando que a mecânica da fratura é um arcabouço adequado para estudar a adesão dentária (MUSTAFA et al., 2021). Estes estudos ilustram coletivamente a ampla aplicabilidade dos métodos de elementos finitos em diversos campos, desde engenharia estrutural até aplicações biomédicas.

O MEF tem sido amplamente utilizado no desenvolvimento de pesquisas relacionados à tenacidade à fratura. Rice et al., (1979), Parks (1989), Al-Ani e Hancock (1991), McMeeking e Parks (1979), Shih e German (1981) verificaram que a solução da taxa de liberação de energia corresponde aos campos de ponta de trinca reais para corpos de prova de flexão profundamente trincados, e que um único parâmetro integral J pode descrever com exatidão a intensidade do campo de tensão da ponta de trinca. Por sua vez, Kumar et al., (1981), usando elementos finitos e a integral J, avaliaram diversos corpos de prova e geometrias simples em condições de tensão e deformação planas.

De acordo com Zhu e Joyce (2012), a maioria dos softwares comerciais de análise de elementos finitos tem a capacidade de calcular a integral J em uma ponta de trinca bidimensional ou ao longo de uma frente de trinca tridimensional para estruturas reais contendo uma trinca.

Em conclusão, a integração da análise por elementos finitos na determinação da tenacidade à fratura tem se mostrado uma ferramenta inestimável em diversos materiais e

aplicações. A capacidade do MEF de simular condições de carga complexas e prever o comportamento de propagação de trincas aprimora nossa compreensão do desempenho do material e dos mecanismos de falha, tornando-o uma técnica fundamental na pesquisa científica de materiais.

2.2.1. ABAQUS

O ABAQUS é um pacote de programas de engenharia baseado no método dos elementos finitos (MEF), capaz de solucionar desde análises lineares simples até as simulações não lineares mais complexas. Problemas com múltiplos componentes são modelados ao associar a geometria que define cada componente ao modelo de material apropriado, além da especificação das propriedades de interação entre os componentes (ABAQUS, 2014). Esse pacote possibilita a realização de todas as etapas necessárias para a solução de um problema por meio do MEF.

A resolução de problemas no ABAQUS ocorre em três etapas principais: o pré-processamento, no qual são definidas a geometria, as propriedades do material, a montagem do modelo, as condições de contorno e contato, além da aplicação dos carregamentos e a geração da malha; o processamento, etapa em que a simulação é executada com base no método numérico selecionado; e o pós-processamento, que envolve a visualização e interpretação dos resultados por meio de mapas de tensão, deformação e outros parâmetros relevantes.

Ainda assim, tem-se o ABAQUS-CAE que é a interface de trabalho do software que inclui todas as ferramentas necessárias para a criação de modelos e a visualização dos resultados, permitindo um fluxo integrado para a análise por meio do MEF.

2.3. Ensaaios utilizando o método da Integral J

Os ensaios para determinação da tenacidade à fratura utilizando o método da Integral J, de acordo com as determinações da norma ASTM E1820 (ASTM, 2024), foram realizados por Silva (2023) e Alvarenga (2022). A seguir são apresentadas as informações mais importantes sobre estes.

2.3.1. Caracterização do material

Nos trabalhos desenvolvidos por Alvarenga (2022) e Silva (2023), foi utilizado um aço AISI 4340 comercial, amplamente aplicado na indústria de petróleo e gás em componentes de fixação, devido à sua alta resistência mecânica, elevada temperabilidade e boa tenacidade.

O material foi fornecido em barras de 12,7 mm de diâmetro (ALVARENGA, 2022). Uma amostra foi retirada para análise de composição química (Tab. 2.1), a qual foi realizada utilizando espectroscopia de emissão ótica por descarga luminescente (*Glow Discharge Spectrometry* – GDS). Para tanto foi utilizado o espectrômetro GDS 500 da marca LECO, com resolução de 0,001 % em peso. Uma queima foi efetuada, sendo que três medições foram realizadas. Adicionalmente, os teores de C e S foram determinados via técnica de combustão infravermelho com um analisador automático da marca Quimitron, modelo QCS 1232, acoplado a uma balança de precisão da marca Sartorius.

Para obtenção da dureza 40 HRC, amostras com aproximadamente 50 mm de comprimento foram retiradas da barra e tratadas termicamente. O tratamento térmico consistiu em uma solubilização a 870 °C no campo austenítico por uma hora, seguida de têmpera em óleo. Em seguida, as amostras foram submetidas a revenimento em diversas temperaturas por uma hora, utilizando um forno Jung, modelo 2513, número 5786, com resfriamento em óleo para evitar a formação de fases indesejadas (SILVA; MEI, 2010). Não foram encontradas informações sobre o tratamento térmico do AISI 4340-28 HRC. É possível presumir que ele tenha sido ensaiado na forma como recebido.

Após o tratamento térmico, a dureza Vickers foi medida com o durômetro Stiefelmayer-Reicherter, modelo KL-4, utilizando uma carga de 10 kgf (HV10). A dureza foi medida na seção transversal das amostras para evitar que os efeitos da camada descarbonetada na superfície influenciassem os resultados. A conversão de dureza Vickers para Rockwell foi realizada conforme a norma ASTM E140 (ASTM, 2019). A caracterização microestrutural foi realizada, utilizando diferentes técnicas e equipamentos, incluindo um microscópio ótico Olympus modelo BX51M equipado com uma câmera digital Zeiss AxioCam ICc5 para captura de imagens, um microscópio eletrônico de varredura de alta resolução MEV/FEG da marca Zeiss modelo supra 40. Após o tratamento térmico de revenimento nas temperaturas adequadas para alcançar a dureza de 40 HRC, as amostras tiveram suas microestruturas analisadas por microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura, após ataque metalográfico com reagente Nital a 2 % (ALVARENGA, 2022). As Figuras 2.17 e 2.18 apresentam a microestrutura dos aços AISI 4340 nas diferentes durezas.

Tabela 2.1 - Composição química dos aços utilizados nos ensaios (ALMEIDA et al., 2023).

Elemento	% em peso
Fe	Balanço
C	0,470
Mn	0,7230
Cr	0,7910
Ni	1,7200
Mo	0,3110
Si	0,3300
P	0,0118
S	0,0011
Al	0,0268
Cu	0,0978
Nb	0,0069
Ti	0,0167
W	0,0301
V	0,0060
B	0,0015

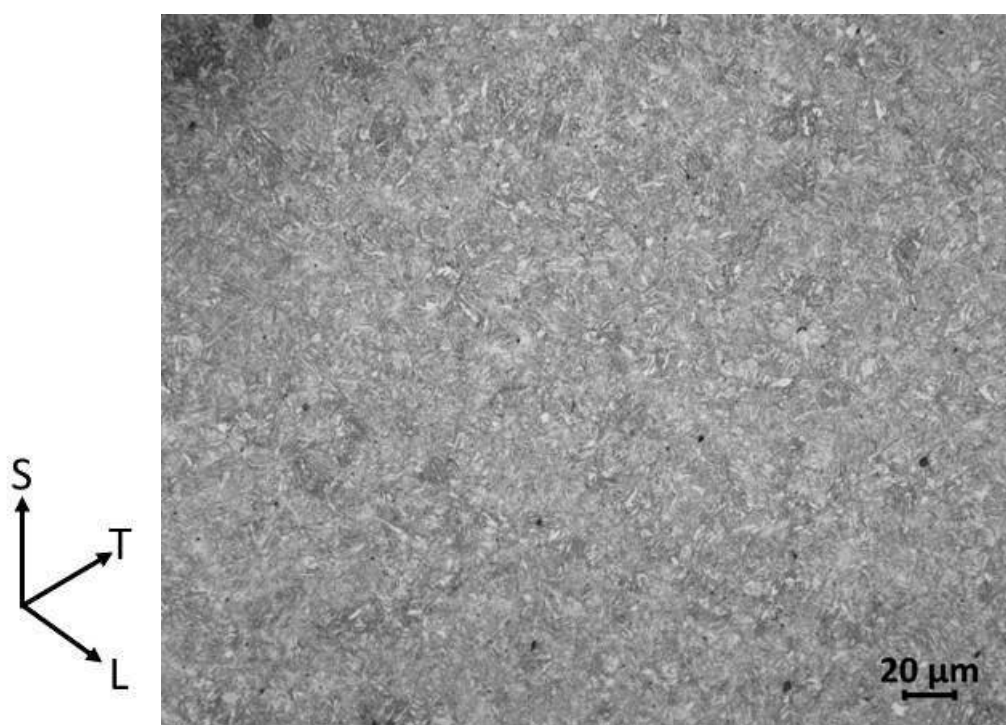


Figura 2.17 - Microestrutura do aço AISI 4340-40 HRC (ALMEIDA et al., 2023).

As propriedades mecânicas dos aços foram analisadas por Alvarenga (2022) e Almeida et al. (2023), por meio de ensaios de tração, conforme determina a norma ASTM E8/E8M (ASTM, 2024). Após o tratamento térmico das barras, três corpos de prova, com diâmetro da seção útil de $6,00 \pm 0,10$ mm, foram usinados em torno com comando numérico computadorizado (CNC) da marca ROMI, modelo GL 240 M.

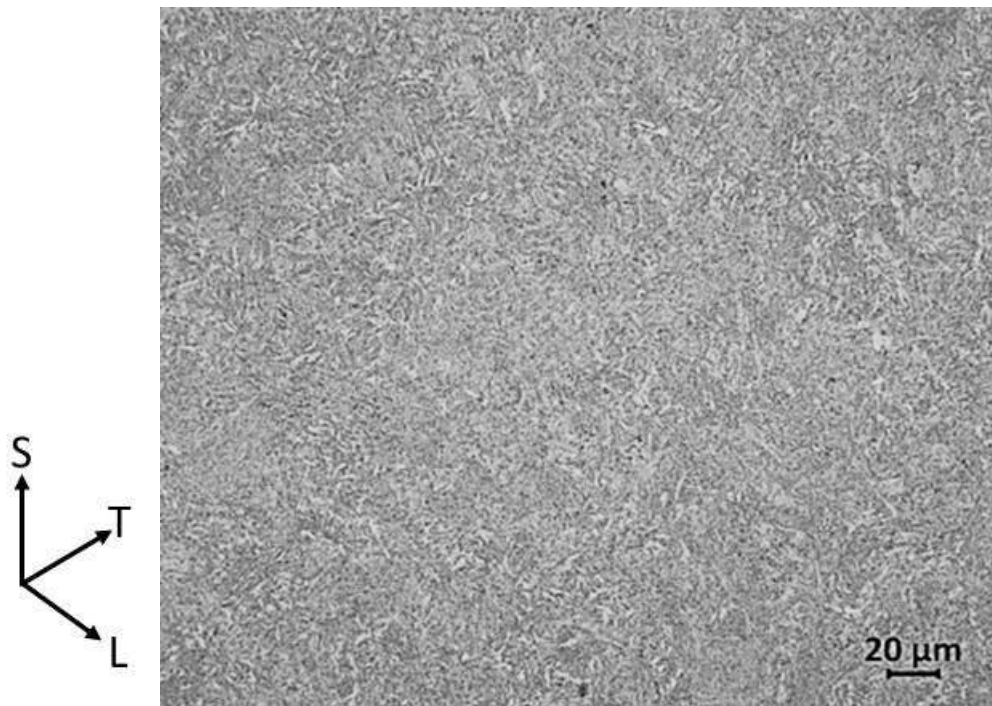


Figura 2.18 - Microestrutura do aço AISI 4340-28 HRC, plano S-L. Ataque: Nital 2 % (ALMEIDA et al., 2023).

A norma ISO 16573 (ISO, 2015b) determina as dimensões e inter-relações das dimensões do CP ilustrado na Fig. 2.19, com $D = 10$ mm. Contudo, ela permite a utilização de diferentes configurações de CPs. Portanto, para adaptar às condições do LTAD-UFU, foram selecionados por Alvarenga (2022) os seguintes parâmetros: $D = 8,33$ mm, $d = 5,00$ mm, $L_c = 60$ mm. Apenas o valor do raio do entalhe (r) foi alterado para obter uma gama diversificada de valores de K relevantes para a pesquisa.

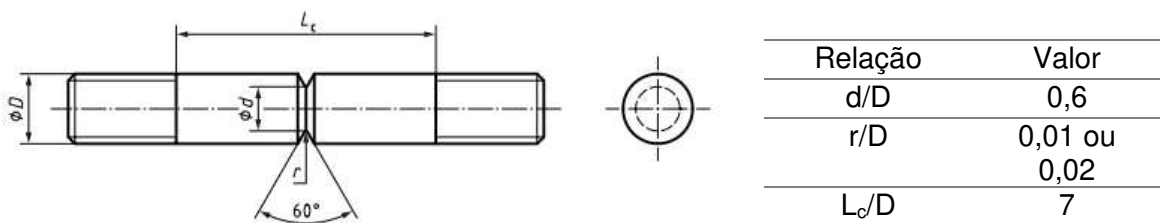


Figura 2.19 - Sugestão de corpo de prova entalhado recomendada pela norma ISO 16573 (ISO, 2015b). Adaptado de Alvarenga (2022).

Os ensaios de tração para o AISI 4340 (40 HRC) foram realizados em uma máquina universal Intermetric, modelo iM, com capacidade máxima de 50 kN, equipada com célula de

carga HBM U10M, também de 50 kN. A velocidade do ensaio foi de 0,5 mm/min, e a partir dos dados coletados, foi possível determinar o limite de escoamento, limite de resistência e alongamento. Após o ensaio, foi medido o diâmetro final dos corpos de prova, permitindo o cálculo da redução de área em comparação com o diâmetro inicial. As medições foram feitas com um paquímetro digital Mitutoyo, de resolução de 0,01 mm e faixa de 150 mm. Cinco ciclos de medição sob temperatura controlada de 20 ± 1 °C foram realizados por Alvarenga (2022).

Para a dureza de 28 HRC, Silva (2023) determinou o limite de escoamento, o limite de resistência e o módulo de elasticidade do aço AISI 4340-28 HRC por meio de ensaios de tração realizados em conformidade com a norma ASTM E8/E8M (ASTM, 2024). A Figura 2.20 apresenta a geometria e as dimensões dos CPs utilizados nesses ensaios.

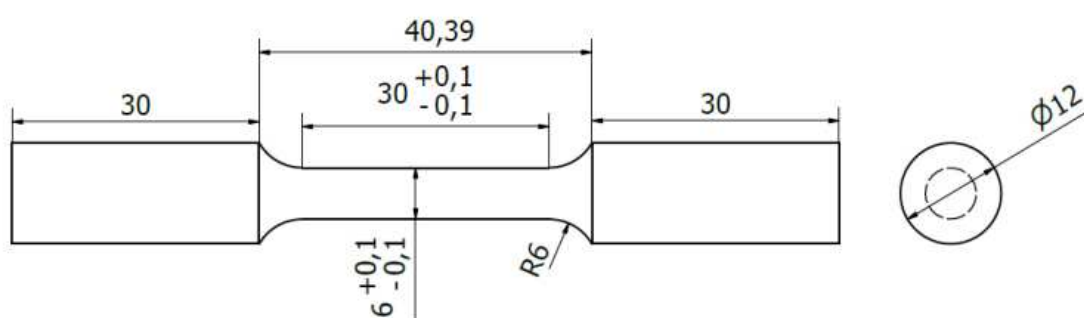


Figura 2.20 - Configuração geométrica e dimensões do CP para o ensaio de tração, especificadas em milímetros (ASTM E8/E8M, 2024).

Os corpos de prova destinados ao ensaio de tração para a dureza de 28 HRC foram fabricados utilizando um torno CNC da marca Romi, modelo GL 240M. Finalizado o processo de usinagem, o diâmetro da seção útil de cada CP foi medido em três pontos distintos ao longo de seu comprimento. Para tanto foi utilizado um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm e faixa nominal de 150 mm da marca Mitutoyo (SILVA, 2023). A Tabela 3.2 mostra as propriedades mecânicas de tração e dureza dos aços AISI 4340.

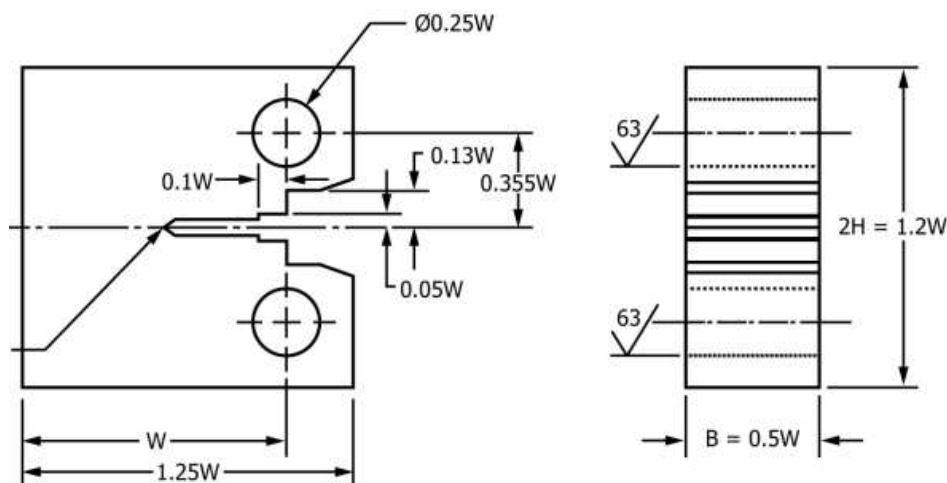
Tabela 2.2 - Propriedades mecânicas de tração e dureza.

Aços	Módulo de Elast., E (GPa)	Coefficiente de Poisson, ν	Limite de Esc., σ_y (MPa)	Limite de Resist., σ_R (MPa)	Dureza, HRC
AISI 4340 (28 HRC)	212	0,3	776,0	911,9	28
AISI 4340 (40 HRC)	213	0,3	1152,0	1248,0	40

2.3.2. Realização dos ensaios Integral J

Alvarenga (2022) conduziu ensaios de acordo com as normas ASTM E1820 (ASTM, 2024) e ISO 7539-9 (ISO, 2008). Os ensaios destinados a determinar a tenacidade à fratura foram realizados em CPs do mesmo material (AISI 4340), na dureza 40 HRC. Os corpos de prova foram retirados de chapas na direção longitudinal-transversal (L-T).

Os corpos de prova do tipo C(T), com espessura de $B = 13 \text{ mm}$ e uma relação $W/B = 2$, foram utilizados para os experimentos, conforme mostra a Fig. 2.21. Os blocos de material AISI 4340 foram tratados termicamente de acordo com os mesmos parâmetros citados anteriormente para alcançar a dureza final de 40 HRC.



Nota: Tolerância em todas as dimensões $\pm 0,013W$

Figura 2. 21 - Geometria e dimensões do CP compacto usados para ensaios de resistência à fratura (ASTM E1820, 2024).

Após o tratamento térmico, os corpos de prova C(T) foram usinados com o auxílio de uma máquina de eletroerosão a fio, modelo FW2U da fabricante AgieCharmilles. A seguir eles passaram pelos processos de fresamento e lixamento em todas as superfícies externas até se atingir um acabamento com lixa de água de granulação #1200.

A norma ASTM E1820 (ASTM, 2024) regulamenta a abertura de uma pré-trinca por fadiga e, posteriormente, a realização do ensaio de tenacidade à fratura. Para tanto, foi utilizada uma máquina de teste universal, da fabricante Instron® modelo 8801, com faixa nominal de $\pm 100 \text{ kN}$. A calibração do equipamento foi realizada no Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD), seguindo as determinações da ISO 7500-1 (ISO, 2004). O certificado de calibração da máquina de teste universal Instron®, declara uma incerteza expandida de $0,09 \text{ kN}$ para um fator de abrangência de aproximadamente 95 % dentro do

intervalo de força de 22,4745 kN a 100,1324 kN (Fig. 2.22), utilizando um extensômetro do tipo *clip gauge*. O corpo de prova foi submetido a uma variação de tensão $\Delta K = 25 \text{ MPa.m}^{0,5}$, com uma razão de carga $R = 0,1$ e uma frequência de 20 Hz, até que a trinca atingisse um comprimento correspondente a uma razão $a/W = 0,5$.

O comprimento da trinca foi medido via método de variação da flexibilidade elástica. Ao final dessa etapa, um entalhe lateral foi usinado em ambas as faces do corpo de prova, conforme as recomendações das normas ASTM E1820 (ASTM, 2024) e ISO 7539-9 (ISO, 2008), com uma profundidade equivalente a 0,10 B. Utilizando o mesmo equipamento (máquina de fadiga servo-hidráulica Instron® modelo 8801), foram realizados ensaios para a obtenção da curva J-R, conforme a norma ASTM E1820 (ASTM, 2024), visando determinar a tenacidade à fratura (K_{JIC}). Vale ressaltar que a curva J-R foi obtida, para determinação da tenacidade à fratura (K_{JIC}), e maiores informações podem ser encontradas em Alvarenga (2022).



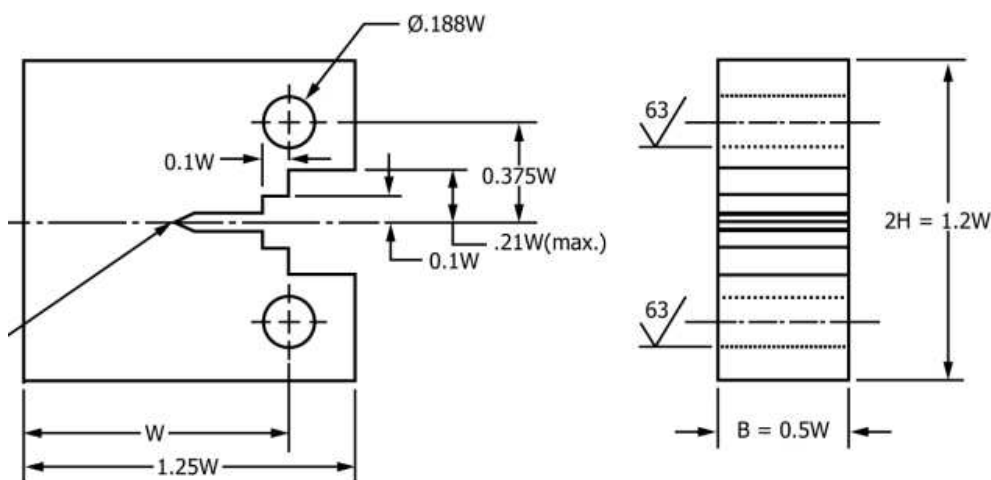
Figura 2.22 - Máquina de fadiga servo-hidráulica Instron® modelo 8801 (BASÍLIO, 2022).

Por sua vez, conforme Silva (2023), para o aço AISI 4340 (28 HRC) os ensaios foram realizados também em uma máquina universal da fabricante Instron® modelo 8801, com faixa nominal de $\pm 100 \text{ kN}$, utilizando controle de deslocamento com velocidades de 0,48 mm/min

até atingir 4 % de deformação, e 2 mm/min para a etapa subsequente. A medição da deformação na região elástica foi feita com o auxílio de um extensômetro eletromecânico axial da marca Instron®, modelo 2620-601, que possui faixa nominal de ± 5 mm e resolução de 0,01 μ m. Após essa etapa, o extensômetro eletromecânico foi retirado, e a deformação passou a ser registrada pelo RVDT (*Rotary Variable Differential Transformer*), integrado ao equipamento, com resolução de 0,0000001° e faixa nominal de $\pm 45^\circ$, até a ruptura do corpo de prova.

A curva J-R, juntamente com o valor provisório de J_Q (que corresponde ao valor inicial de J_{IC} a ser validado), foi gerada diretamente pelo *software* J_{IC} *Fracture Toughness*, integrado à máquina universal de ensaios Instron®. A validação da construção da curva J-R, conforme os critérios estabelecidos pela norma ASTM E1820 (ASTM, 2024), foi realizada por meio da análise da distribuição dos pontos medidos nos gráficos, atendendo às exigências para qualificação de dados (SILVA, 2023).

Para realizar o ensaio pelo método de Integral J foi escolhido por Silva (2023) o CP do tipo *Compact Tension*, C(T), Fig. (2.23).



Nota: Tolerância em todas as dimensões $\pm 0,013W$

Figura 2.23 - Dimensões dos corpos de prova C(T) especificadas pela ASTM E1820 (ASTM, 2024).

De acordo com a norma ASTM E1820 (ASTM, 2024) aplicada por Silva (2023), a espessura do corpo de prova (B) deve atender à restrição especificada pela Eq. (2.5). Esse critério é fundamental para que o valor provisório de J_Q seja considerado equivalente a J_{IC} ($J_Q = J_{IC}$).

$$B, (W - a_0) > 10 \frac{J_Q}{\sigma_F} \quad (2.5)$$

Na Equação (2.5), σ_F representa o limite de resistência à tração do material. Esse limite é calculado utilizando a Eq. (2.6), onde σ_Y é o limite de escoamento e σ_{OUT} é o limite de resistência à tração:

$$\sigma_F = \frac{\sigma_Y + \sigma_{OUT}}{2} \quad (2.6)$$

Além disso, os valores de tenacidade à fratura (K_{JIC}), expressos em $\text{MPa} \cdot \sqrt{m}$, foram determinados a partir de J_{IC} utilizando a Eq. (2.7):

$$K_{JIC} = \sqrt{\frac{E}{(1 - \nu^2)}} \cdot J_{IC} \quad (2.7)$$

Na Equação (2.7), K_{JIC} é a tenacidade à fratura, E é o módulo de elasticidade, e ν é o coeficiente de Poisson.

Para calcular conforme Zhang et al. (2019a) J_{IC} na Eq. (2.7), Silva (2023) utilizou $K_{JIC} = 200,7 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$, e o módulo de elasticidade obtido no ensaio de tração. Substituindo J_{IC} na Eq. (2.5), verificou-se que a espessura do corpo de prova atende à norma. A medição da abertura da trinca foi realizada com um extensômetro Instron® CP117855 (resolução de 0,01 μm e deslocamento máximo de 4 mm).

Os ensaios J_{IC} foram realizados com parâmetros definidos: força máxima de 6,1 kN, força mínima de 1,2 kN, taxa de carregamento e descarregamento de 0,15 mm/min, descarregamento de 20 % e incremento da linha de carga de 0,02 mm (SILVA, 2023).

Esses ensaios resultaram na obtenção da curva J-R e do valor J_{IC} , permitindo o cálculo da tenacidade à fratura (K_{JIC}) do material por meio da Eq. (2.7). As medições e procedimentos atenderam às especificações estabelecidas para a análise, e maiores informações podem ser encontradas em Silva (2023).

Arencibia et al., (2024) realizou estudos sobre a fabricação de armaduras de dutos flexíveis, designados nesta dissertação como Aço A e Aço B. A Tabela 2.3 mostra a composição química destes aços, obtida via espectroscopia de emissão ótica por descarga luminescente. Para tanto foi utilizado o espectrômetro GDS 500 da marca LECO, especificado anteriormente. Três medições foram efetuadas.

Vale destacar que de acordo com Arencibia et al., (2024), estas armaduras são fabricadas em aços de médio e alto carbono. Na Tabela 2.3 se observa que o aço A tem

0,341 % em peso de carbono e o Aço B 0,589 % em peso. De acordo com Calliester (2021), os aços com teor médio de carbono no intervalo de 0,3 a 0,6 % são considerados de médio carbono. Desta forma, ambos os aços são classificados como aços de médio carbono.

Tabela 2.3 - Composição química dos aços A e B em % de peso (ARENCIBIA et al., 2024).

Elemento químico	Aço A	Aço B
Fe	Balanço	Balanço
C	0,341	0,589
Mn	0,726	0,664
Si	0,247	0,302
P	0,0195	0,0113
S	0,0018	0,0008
Cr	0,0289	0,0225
Ni	0,0337	0,0232
Mo	0,0053	0,0079
Al	0,03	-
Cu	0,0117	0,0090
Ti	0,0018	0,0048
V	0,0013	0,0005
B	0,0010	-

Os mapas de microdureza Vickers destes aços foram obtidos por Arencibia et al., (2024). Estes mostraram que na seção transversal da amostra avaliada, o Aço A exibe valores mínimo e máximo de dureza (HV0.1) iguais a 183 e 337, respectivamente. Por sua vez, para o Aço B estes valores são de 250 e 330, respectivamente.

O Aço A apresenta menor teor de carbono, dureza similar ao aço B e uma matriz predominantemente ferrítica como mostra a Fig. 2.24a. Desta forma, pode-se inferir que este aço tende a apresentar características de ductilidade superiores em comparação ao Aço B e, consequentemente, pode apresentar melhores propriedades de tenacidade nos ensaios de impacto. O Aço B por sua vez, apresenta uma matriz predominantemente perlítica (Fig. 2.24b), com ferrita próeutetoide nos contornos de grão.

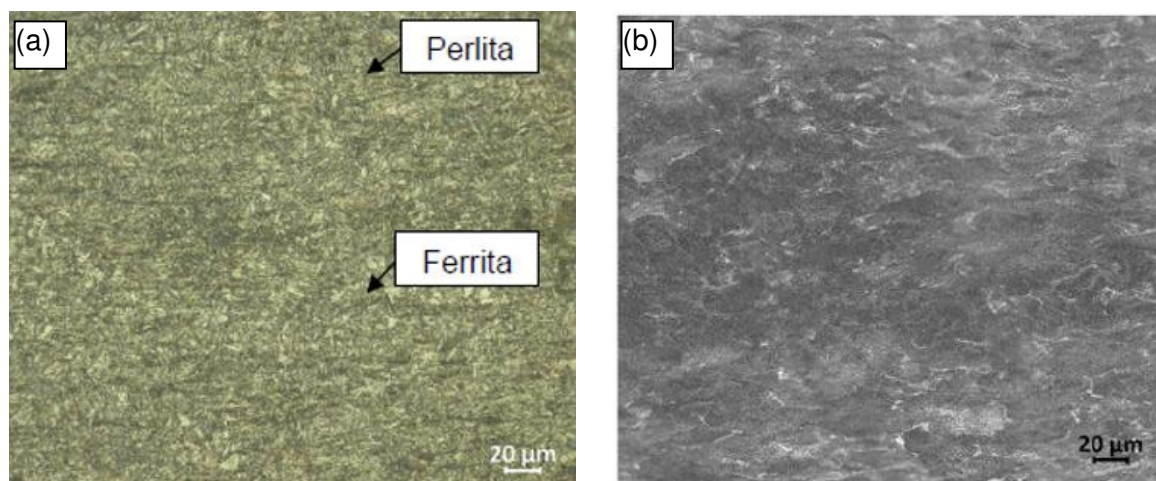


Figura 2.24 - Microestrutura dos (a) Aços A (ARENCIBIA et al., 2024) e (b) Aço B (ARENCIBIA et al., 2023).

Os ensaios de tração destes aços foram realizados conforme determinações da ASTM E8/E8M-13a (ASTM, 2015). Os corpos de prova de tração foram ensaiados em uma máquina de ensaio universal, servo-hidráulica, fabricante INSTRON, modelo 8801 e utilizando um extensômetro axial da marca Instron, modelo 2620-601, com capacidade máxima de ± 5 mm. Os resultados dos ensaios são mostrados na Tab. 2.4.

Tabela 2.4 - Propriedade mecânicas dos Aços A e B (ARENCIBIA et al. 2024).

	Módulo de elasticidade (GPa)	Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência (MPa)
Aço A	103,9	753,7	820,1
Aço B	103,1	752,5	888,8

De acordo com a ASTM E1820 (ASTM, 2024), o comprimento máximo da trinca (Δa_{max}) para um CP C(T) é dado pela Eq. (2.8).

$$\Delta a_{max} = 0,25b_o \quad (2.8)$$

Na Equação (2.8), b_o é o ligamento inicial do CP.

O b_o é definido pela ASTM E1820 (ASTM, 2024) como a distância da ponta da pré-trinca até a borda posterior do CP e é calculado pela Eq. (2.9).

$$b_o = W - a_o \quad (2.9)$$

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Neste capítulo, é apresentada a metodologia proposta para alcançar o objetivo deste estudo, qual seja, analisar a tenacidade à fratura via modelamento numérico usando elementos finitos, de acordo com as determinações da norma ASTM E1820 (ASTM, 2024). Para um melhor entendimento este capítulo foi dividido em três tópicos: simulação via elementos finitos para análise e determinação dos valores de tenacidade à fratura; validação da metodologia de simulação; e determinação da tenacidade à fratura de materiais utilizados em componentes dos quais não se dispõe de material suficiente para fazer ensaios convencionais com corpos de prova (CPs) e analisar os resultados obtidos visando avaliar o potencial de uso da simulação bem como suas vantagens, limitações e potenciais melhorias.

3.1. Simulação via elementos finitos para análise e determinação dos valores de tenacidade à fratura

As simulações foram realizadas utilizando o software comercial Abaqus versão 2023. Para a execução dos ensaios numéricos, foi desenvolvido um programa em Python que automatizou as simulações, eliminando a necessidade de intervenção manual para cada variação de parâmetro. A Figura 3.1 apresenta a interface inicial do Abaqus CAE, destacando o ambiente utilizado para a modelagem, configuração e execução das análises numéricas.

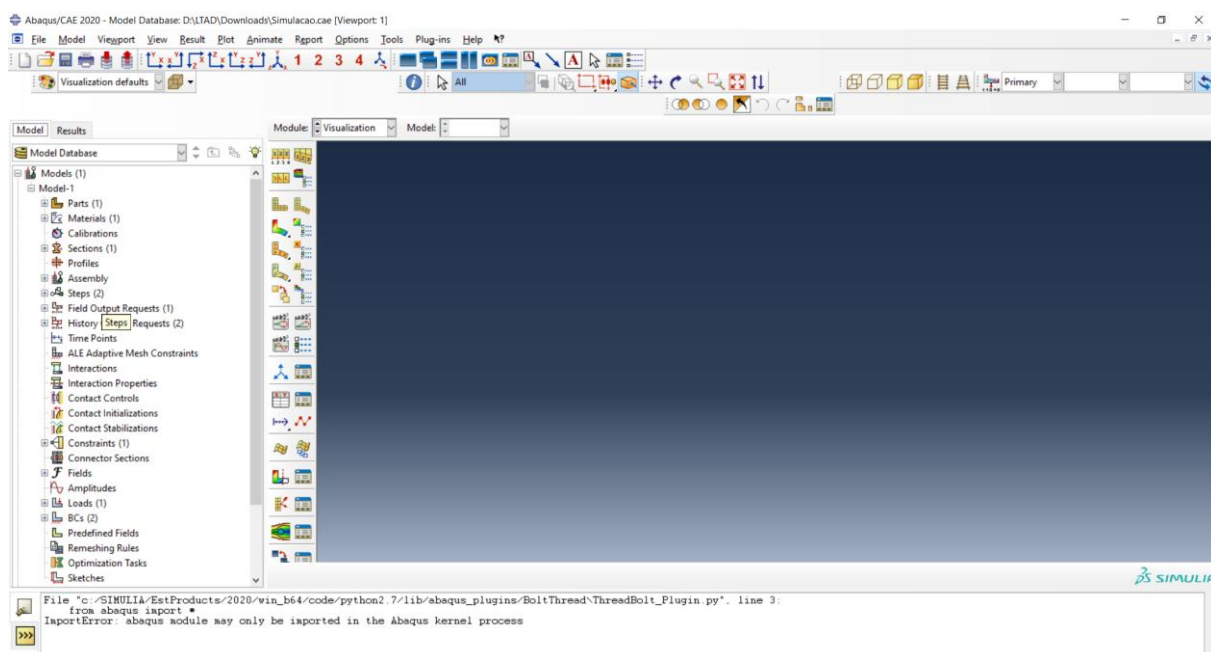


Figura 3.1 - Interface do *software* Abaqus/CAE 2020.

3.1.1. Geometria

A metodologia de simulação para a análise da tenacidade à fratura seguindo o método da Integral J inicia com a definição da geometria. Os corpos de prova do tipo C(T) foram utilizados para as simulações, conforme mostra a Fig. 3.2. A Figura 3.3 apresenta a geometria aberta no software Abaqus CAE, ilustrando o ambiente utilizado para a modelagem e preparação da simulação.

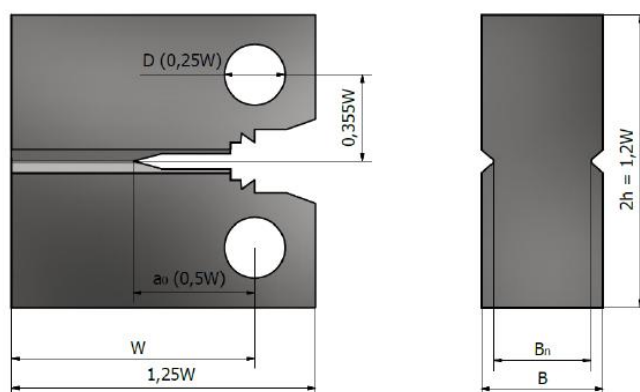


Figura 3.2 - Desenho técnico do corpo de prova C(T) da norma ASTM E1820 (ASTM, 2024).

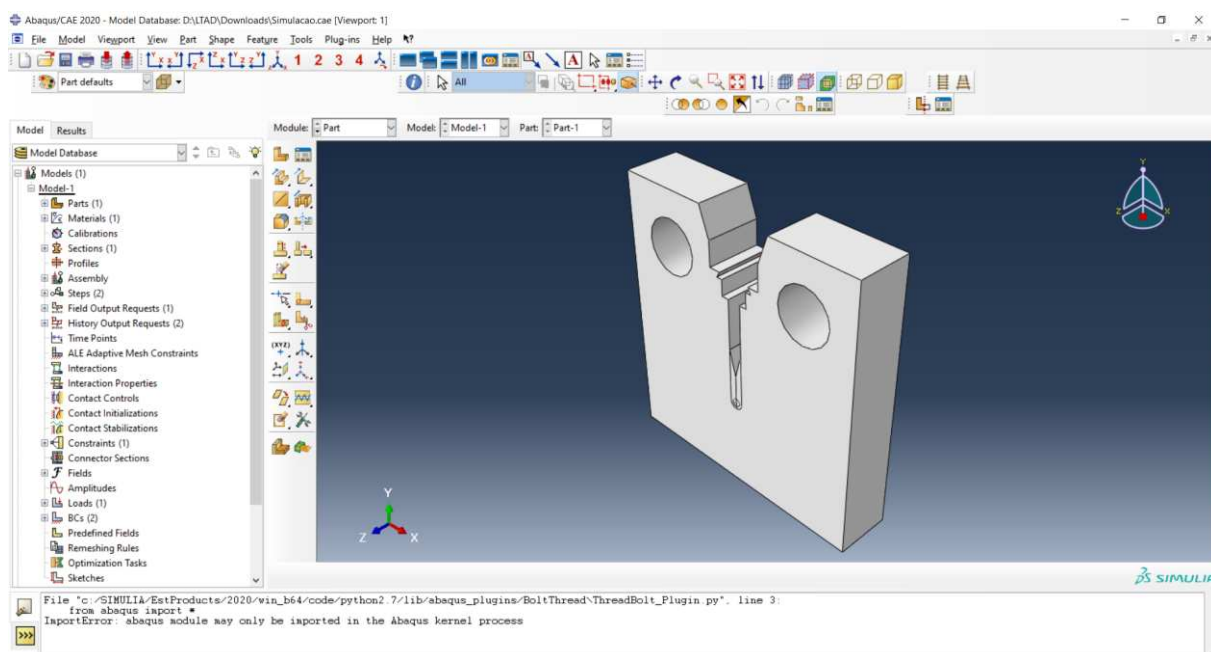


Figura 3.3 – Geometria no *software* Abaqus/CAE 2020.

3.1.2. Material

Para validar o modelo com base nos dados experimentais disponíveis, foi realizada uma simulação computacional utilizando o aço de liga níquel-cromo-molibdênio 4340, caracterizado por uma dureza de 40 HRC na escala Rockwell C. Assim, a Figura 3.4 apresenta a representação gráfica da relação entre tensão e deformação de engenharia.

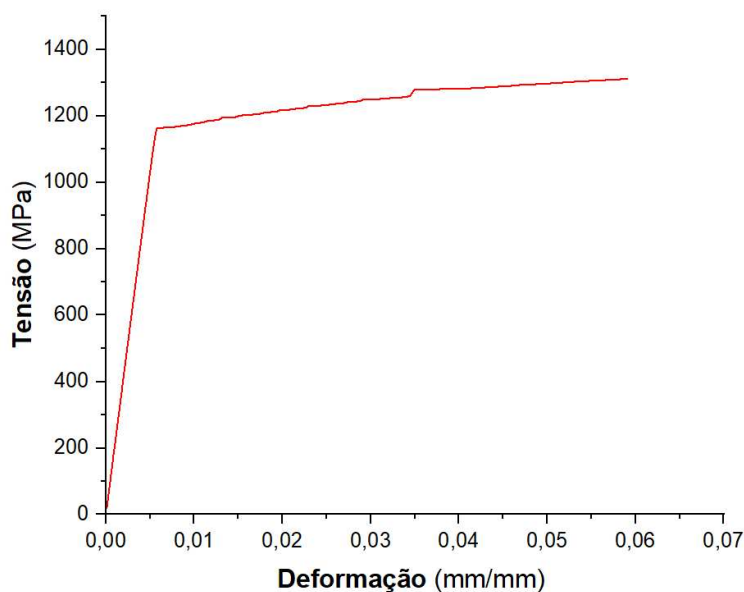


Figura 3.4 - Curva tensão em função da deformação para o aço liga 4340 com dureza 40 HRC.

3.1.3. Tipo de Elemento

Quanto à malha utilizada para modelagem, foi adotada uma abordagem que utiliza elementos específicos para capturar com precisão o comportamento do material. Neste contexto, foram utilizados elementos como o C3D15 (Fig. 3.5a), na ponta da trinca, um prisma triangular quadrático composto por 15 nós, juntamente com o C3D20R (Fig. 3.5b), nas demais regiões, quadrático contendo 20 nós.

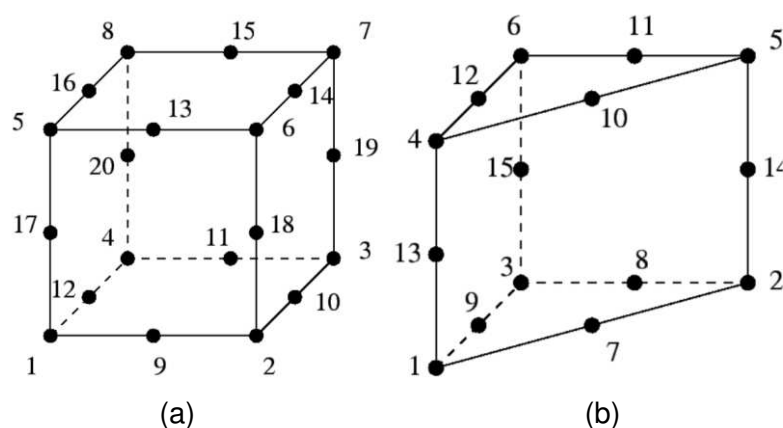


Figura 3.5 - Tipos de elementos finitos adotados: a) C3D15 e b) C3D20R.

3.1.4. Condições de Contorno

O comprimento de trinca (Fig. 3.6a) utilizado na simulação no *software* Abaqus não foi fixado em um único valor, mas sim considerado como variável. Para o material AISI 4340 com dureza de 40 HRC, o intervalo adotado foi de 13,64 mm a 14,74 mm. Assim, a relação a/W (Fig. 3.6b) variou entre 0,52 e 0,57, e a presença de 61 vetores alinhados à ponta da trinca (Fig. 3.7). Para o furo da esquerda, foram estabelecidos valores nulos para as coordenadas X , Y e Z , bem como para os ângulos de rotação θ_x , θ_y e θ_z .

De forma a validar a simulação o valor de tenacidade à fratura K_{JIC} obtidos foram comparados com os experimentais obtidos por Alvarenga (2022). Para fins de comparação, a partir dos resultados de Alvarenga (2022), foi selecionado um ponto da curva força versus a linha de deslocamento da força (*load line displacement* – LLD), utilizado um intervalo de força entre 15,45 kN e 20,42 kN para realizar a simulação. Com isso, foi possível comparar o valor da tenacidade à fratura correspondente ao ponto na curva J-R, uma vez que a força selecionada é aplicada no ponto de referência localizado no segundo furo.

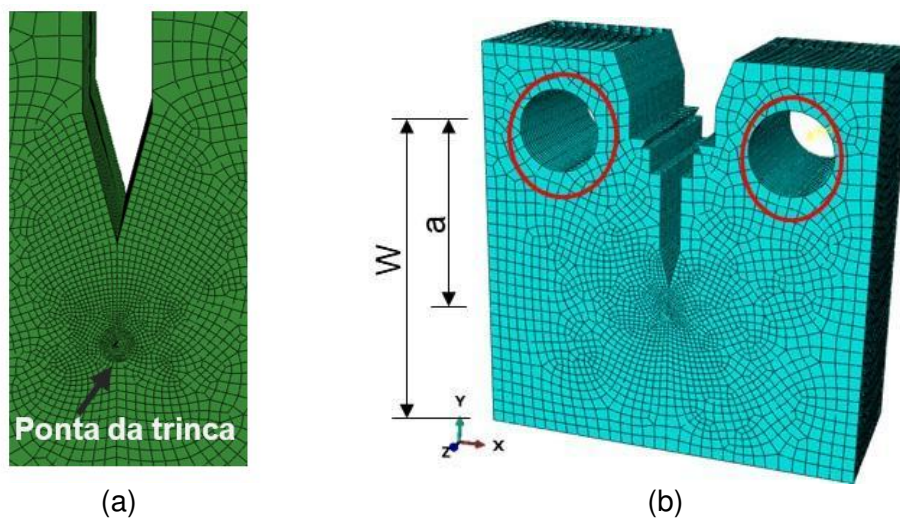


Figura 3.6 - (a) Representação da ponta da trinca (b) Relação a/W .

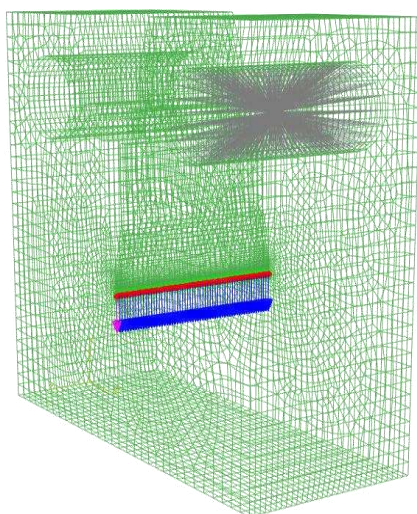


Figura 3.7 - Detalhes da malha e dos 61 vetores alinhados à ponta da trinca.

3.1.5. Modelo Mecânico

Para as simulações por meio de elementos finitos, optou-se pelo modelo mecânico de análise estática geral, dentre as opções disponíveis no software ABAQUS®. No âmbito dessa seleção, mantiveram-se as configurações padrão do programa, onde o número máximo de incrementos é de 100000 e do tamanho do incremento fixado em 0,1. Essas escolhas específicas foram feitas visando garantir a convergência do modelo mecânico.

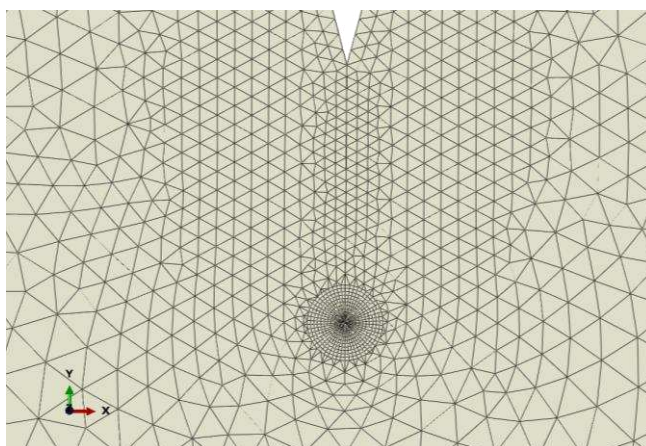
Outro aspecto do modelo reside no acoplamento mecânico. Optou-se pelo tipo de acoplamento cinemático disponibilizado pelo *software* ABAQUS®, sendo feita a seleção integral dos eixos x-y-z para os graus de liberdade restringidos, tanto em termos de translação quanto de rotação.

3.1.6. Modelo de trinca

O modelo de trinca desempenha um papel essencial na obtenção dos resultados desejados neste relatório, especialmente no cálculo do fator de intensidade de tensão K_I e a integral J. Para essa finalidade, utiliza-se a funcionalidade de integral de contorno disponível no ABAQUS®. Dentre as opções desse modelo, escolhe-se a alternativa "*q vectors*" para direcionar os vetores na extremidade da trinca. Além disso, o parâmetro "t" é definido como 0,24, e emprega-se a opção de propagação dos vetores de trinca com nó único.

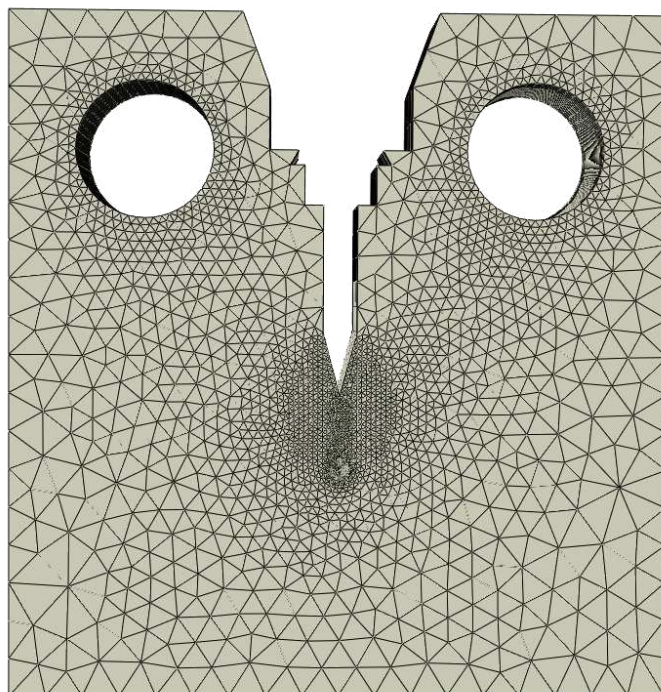
3.1.7. Refinamento de Malha

O refinamento mais denso de elementos é priorizado na região da ponta da trinca (Fig. 3.8), uma vez que essa área concentra os gradientes mais elevados de tensões e deformações. No restante do corpo de prova, utiliza-se uma malha mais grossa, considerando que os gradientes nessas regiões são menos críticos. Como exceção, a região circular de aplicação da carga e das condições de contorno apresenta um refinamento intermediário, garantindo precisão na transferência das forças e o atendimento adequado às restrições impostas.



(a)

Figura 3.8 - Estratégia adotada para refinamento de malha para o modelo do ensaio convencional.



(b)

Figura 3.8 - Continuação.

3.1.8. Análise de Convergência de Malha

A Figura 3.9 apresenta o estudo de convergência realizado para determinar o número ótimo de elementos finitos nas simulações em regime elastoplástico. O objetivo foi identificar a quantidade de elementos a partir da qual os resultados da energia deixam de sofrer variações significativas.

Conforme demonstrado na Fig. 3.9, verificou-se que uma malha com aproximadamente **85.000 elementos** representa o ponto de convergência adequado para as simulações. Assim, esse valor foi adotado como referência nos demais estudos numéricos.

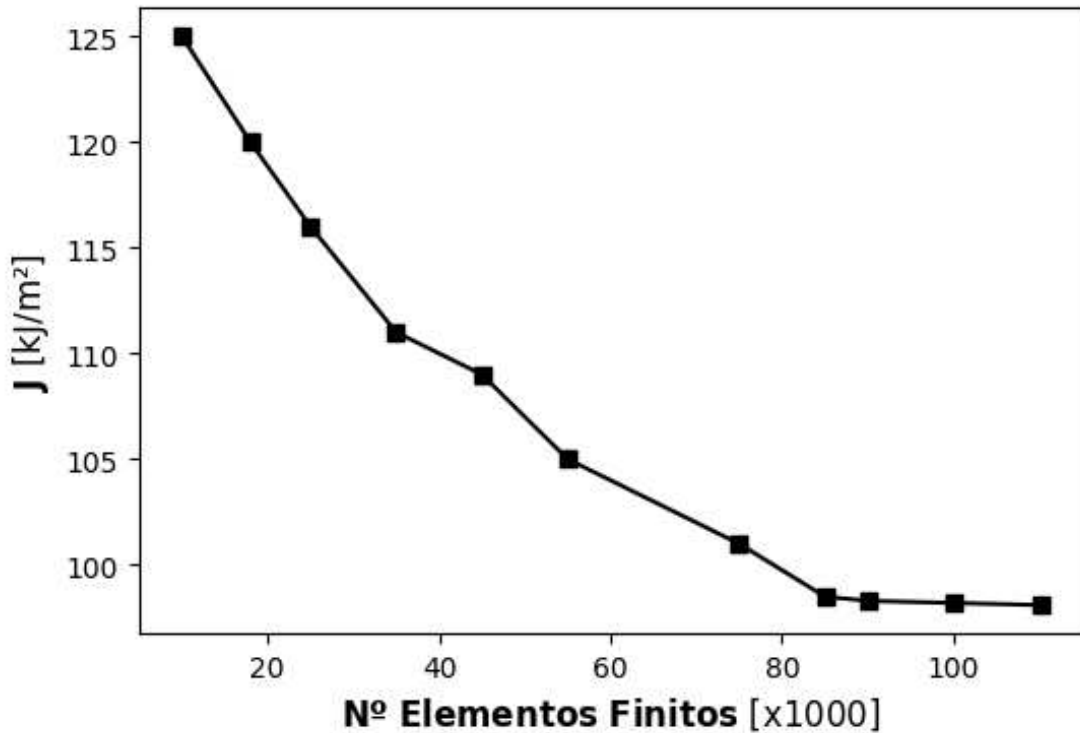


Figura 3.9 - Convergência de malha para o ensaio convencional.

3.1.9. Output de Resultados

O principal parâmetro de saída obtido foi o valor da Integral J, utilizado como medida da tenacidade à fratura do material. A Integral J foi calculada para cada condição de carga, permitindo a construção de uma curva que relaciona a variação de força com o comportamento do material frente à propagação da trinca. Para obter uma curva representativa, foram realizadas nove simulações distintas, todas para o material AISI 4340-40 HRC.

De acordo com a norma ASTM E1820 (ASTM, 2024), uma abordagem para a determinação da tenacidade à fratura J_{IC} envolve ajustar uma lei de potência aos dados, garantindo que a extrapolação seja baseada em uma representação matemática consistente do comportamento do material. Essa técnica permite identificar J_{IC} de forma precisa, mesmo em condições que possam introduzir ruído nos dados.

$$J = C_1 \left(\frac{\Delta a}{k} \right)^{C_2} \quad (3.1)$$

Na Equação (3.1), C_1 e C_2 são os coeficientes ajustados, enquanto k é um fator de escala definido como $k=1,0$ mm. A determinação de J_{IC} ocorre em uma região delimitada por

critérios rigorosos de seleção de dados, conforme mostra a Fig. 3.10, considerando limites inferiores e superiores que garantam a representatividade e a validade dos resultados.

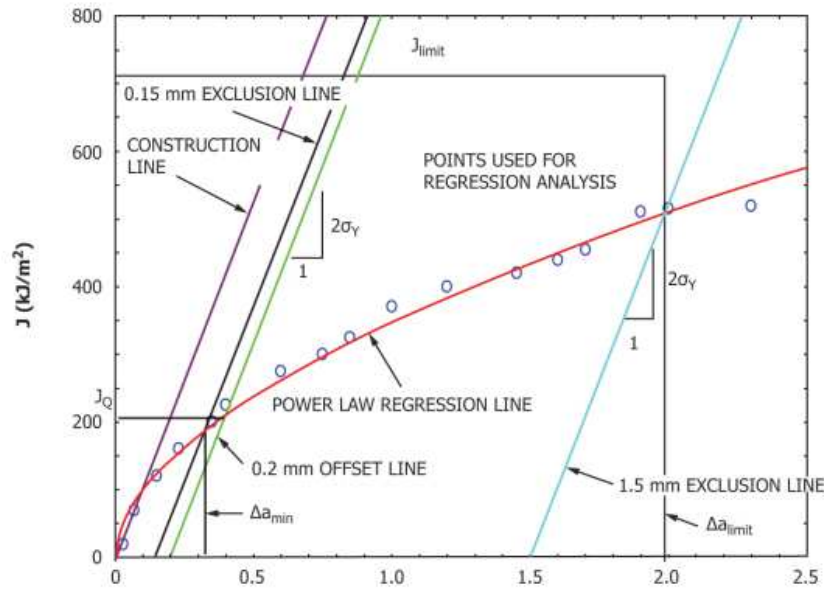


Figura 3.10 - Definição de linhas de construção para qualificação de dados (ASTM E1820, 2024).

Primeiramente, a curva ajustada pelo modelo de lei de potência deve ser interceptada pelas linhas de exclusão nos valores de deslocamento de 0,15 mm e 1,5 mm. Essas interseções são projetadas verticalmente em direção ao eixo das abscissas, determinando os limites inferiores (Δa_{min}) e superiores (Δa_{limit}) do intervalo aceitável de dados. Assim, qualquer ponto de dado que se situe fora desse intervalo deve ser desconsiderado, pois pode indicar anomalias ou inconsistências nos resultados obtidos.

Além disso, os dados que excedem a capacidade limitem de J devem ser eliminados. O limite de J é definido como mostra a Eq. (3.2).

$$J_{Limit} = b_o \cdot \sigma_Y / 7,5 \quad (3.2)$$

Na Equação (3.2), b_o representa a largura inicial do corpo de prova e σ_Y é o limite de escoamento do material. A exclusão de dados acima deste valor evita extrapolações inadequadas, garantindo que as interpretações do comportamento do material permaneçam no domínio de validade do ensaio.

Com isso, os pontos de dados qualificados formam uma região delimitada, conforme ilustrado na Fig. 3.11, que assegura a robustez e a coerência das análises. A aplicação desses

critérios é crucial para garantir que os valores de J_Q reflitam adequadamente a resistência à fratura do material ensaiado, minimizando possíveis erros decorrentes de anomalias ou condições de ensaio fora do esperado.

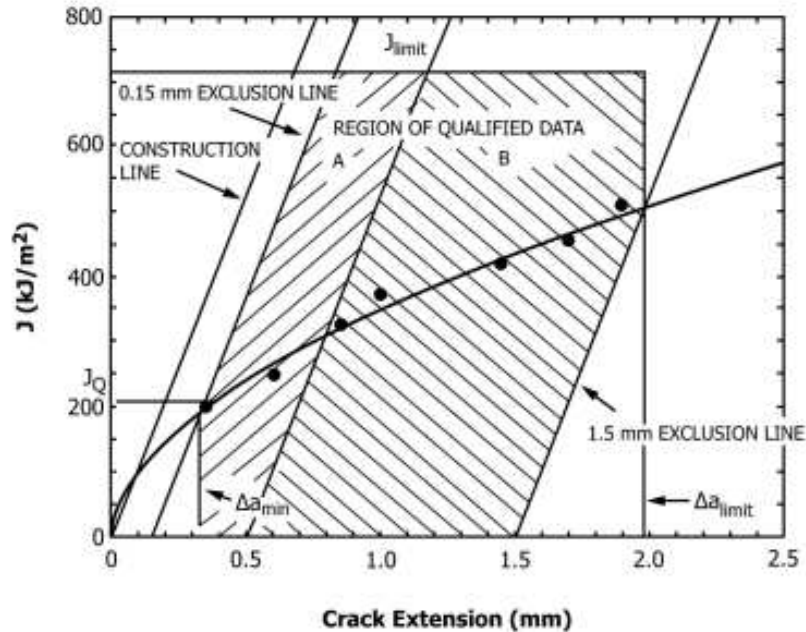


Figura 3.11 - Definição das regiões para Qualificação dos dados (ASTM E1820, 2024).

Para identificar os pontos de dados a serem utilizados no ajuste, começa-se pelo último ponto dentro dos limites definidos pela norma, designado como índice n . A partir desse ponto, retrocede-se ao longo dos ciclos de descarregamento até encontrar o primeiro ponto que esteja à esquerda da linha de exclusão de 0,15 mm, designado como índice m . Apenas os pontos entre $m+1$ e n são utilizados no ajuste, assegurando que anomalias iniciais, como baixos valores de J deslocados para a direita da linha de exclusão, não comprometam a análise, ASTM E1820 (ASTM, 2024).

Para ajustar os dados, a relação de lei de potência é linearizada por meio da transformação logarítmica (Eq. 3.3).

$$\ln J = \ln C_1 + C_2 \ln \left(\frac{\Delta a}{k} \right) \quad (3.3)$$

Essa forma facilita a aplicação de uma análise de regressão por mínimos quadrados, possibilitando determinar os coeficientes C_1 e C_2 de forma estatisticamente robusta. A linha de regressão resultante é então traçada no gráfico J versus Δa , conforme ASTM E1820 (ASTM, 2024).

Um aspecto crucial desse método é que ele evita inconsistências nos dados, como mostra na norma ASTM E1820 (ASTM, 2024). Anomalias no início do ensaio podem levar a $C_2 > 1$, resultando em valores irrealisticamente baixos de J_{IC} . A seleção criteriosa dos dados evita tais problemas, garantindo que o ajuste da lei de potência capture com precisão o comportamento do material.

3.2. Validação da simulação

Para avaliar a exatidão dos resultados da simulação foi calculado o erro sistemático (E_s). Para tanto a Eq. (3.4) foi utilizada.

$$E_s = V(S) - V(E) \quad (3.4)$$

Na Equação (3.4), $V(S)$ é o valor simulado de tenacidade à fratura e $V(E)$ é o valor experimental.

3.3. Aplicação da metodologia para determinar a tenacidade de outros materiais

A metodologia desenvolvida por Alvarenga (2022) e Silva (2023) foi aplicada para determinar a tenacidade à fratura de dois aços carbono, utilizados na fabricação de armaduras de dutos flexíveis, designados nesta dissertação como Aço A e Aço B.

Os parâmetros de entrada da simulação são os resultados do ensaio de tração, conforme a Seção 2.3 deste trabalho. O comprimento da pré-trinca por fadiga foi estimado com base na ASTM E1820 (ASTM, 2024), a qual deve estar entre 0,45 e 0,70 W. Desta forma, o valor de a_0 foi estimado considerando um $W=26$ mm. Para os corpos de prova utilizados, o Aço A apresentou seção transversal de 7 mm por 14 mm, enquanto o Aço B apresentou 6 mm por 20 mm, respeitando as proporções adequadas para a análise de tenacidade à fratura.

Também foi necessário adotar valores de força para cada comprimento de trinca. Para tanto foram tomados como base os intervalos de força dos ensaios experimentais utilizados por Alvarenga (2022) e da Silva (2023).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos e as discussões. Para facilitar o entendimento, este foi dividido em quatro tópicos, que são: Resultados experimentais dos ensaios para determinação do J_{IC} . Resultados preliminares da simulação para obtenção dos valores de J_{IC} . Resultados definitivos da simulação dos valores de J_{IC} . Resultados da aplicação da simulação para obtenção da tenacidade à fratura em outros materiais.

4.1. Resultados experimentais dos ensaios para determinação de J_{IC} (ASTM E1820)

As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam as curvas integral $J \times \Delta a$ obtidas para o aço AISI 4340 nas diferentes durezas, onde J representa o valor da integral J e Δa corresponde ao comprimento da trinca.

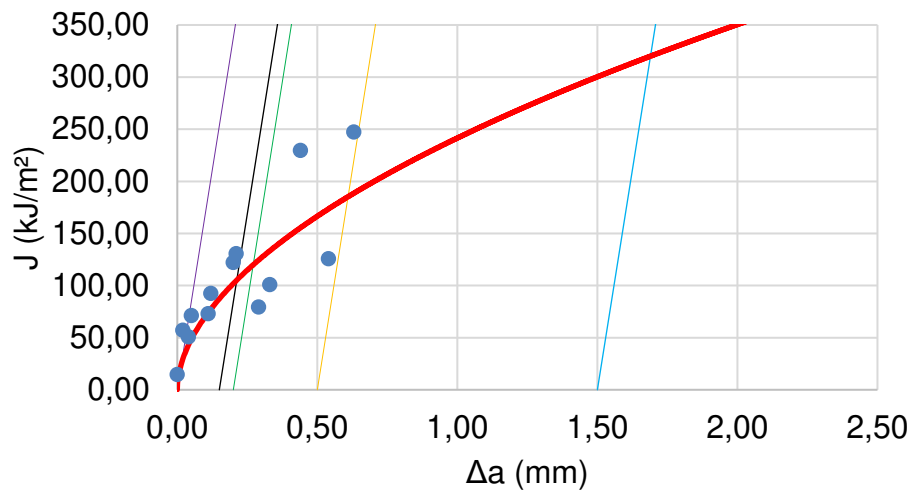


Figura 4.1 - Curvas $J \times \Delta a$ obtidas conforme norma ASTM E1820 (ASTM, 2024) para o AISI 4340-28 HRC (SILVA, 2023).

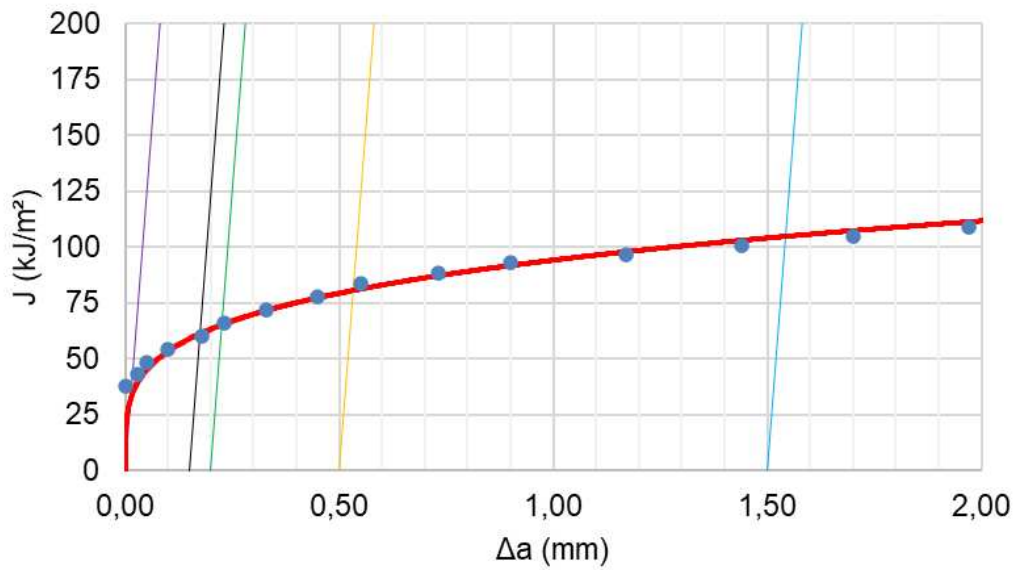


Figura 4.2 - Curva $J \times \Delta a$ obtida conforme norma ASTM E1820 (ASTM, 2024) para o AISI 4340-40 HRC (ALVARENGA, 2022).

A Tabela 4.1 mostra os valores de J_{IC} experimentais obtidos para ambos os materiais ensaiados. Estes valores são utilizados como referência durante a etapa de validação da simulação.

Tabela 4.1 - Valores de J_{IC} experimentais para os materiais ensaiados.

Aços	J_{IC} , kJ/m ²
AISI 4340-28 HRC	143,23 (SILVA, 2023)
AISI 4340-40 HRC	65,43 (ALVARENGA, 2022)

4.2. Resultados preliminares da simulação dos valores de J_{IC}

A Tabela 4.2 mostra os valores de J-integral obtidos via simulação (S) para o aço AISI 4340-40 HRC utilizando a abordagem inicial da simulação via elementos finitos. Para efeitos de comparação, nesta tabela são mostrados ainda os valores experimentais (E) de J-integral obtidos por Alvarenga (2022). Os valores de erro na unidade do mensurando e em porcentagem são também apresentados.

Tabela 4.2 - Valores de J-integral obtidos via simulação (S) e experimentais (E) para o aço AISI 4340-40 HRC.

ΔA	J-Integral (E)	J-Integral (S)	Erro (kJ/m ²)	Erro (%)
0	37,42	25,76	-11,66	-31,2
0,03	42,86	29,46	-13,40	-31,3
0,05	48,35	32,64	-15,71	-32,5
0,10	54,18	37,08	-17,10	-31,6
0,18	59,86	41,35	-18,51	-30,9
0,23	66,15	47,13	-19,02	-28,8
0,33	72,11	51,06	-21,05	-29,2
0,45	77,78	56,20	-21,58	-27,7
0,55	83,33	60,98	-22,35	-26,8

Para melhor entendimento, a Fig. 4.3 mostra os erros associados à simulação para cada valor de ΔA considerado. Nesta figura se observa que a simulação tem a tendência de fornecer valores de J-integral menores que os experimentais (valores de erro sistemático negativos). Estes erros aumentam com o aumento dos valores de ΔA . Um efeito inverso é observado com os valores de erro sistemático em porcentagem os quais tendem a diminuir com o aumento de ΔA . Para $\Delta A = 0$ o erro é da ordem de -31,2 %, enquanto para $\Delta A = 0,55$ mm o erro assume -26,8 %. Este fato atribui uma baixa exatidão aos valores de J-integral simulados.

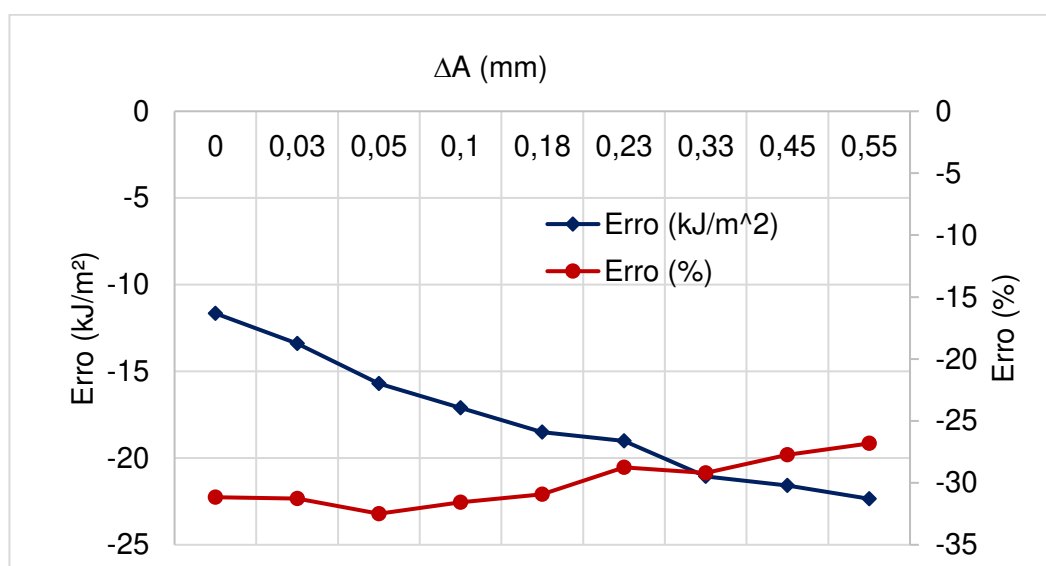


Figura 4.3 - Erro sistemático associado à simulação dos valores de J-integral simulados para o aço AISI 4340-40 HRC.

Os valores simulados foram plotados na curva de J-integral, Fig. 4.4. Se observa que os valores de J-integral simulados estão abaixo dos experimentais.

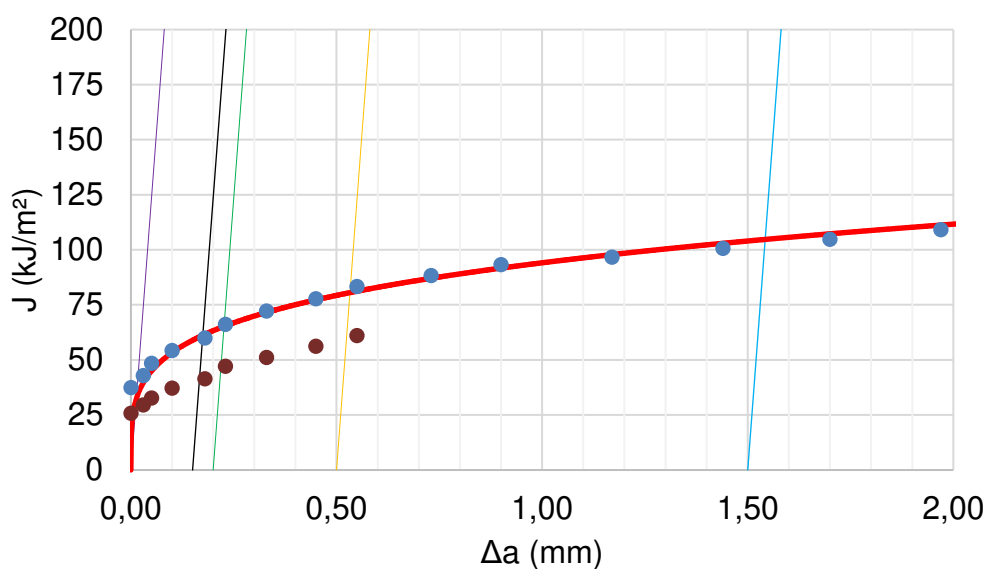


Figura 4.4 - Valores de J simulados, indicando um erro sistemático negativo para o aço AISI 4340-40 HRC.

A partir dos valores simulados de $J(S)$ foi calculado o valor da tenacidade à fratura resultante da simulação para o aço AISI 4340-40 HRC, $J_{IC}(S)$. O valor resultando de $J_{IC}(S)$ foi de $44,8 \text{ kJ/m}^2$. Comparando este valor com o experimental, se observa que como esperado o

valor de $J_{IC}(S)$ simulado é menor que o $J_{IC}(E)$. O erro sistemático obtido foi de 20,4 kJ/m², representando -31,3 % do valor experimental. Este fato atribui baixa exatidão ao valor de tenacidade à fratura obtido via simulação e impõe a necessidade de refinar a malha utilizada.

4.3. Resultados definitivos da simulação dos valores de J_{IC}

A malha foi refinada e novas simulações foram realizadas para o mesmo material. A Tabela 4.3 mostra os valores de J obtidos via simulação para o aço AISI 4340-40 HRC, após o refinamento da malha (R). Para efeitos de comparação, nesta tabela são mostrados ainda os valores experimentais (E) de J-integral obtidos por Alvarenga (2022). Os valores de erro na unidade do mensurando e em porcentagem são também apresentados.

Tabela 4.3 - Valores de J-integral obtidos via simulação após o refinamento da malha (R) e experimentais (E) para o aço AISI 4340-40 HRC.

ΔA	J-Integral (E)	J-Integral (R)	Erro (kJ/m ²)	Erro (%)
0	37,42	30,13	-19,47	-7,29
0,03	42,86	34,31	-19,95	-8,55
0,05	48,35	38,49	-20,39	-9,86
0,1	54,18	43,45	-19,80	-10,73
0,18	59,86	48,99	-18,16	-10,87
0,23	66,15	54,21	-18,05	-11,94
0,33	72,11	60,95	-15,48	-11,16
0,45	77,78	67,32	-13,45	-10,46
0,55	83,33	73,61	-11,66	-9,72

Para facilitar as análises, a Fig. 4.5 mostra os valores de erro sistemático. Nesta figura se observa que a simulação continua fornecendo valores de J menores que os experimentais, porém os valores após o refinamento estão mais próximos dos valores experimentais. O aumento estritamente crescente dos valores de erro não é mais observado na medida em que os valores de ΔA aumentam. O erro em porcentagem foi reduzido com o refinamento da malha em pelo menos 37,5 % para ΔA igual a zero, enquanto para $\Delta A = 0,55$ mm o erro foi reduzido em 56,5 %. Este fato é indicativo da melhoria na exatidão dos valores simulados com o refinamento da malha.

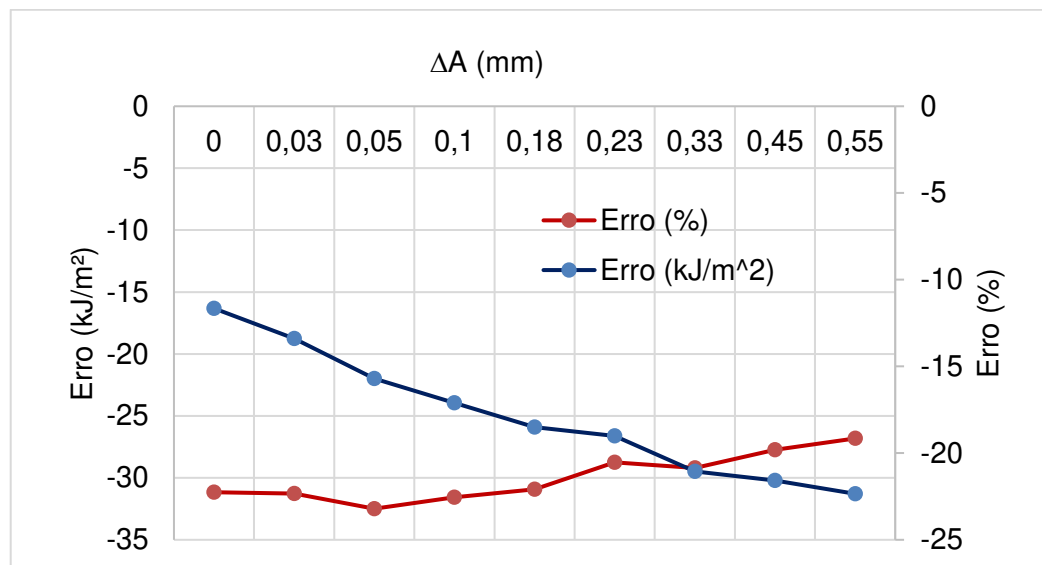


Figura 4.5 - Erro sistemático associado aos valores simulados de J após o refinamento da malha, para o aço AISI 4340-40 HRC.

Os valores simulados de J são mostrados na curva de J-integral, após o refinamento da malha, Fig. 4.6.

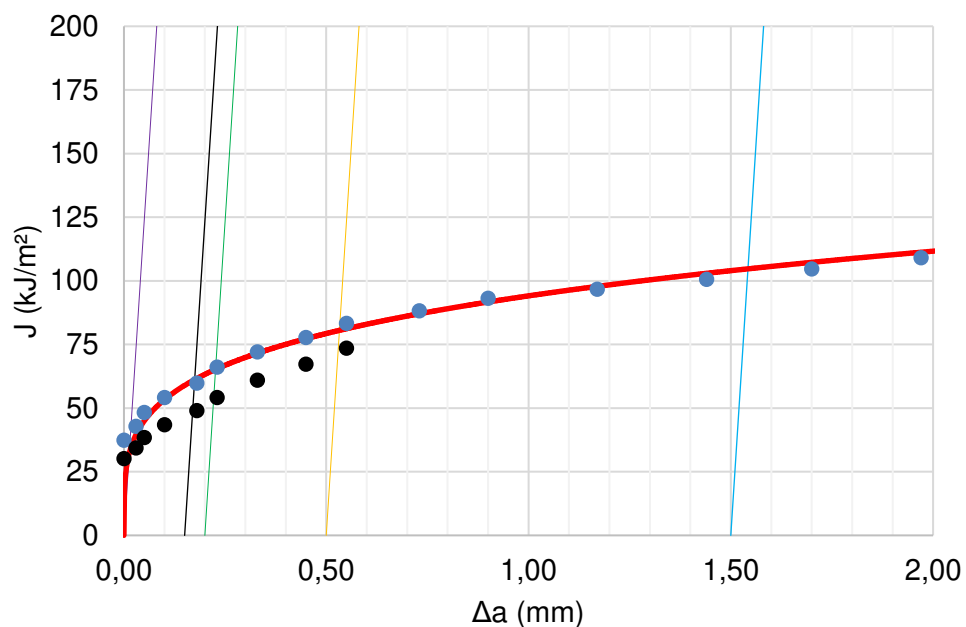


Figura 4.6 - Valores de J simulados após o refinamento da malha, indicando um erro sistemático negativo, porém menor.

O valor da tenacidade à fratura resultante da simulação após o refinamento $J_{IC}(R)$ foi de $52,9 \text{ kJ/m}^2$. O erro sistemático obtido foi de $-12,4 \text{ kJ/m}^2$, representando $-19,2 \%$ do valor

experimental. Este fato atribui uma exatidão ao valor de tenacidade à fratura obtido via simulação adequada para a aplicação pretendida. Isso ocorre porque, ao refinar a malha apenas na zona de processamento (região da trinca), é possível descrever com mais precisão as deformações que ocorrem nessa região. Como o parâmetro J representa o campo de tensões e deformações na frente da trinca, quanto mais refinada for a malha, melhor será a representação desse comportamento, resultando em uma maior precisão nos resultados. A Figura 4.7. mostra os valores de erro sistemático antes e após o refinamento da malha.

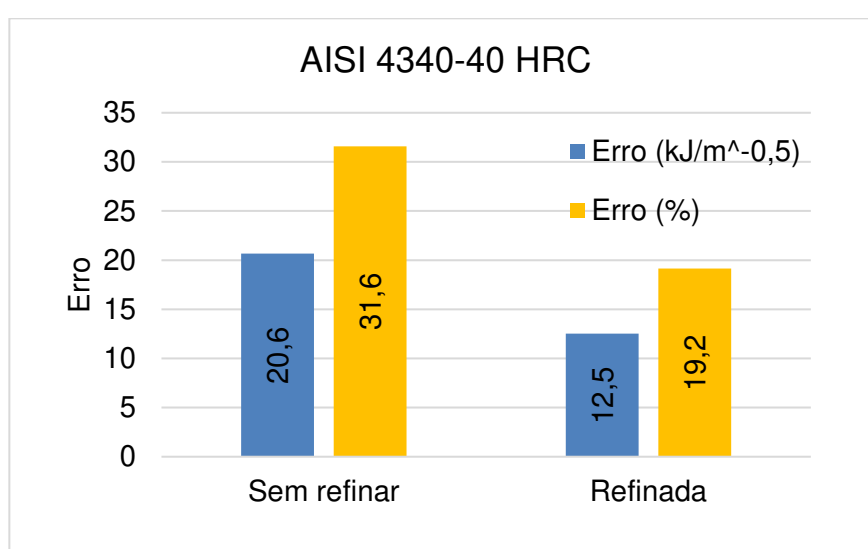


Figura 4.7 - Valores de erro sistemático (em módulo) associado à J_{IC} antes e após o refinamento da malha.

Na Figura 4.8, é apresentado o campo de tensões para o aço AISI 4340-40 HRC, evidenciando a concentração de tensões na região da ponta da trinca, característica típica observada em ensaios de tenacidade à fratura. A Figura 4.9 ilustra o comportamento do campo de deformações no CP, destacando a assimetria na distribuição causada pela geometria. Por fim, a Fig. 4.10 oferece uma visão detalhada da ponta da trinca, evidenciando a propagação do campo de tensões.

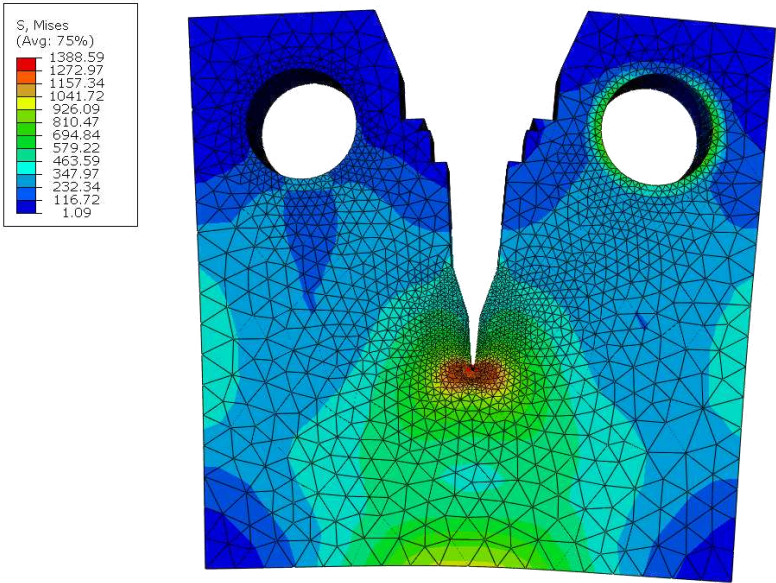


Figura 4.8 - Distribuição de tensões na simulação numérica do corpo de prova compacto C(T) fabricado em aço AISI 4340-40 HRC.

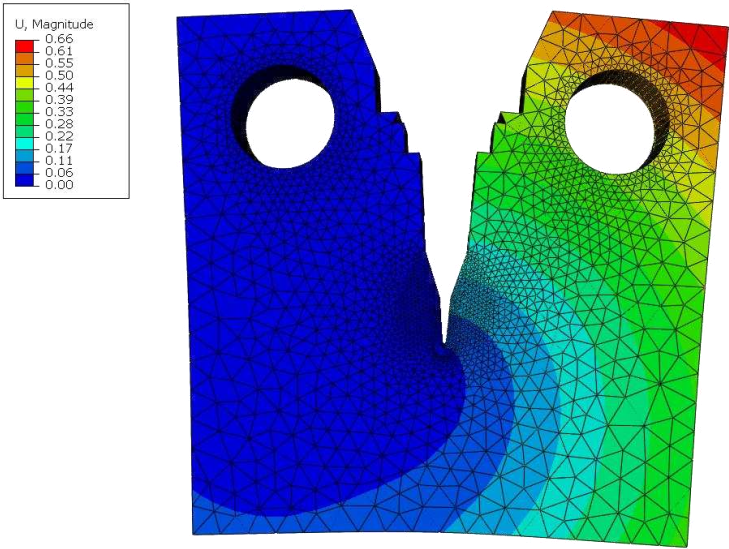


Figura 4.9 - Campo de deformação do corpo de prova C(T) fabricado em aço AISI 4340-40 HRC.

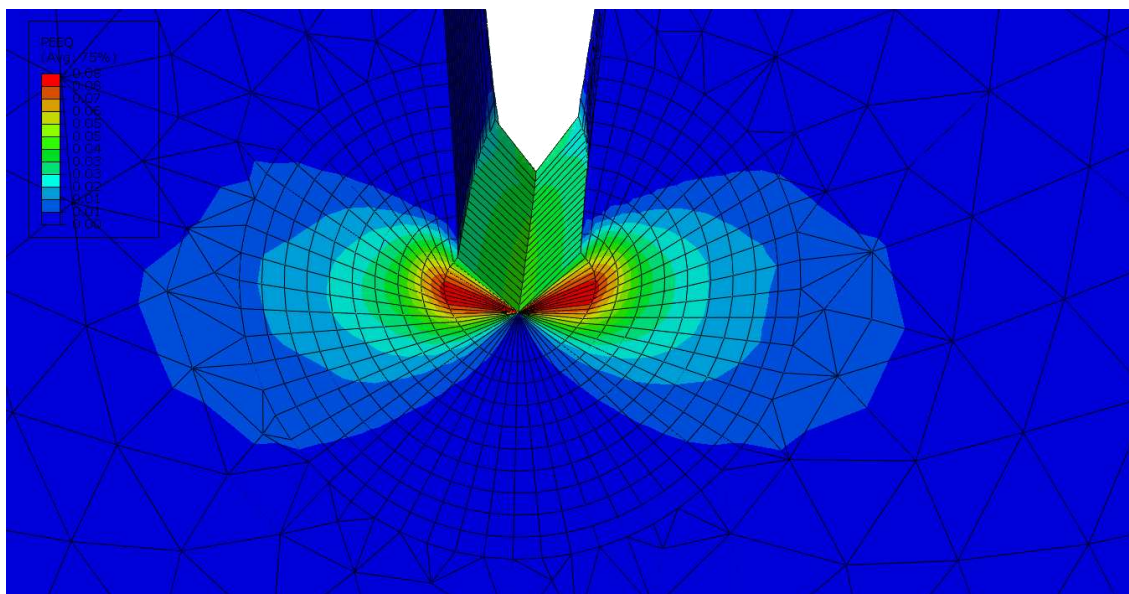


Figura 4.10 - Distribuição da deformação plástica na ponta da trinca do corpo de prova C(T) fabricado em aço AISI 4340-40 HRC.

A malha refinada foi então aplicada para determinar o valor de J_{IC} para o AISI 4340-28 HRC. O valor da tenacidade à fratura resultante da simulação $J_{IC}(R)$ foi de 119,90 kJ/m². O erro sistemático obtido foi de -12,33 kJ/m², representando -16,3 % do valor experimental. Este fato é indicativo da boa exatidão do valor de tenacidade à fratura obtido via simulação para este material.

A partir dos resultados obtidos se conclui que a simulação resultou em valores de J_{IC} menores que os experimentais para ambos os materiais avaliados.

4.4. Resultados da aplicação da simulação para obtenção da tenacidade à fratura em outros materiais

A aplicação da simulação numérica para a obtenção da tenacidade à fratura foi estendida a diferentes materiais, utilizando as mesmas metodologias validadas nos estudos com o aço AISI 4340. Para os materiais avaliados, os valores de J_{IC} obtidos via simulação foram discutidos utilizando dados experimentais disponíveis, destacando as particularidades de cada material em termos de comportamento mecânico e parâmetros microestruturais.

As Figuras 4.11 e 4.12 mostram as curvas J-R para os Aços A e B, respectivamente. Por sua vez, a Fig. 4.13 mostra os valores de J_{IC} obtidos via simulação para os quatro aços considerados neste estudo.

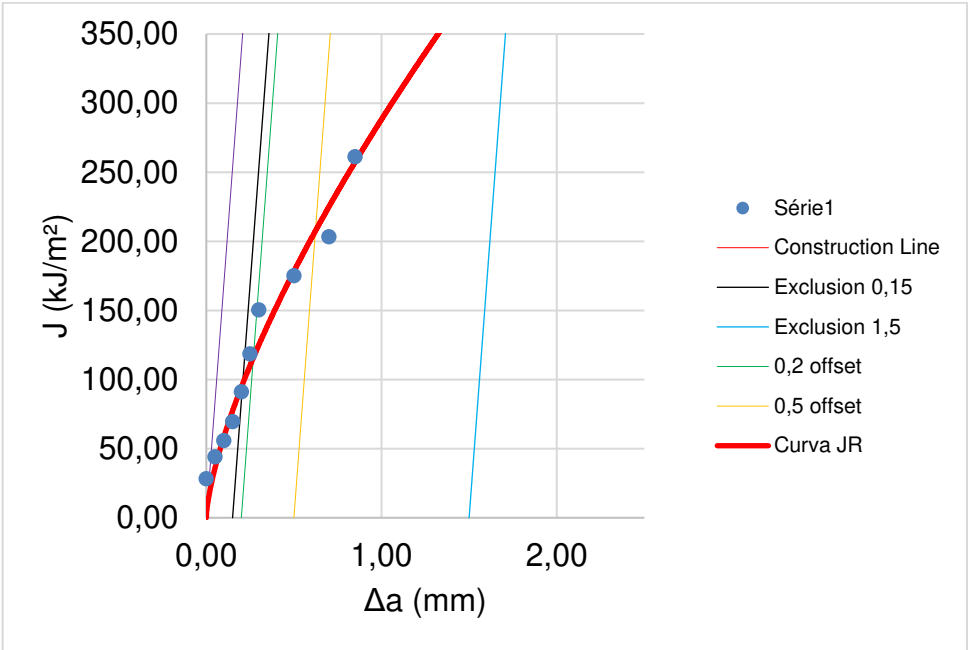


Figura 4.11 - Curva J-R do Aço A obtida via elementos finitos e a ASTM E1820 (ASTM, 2024).

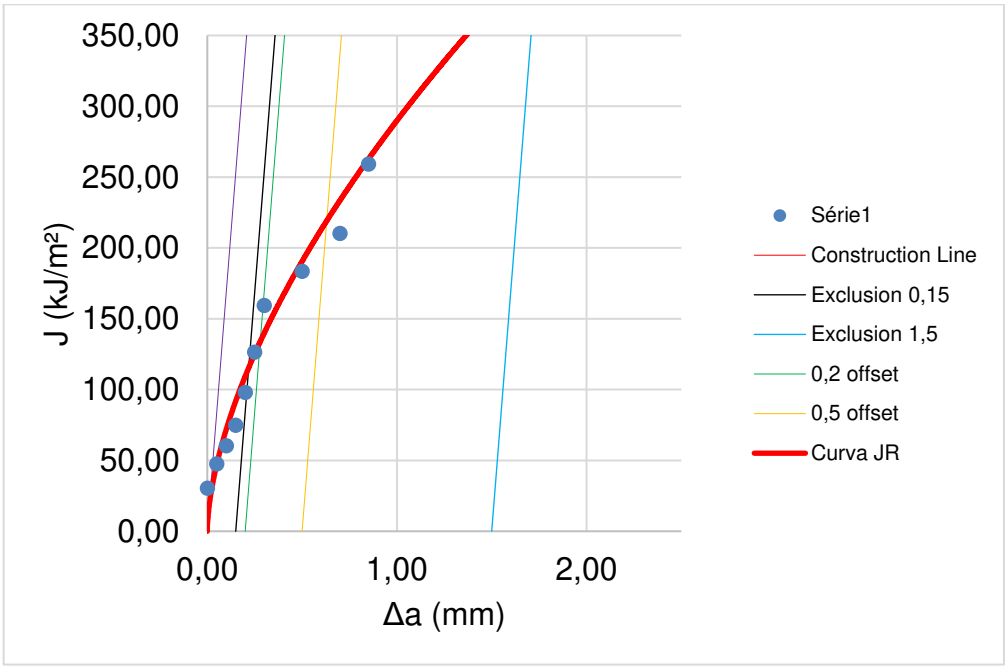


Figura 4.12 - Curva J-R do Aço B obtida via elementos finitos e a ASTM E1820 (ASTM, 2024).

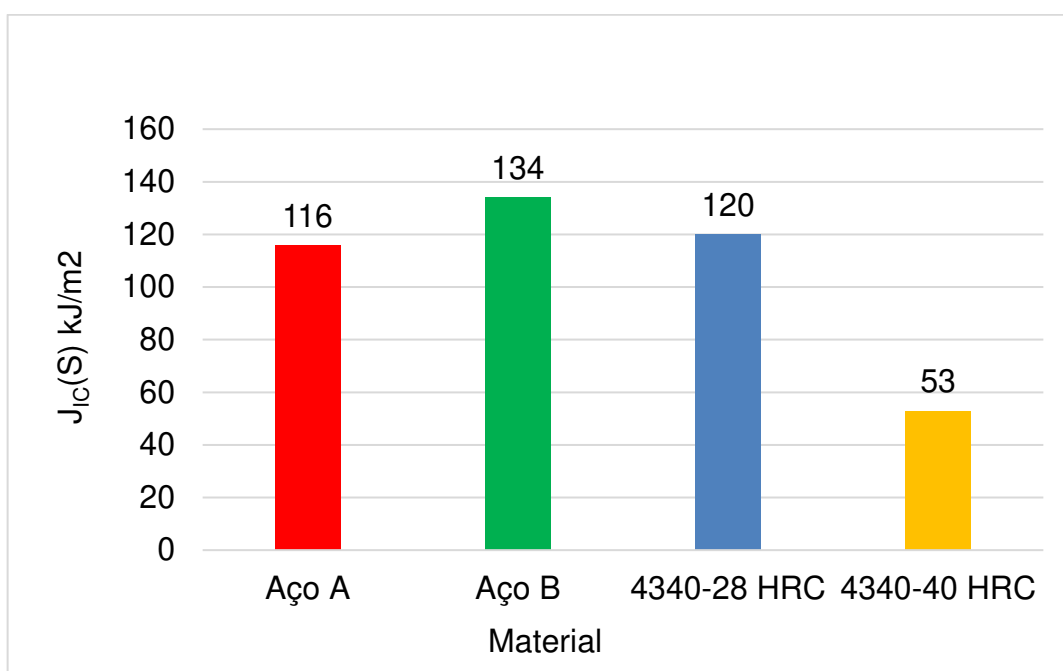


Figura 4.13 - Valores de tenacidade à fratura J_{IC} para o Aço A, Aço B, 4340-28 HRC e 4340-40 HRC. Valores obtidos via elementos finitos e a ASTM E1820 (ASTM, 2024).

A partir das Figuras 4.11 e 4.12 se conclui que as curvas J-R de ambos os aços são similares. A tenacidade à fratura J_{IC} do aço A é menor que a do Aço B. O teor de carbono do Aço B é maior e, portanto, era esperado, considerando somente este parâmetro, uma menor tenacidade para este aço. Entretanto, é necessário considerar outras propriedades mecânicas e parâmetros para poder justificar os valores de J_{IC} obtidos.

Vale ressaltar que as duas propriedades mecânicas destes dois aços são similares, como mostrado na Tab. 3.3. Os valores de limite de elasticidade podem ser considerados iguais para ambos os aços, assim como os limites de escoamento. A principal diferença observada é que o Aço B tem um limite de resistência maior de 888,821 MPa quando comparado com o Aço A, cujo limite de resistência é 820,097 MPa.

Em relação aos valores de microdureza, estes materiais são semelhantes. Vale destacar que de acordo com os mapas de dureza o Aço B apresenta maior homogeneidade com amplitude de 80 HV, enquanto o Aço A tem uma amplitude é de 154 HV. Essa maior homogeneidade do aço B pode estar associada à sua maior tenacidade à fratura.

Desta forma, os valores de J_{IC} obtidos podem ser considerados adequados. Estudos adicionais deverão ser conduzidos de forma melhorar a exatidão dos valores obtidos via simulação como apresentado nas propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Este trabalho analisou a tenacidade à fratura do aço AISI 4340 com durezas 28 HRC e 40 HRC, utilizando o método da Integral J, conforme a norma ASTM E1820 (ASTM, 2024), em ensaios experimentais e simulações numéricas realizadas pelo Método de Elementos Finitos (MEF). Adicionalmente, foram analisados outros dois materiais, denominados de aços A e B, destacando-se as influências de propriedades mecânicas e microestruturais na tenacidade à fratura. Para tanto, foi desenvolvida e documentada uma metodologia numérica no *software* Abaqus, permitindo a replicação e validação dos resultados experimentais. Os resultados simulados foram comparados com os dados experimentais e com a literatura, exibindo boa concordância e exatidão. A seguir, são apresentadas as principais conclusões deste trabalho:

- a) A técnica de elementos finitos mostrou ser eficaz na determinação da tenacidade à fratura, com valores simulados que apresentaram erros sistemáticos de -12,5 % para o aço 40 HRC e -12,33 % para o aço 28 HRC. Esses resultados denotam boa exatidão e confiabilidade da metodologia numérica desenvolvida.
- b) Os valores de J_{IC} dos Aços A e B são de 116 e 134 kJ/m², respectivamente. As propriedades mecânicas destes aços (limite de elasticidade e limite de escoamento) são similares, bem como a dureza. Eles são diferentes no teor de carbono e na microestrutura, justificando assim as diferenças observadas.
- c) A metodologia desenvolvida no *software* Abaqus permitiu a análise detalhada de materiais e possibilitou sua aplicação em cenários onde ensaios físicos normatizados seriam inviáveis devido às limitações de material ou geometria dos corpos de prova.

- d) A combinação de simulações numéricas com validação experimental mostrou ser economicamente vantajosa e eficiente, ampliando as possibilidades de caracterização de materiais em aplicações críticas.
- e) O estudo realizado reforça a importância de integrar técnicas computacionais e experimentais para aprimorar a caracterização de materiais, estabelecendo uma base para trabalhos futuros na área de mecânica da fratura.

CAPÍTULO VI

PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados e conclusões deste estudo, apresentam-se a seguir sugestões para trabalhos futuros:

- Aplicar a metodologia desenvolvida para determinar a tenacidade à fratura (J_{IC}) de outros aços e materiais além do AISI 4340.
- Determinar a tenacidade à fratura J_{IC} de outros materiais utilizados em arames de dutos flexíveis.
- Avaliar a incerteza dos valores de J_{IC} obtidos via simulação e compará-los com os valores experimentais, utilizando como referência a norma ASTM E1820 (ASTM, 2024).
- Implementar melhorias na malha de elementos finitos para minimizar erros e aumentar a exatidão dos valores simulados.
- Aplicar a metodologia proposta para simular os valores de J_{IC} em materiais cujos valores experimentais já foram determinados, com o objetivo de investigar as tendências observadas nas simulações, com o intuito de identificar padrões e propor um fator de correção que melhore a exatidão das análises numéricas.
- Fazer uma análise de sensibilidade considerando tanto os valores de comprimento de trinca adotados na simulação para determinar a tenacidade à fratura dos Aços A e B, quanto os valores de força.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAQUS. ABAQUS 6.14 Documentation. Dassault Systèmes. Providence. 2014.

AHMADI, S.; YAVARI, S.; WAUTHLE, R.; POURAN, B.; SCHROOTEN, J.; WEINANS, H.; ZADPOOR, A. Additively manufactured open-cell porous biomaterials made from six different space-filling unit cells: the mechanical and morphological properties. *Materials*, Basel, v. 8, n. 4, p. 1871-1896, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma8041871>. Acesso em: 29 ago. 2024.

AL-ANI, A. M.; HANCOCK, S. W. J-dominance of short cracks in tension and bending. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, v. 39, p. 23-43, 1991. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(91\)90029-N](https://doi.org/10.1016/0022-5096(91)90029-N)

ALMEIDA, L.F.M.; BOSE FILHO, W.W.; PEREIRA, L.R.; DE OLIVEIRA, S.A.G. Parte C - Desenvolvimento de metodologia para medição de tenacidade à fratura via indentação instrumentada. Relatório Técnico. Termo de cooperação: 5900.0110635.19.9. 2023. 88p.

ALVARENGA, R. F. Avaliação da fragilização por hidrogênio em aços ARBL utilizando ensaios trativos em corpos de prova entalhados. 2022. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022.

ANDERSON, T. L. *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*. 3. ed. New York: CRC Press, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/9781420058215>. Acesso em: 10 jun. 2024.

ANUNMANA, C.; ANUSAVICE, K. J.; MECHOLSKY, J. J. Interfacial toughness of bilayer dental ceramics based on a short-bar, chevron-notch test. *Dental Materials*, v. 26, n. 2, p. 111-

117, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.dental.2009.09.003>. Acesso em: 27 jun. 2024.

ARENCIBIA, et al. Avaliação da tenacidade ao impacto Charpy em arames de armadura de tração de dutos flexíveis. Relatório Técnico. Termo de Cooperação: 0050.0122683.22.9. 2023. 372 f.

ARENCIBIA, et al. Avaliação da tenacidade ao impacto Charpy em arames de armadura de tração de dutos flexíveis. Relatório Técnico. Termo de Cooperação: 0050.0122683.22.9. 2024. 810 f.

ARNOLD, D. N.; FALK, R. S.; WINTHER, R. Finite element exterior calculus, homological techniques, and applications. *Acta Numerica*, v. 15, p. 1-155, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/s0962492906210018>. Acesso em: 14 set. 2024.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM E140: Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, Scleroscope Hardness, and Leeb Hardness. West Conshohocken: ASTM International, 2019.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM E1820: Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness. West Conshohocken: ASTM International, 2024.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM E399: Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{Ic} of Metallic Materials. West Conshohocken: ASTM International, 2024.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM E8/E8M-13a: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. West Conshohocken: ASTM International, 2015.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM E8/E8M-22: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. West Conshohocken: ASTM International, 2022.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM E813: Standard Test Method for J-Integral Characterization of Fracture Toughness. West Conshohocken: ASTM International, 1981.

BAINES, M. J.; HUBBARD, M.; JIMACK, P. K.; MAHMOOD, R. A moving-mesh finite element method and its application to the numerical solution of phase-change problems.

Communications in Computational Physics, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.4208/cicp.2009.v6.595>. Acesso em: 14 set. 2024.

BASÍLIO, J. V. S. Avaliação do efeito da fragilização por hidrogênio na tenacidade à fratura do aço AISI 4340 calculada pelo método da integral J. 2022. 79 f. Projeto de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Aeronáutica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022.

BERTRAND, F.; MÜNZENMAIER, S.; STARKE, G. First-order system least squares on curved boundaries: lowest-order Raviart–Thomas elements. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, v. 52, n. 2, p. 880-894, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1137/13091720x>. Acesso em: 14 set. 2024.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021. 701 p. Inclui bibliografia e índice. ISBN 9788521637288.

FISCHER, F.; PREDAN, J.; MÜLLER, R.; KOLEDNIK, O. On problems with the determination of the fracture resistance for materials with spatial variations of the Young's modulus. *International Journal of Fracture*, v. 190, n. 1-2, p. 23-38, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10704-014-9972-2>. Acesso em: 29 dez. 2024.

GAO, R. S.; LI, Z. H.; LI, Y. N.; WEI, R.; WANG, F. C. Effect of Fe-rich phases on fracture toughness of high strength Al-Zn-Mg-Cu alloy. *Key Engineering Materials*, v. 921, p. 51-57, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.4028/p-3361rw>. Acesso em: 11 out. 2024.

GONZALEZ-PEREZ, I.; FUENTES-AZNAR, A. Implementation of a finite element model for stress analysis of gear drives based on multi-point constraints. *Mechanism and Machine Theory*, v. 117, p. 35-47, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2017.07.005>. Acesso em: 14 set. 2024.

GRIFFITH, A. A. The phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A*, v. 221, p. 163-197, 1920. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rsta.1921.0006>. Acesso em: 29 dez. 2024.

HAAG, J. Propagação de trincas por fadiga em arames de alta resistência mecânica. 2012. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

HENNING, P.; OHLBERGER, M.; SCHWEIZER, B. An adaptive multiscale finite element method. *Multiscale Modeling & Simulation*, v. 12, n. 3, p. 1078-1107, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1137/120886856>. Acesso em: 14 set. 2024.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 16573: Steel — Measurement method for the evaluation of hydrogen embrittlement resistance of high strength steels. Geneva: ISO, 2015.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 7500-1: Metallic materials — Calibration and verification of static uniaxial testing machines — Part 1: Tension/compression testing machines — Calibration and verification of the force-measuring system. Geneva: ISO, 2004.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 7539-9: Corrosion of metals and alloys — Stress corrosion testing — Part 9: Preparation and use of pre-cracked specimens for tests under constant load or constant displacement. Geneva: ISO, 2008.

IRWIN, G. R. Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate. *Journal of Applied Mechanics*, v. 24, p. 361-364, 1957. <https://doi.org/10.1115/1.4011547>

IRWIN, G. R. Plastic zone near a crack and fracture toughness. In: **SAGAMORE ORDNANCE MATERIALS CONFERENCE**, 7., 1960. Proceedings [...]. p. 463-478.

IRWIN, G. R.; KIES, J. A.; SMITH, H. L. Fracture strengths relative to onset and arrest of crack propagation. *Proceedings of the American Society for Testing Materials*, v. 58, p. 640-660, 1958.

JEON, J. Y.; KIM, Y.; LEE, M.; KIM, J. Fracture toughness prediction of aged CF8M using small punch test. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, v. 38, n. 12, p. 1456-1465, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/ffe.12315>. Acesso em: 29 nov. 2024.

KUMAR, N. P.; NAIR, A. S.; SREEDEVI, V. M. Study on fracture parameters of bacterial concrete. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, Índia, e-ISSN 2278-1684, p-ISSN 2320-334X, p. 6-12, 2020. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/341323938>. Acesso em: 18 nov. 2024.

KUMAR, V.; GERMAN, M. D.; SHIH, C. F. An engineering approach for elastic-plastic fracture analysis. EPRI Report # NP-1931. Palo Alto: Electric Power Research Institute, 1981. <https://doi.org/10.2172/6068291>

LI, L.; JIA, P.; JIAO, G. Interlaminar fracture toughness of composite laminate with splicing plies. *Advanced Materials Research*, v. 194-196, p. 1697-1702, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.194-196.1697>. Acesso em: 29 nov. 2024.

LOGG, A. Automating the finite element method. *Archives of Computational Methods in Engineering*, v. 14, n. 2, p. 93-138, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11831-007-9003-9>. Acesso em: 14 set. 2024.

LÓPEZ, J. M. M. Modelagem do trincamento de misturas asfálticas pelo método dos elementos discretos. 2010. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

McMEEKING, R. M.; PARKS, D. M. On criteria for J-dominance of crack-tip fields in large-scale yielding. In: **ELASTIC-PLASTIC FRACTURE**, ASTM STP 668. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials, 1979. p. 175-194. <https://doi.org/10.1520/STP35830S>

MEDINA, J. A. H.; DE CASTRO, J. T. P. Avaliação de previsões de fratura elastoplástica. 2014. 203 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

MELESHKO, V. A. Software complexes and new approaches to non-linear analysis of framed structures. *SHS Web of Conferences*, v. 44, 00061, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/shsconf/20184400061>. Acesso em: 23 ago. 2024.

MUSTAFA, H.; KANDIL, M.; NASSEF, T. M.; HUSSIEN, T. Fracture toughness of different adhesive/dentin interfaces analyzed by finite element stress analysis. *Egyptian Dental Journal*,

v. 67, n. 2, p. 1505-1515, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.21608/edj.2021.58301.1454>. Acesso em: 29 jul. 2024.

PARKS, D. M. Three-dimensional aspects of HRR-dominance. In: **EUROPEAN SYMPOSIUM ON ELASTIC-PLASTIC FRACTURE MECHANICS: DEFECT ASSESSMENT IN COMPONENTS—FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS**, Freiburg, Alemanha, 9–12 out. 1989. Proceedings [...]. p. 205-231.

PÉREZ-GALMÉS, M.; RENART, J.; SARRADO, C.; BRUNNER, A.; RODRÍGUEZ-BELLIDO, A. Towards a consensus on mode II adhesive fracture testing: experimental study. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, v. 98, p. 210-219, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2018.09.014>. Acesso em: 10 set. 2024.

RICE, J. A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks. *Journal of Applied Mechanics*, v. 35, n. 2, p. 379-386, 1968. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.3601206>. Acesso em: 07 out. 2024.

RICE, J. A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks. *Journal of Applied Mechanics*, v. 35, n. 2, p. 379-386, 1968. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.3601206>. Acesso em: 22 out. 2024.

RICE, J. R.; McMEEKING, R. M.; PARKS, D. M.; SORENSEN, E. P. Recent finite element studies in plasticity and fracture mechanics. *Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 17/18, p. 411-442, 1979. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(79\)90026-4](https://doi.org/10.1016/0045-7825(79)90026-4)

RIGONI, R. F. G.; ORTIZ, B. C. J.; RENCK, C. S. Mecânica da fratura em arames de tubulações flexíveis: tenacidade à fratura. Apresentação de slides. 2023. 23 f.

RODRIGUES, G. B. Avaliação da tenacidade à fratura: método Teste de Torção em Entalhe Helicoidal. 2020. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

SCI, G. Multigrid method for poroelasticity problem by finite element method. *Advances in Applied Mathematics and Mechanics*, v. 11, n. 6, p. 1339-1357, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.4208/aamm.oa-2019-0003>. Acesso em: 07 set. 2024.

SCOTT, M. H.; HAUKAAS, T. Software framework for parameter updating and finite-element response sensitivity analysis. *Journal of Computing in Civil Engineering*, v. 22, n. 5, p. 281-291, 2008. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0887-3801\(2008\)22:5\(281\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0887-3801(2008)22:5(281)). Acesso em: 14 set. 2024.

SHIH, C. F.; GERMAN, M. D. Requirements for a one parameter characterization of crack tip fields by the HRR singularity. *International Journal of Fracture*, v. 17, p. 27-43, 1981. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(79\)90026-4](https://doi.org/10.1016/0045-7825(79)90026-4)

SILVA, A. L. V. C.; MEI, P. R. *Aços e ligas especiais*. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

SILVA, J. A. Avaliação da incerteza associada à tenacidade à fratura obtida via integral J. 2023. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023.

TANKASALA, H.; LI, T.; DESHPANDE, V.; FLECK, N. An assessment of the J-integral test for a metallic foam. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, v. 141, 103958, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2020.103958>. Acesso em: 14 ago. 2024.

THIERCELIN, M.; JEFFREY, R.; NACEUR, K. The influence of fracture toughness on the geometry of hydraulic fractures. In: **SPE ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE AND EXHIBITION**, 62., 1987, Dallas. Proceedings [...]. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 1987. Disponível em: <https://doi.org/10.2118/16431-ms>. Acesso em: 20 jun. 2024.

TOYGAR, M. E.; TOPARLI, M.; UYULGAN, B. An investigation of fracture toughness of carbon/epoxy composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, v. 25, n. 18, p. 1887-1895, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0731684406069916>. Acesso em: 11 out. 2024.

WELLS, A. A. Application of fracture mechanics at and beyond general yielding. *British Welding Journal*, v. 10, p. 563-570, 1963.

WILLIAMS, M. L. On the stress distribution at the base of a stationary crack. *Journal of Applied Mechanics*, v. 24, p. 109-114, 1957. <https://doi.org/10.1115/1.4011454>

YI, S. Y. Convergence analysis of a new mixed finite element method for Biot's consolidation model. *Numerical Methods for Partial Differential Equations*, v. 30, n. 4, p. 1189-1210, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/num.21865>. Acesso em: 07 set. 2024.

ZHANG, P.; MA, L.; FAN, F.; ZENG, Z.; PENG, C.; LOYA, P. E.; LOY, J. Fracture toughness of graphene. *Nature Communications*, v. 5, n. 1, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/ncomms4782>. Acesso em: 15 out. 2024.

ZHANG, T.; WANG, S.; WANG, W. A unified energy release rate based model to determine the fracture toughness of ductile metals from unnotched specimens. *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 150, p. 35-50, 2019.

ZHU, X. K.; JOYCE, J. A. Review of fracture toughness (G, J, CTOD, CTOA) testing and standardization. *Engineering Fracture Mechanics*, v. 85, p. 1-42, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2012.02.001>. Acesso em: 15 dez. 2024.