

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Departamento de Metalurgia

AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE TENACIDADE À FRATURA

Matheus Lothar Schmidt

Trabalho de Diplomação

Orientador: Prof. Dr. Afonso Reguly
Co-orientador: Prof. Msc. Daniel Fabrício

Porto Alegre
2018

CIP - Catalogação na Publicação

Schmidt, Matheus Lothar
Avaliação de Técnicas de Medição de Tenacidade à
Fratura / Matheus Lothar Schmidt. -- 2018.
64 f.
Orientador: Afonso Reguly.

Coorientador: Daniel Antônio Kapper Fabrício.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola
de Engenharia, Curso de Engenharia Metalúrgica,
Porto Alegre, BR-RS, 2018.

1. Tenacidade à fratura. 2. CTOD. 3. Delta-5. I.
Reguly, Afonso, orient. II. Fabrício, Daniel Antônio
Kapper, coorient. III. Título.

Este trabalho é dedicado a minha família,
minha namorada Jéssica, aos meus amigos
e colegas de curso, monitoria e laboratório.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Laboratório de Metalurgia Física da UFRGS por fornecer os recursos e materiais necessários para a execução dos testes.

Agradeço aos integrantes atuais e antigos do Grupo de Ensaio Mecânicos do LAMEF pela troca de conhecimentos e dedicação, em especial ao futuro engenheiro Cleiton Mertz e ao Prof. MSc. Daniel Fabrício pela colaboração ativa na execução dos ensaios e análises de resultados.

Agradeço aos integrantes do Grupo de Corrosão do LAMEF, pela ajuda na elaboração da proposta de trabalho, auxílio com material e dedicação na resolução de dúvidas, em especial a Joseane Ortiz e Tiago Renck.

Agradeço ao Prof. Dr. Afonso Reguly e ao Prof. Dr. Francisco José Kiss pela orientação e conhecimento transmitido na realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	X
SIGLAS E ABREVIATURAS.....	XI
RESUMO	XII
ABSTRACT	XIII
1.0 INTRODUÇÃO	1
2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Aspectos Visuais de Fraturas	3
2.2 Modos de Falha	5
2.3 Histórico da Mecânica da Fratura	5
2.4 Obtenção de CTOD.....	7
2.4.1 Conceito de δ_5	10
2.4.2 Stretch Zone.....	12
2.5 Extensometria à laser	14
2.6 Análise estatística de dados.....	15
2.6.1 Análise de variância de um fator	16
2.6.2 Método de comparações múltiplas de Duncan	18
3.0 METODOLOGIA	20
3.1 Material Analisado	20
3.2 Caracterização Metalúrgica e Mecânica	20
3.2.1 Composição Química	20
3.2.2 Caracterização Microestrutural.....	21
3.2.4 Perfil de Dureza HV ₁₀	22

3.2.5	Perfil de dureza HV _{0,3}	22
3.2.6	Ensaio de Tração	23
3.3	Ensaio de CTOD.....	23
3.3.1	Obtenção de CTOD Convencional	26
3.3.2	Obtenção de CTOD pelo Método δ_5	27
	Extensometria à Laser	27
	Análise de Vídeo	27
3.3.3	Obtenção de CTOD pela Medição da <i>Stretch Zone</i>	28
3.4	Análise Estatística de Dados	30
4.0	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
4.1	Caracterização Metalúrgica e Mecânica	31
4.1.1	Composição Química	31
4.1.2	Caracterização Microestrutural.....	31
4.1.3	Análise de Inclusões	33
4.1.4	Perfil de Dureza HV ₁₀	34
4.1.5	Perfil de Dureza HV _{0,3}	34
4.1.6	Ensaio de Tração	35
4.2	Ensaio de CTOD.....	37
4.2.1	Obtenção de CTOD pelo Método Convencional.....	37
4.2.2	Obtenção de δ_5 por Extensometria à Laser.....	38
4.2.3	Obtenção de δ_5 por Análise de Vídeo.....	40
4.2.4	Obtenção de CTOD pela Medição da <i>Stretch Zone</i>	41
4.2.5	Análise Estatística dos Resultados de CTOD.....	42
	Teste de Duncan	43
5.0	CONCLUSÕES	46

6.0	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	47
7.0	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
	ANEXO A	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	(a) Visão macroscópica de fratura frágil em corpo de prova de tração; (b) Visão microscópica de fratura frágil.	3
Figura 2.2	(a) Visão macroscópica de fratura dúctil em corpo de prova de tração; (b) Visão microscópica de fratura dúctil.	4
Figura 2.3	Aumento da fragilidade, de (a) até (c), com a diminuição da temperatura de ensaio em corpos de prova de tração.	5
Figura 2.4	(a) Modo I de falha; (b) Modo II de falha; (c) Modo III de falha.	5
Figura 2.5	Conceito de abertura da ponta da trinca.	7
Figura 2.6	Curvas características de ensaios normalizados de CTOD, mostrando a diferença do surgimento <i>pop-in</i> nos gráficos.	8
Figura 2.7	Ilustração da posição de medição de δ_5 e a correspondente Curva-R obtida.	11
Figura 2.8	(a) Configuração da ponta da trinca antes do embotamento; (b) Depois do embotamento.	13
Figura 2.9	Configuração das medidas realizadas na <i>Stretch Zone</i>	14
Figura 3.1	(a) Camadas encontradas num <i>riser</i> flexível; (b) Amostra de material que foi analisado.	20
Figura 3.2	(a) Seção longitudinal do arame; (b) Seção transversal do arame.	21
Figura 3.3	Ilustração das indentações HV ₁₀ no corpo de prova.	22
Figura 3.4	Sentidos dos perfis de dureza obtidos na seção transversal.	22

Figura 3.5	(a) Modelo projetado em mm; (b) Corpos de prova utilizados.	24
Figura 3.6	(1) Célula de carga; (2) <i>Clip-gage</i> ; (3) Câmera digital; (4) Extensômetro à laser.....	25
Figura 3.7	Superfície de fratura.	26
Figura 3.8	Interface Tracker [®]	28
Figura 3.9	(a) Ângulo de inclinação de 0°; (b) Ângulo de inclinação de 45°.	29
Figura 4.1	Micrografias da seção longitudinal: (a) Região do núcleo; (b) Região da borda com descarbonetação.....	32
Figura 4.2	Micrografias da seção transversal: (a) Região do núcleo; (b) Região da borda com descarbonetação.....	33
Figura 4.3	Perfil de dureza HV _{0,3} no sentido horizontal.....	35
Figura 4.4	Perfil de dureza HV _{0,3} no sentido vertical.	35
Figura 4.5	Gráfico tensão x deformação de engenharia.....	36
Figura 4.6	Gráfico força x CMOD (amostra 4).	37
Figura 4.7	Gráfico força x deslocamento (amostra 4).	39
Figura 4.8	Gráfico luminância x distância (amostra 4).....	40
Figura 4.9	Imagem em MEV da superfície de fratura com delaminações.....	42
Figura 4.10	Agrupamento dos resultados dos testes de Duncan.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Exemplo de tabela obtida com os dados calculados na análise de variância.	18
Tabela 3.1	Parâmetros de pré-trincamento.....	25
Tabela 4.1	Composição química (% em massa), sendo o percentual restante em ferro.	31
Tabela 4.2	Resultados do perfil de dureza HV ₁₀	34
Tabela 4.3	Resultados dos ensaios de tração.....	36
Tabela 4.4	Resultados de CTOD obtidos por técnica convencional.	38
Tabela 4.5	Resultados obtidos por extensometria à laser.....	39
Tabela 4.6	Resultados obtidos por análise de vídeo.....	41
Tabela 4.7	Resultados obtidos através de MEV.....	41
Tabela 4.8	Resultados da análise de variância.	43
Tabela 4.9	Resultados dos testes de Duncan para agrupamento dos métodos.	44

SIGLAS E ABREVIATURAS

CTOD - *Crack Tip Opening Displacement*

SAE - *Society of Automotive Engineers* (EUA)

δ - *Crack Tip Opening Displacement*

MFEP - Mecânica da Fratura Elasto-Plástica

Curva-R - Curva de resistência ao crescimento de trinca

δ_5 - *Crack Tip Opening Displacement* para um *gauge length* de 5mm

a - Comprimento de trinca

MEV - Microscópio Eletrônico de Varredura

SZ - *Stretch Zone*

SZW - *Stretch Zone Width*

HV - Escala de dureza Vickers

K - Fator de intensidade de tensões

w - Largura da *Stretch Zone*

t - Largura da *Stretch Zone* para um ângulo relativo de medição de 45°

CMOD - *Crack Mouth Opening Displacement*

δ_u - CTOD medido no ponto de carga máxima da curva Força x CMOD

RESUMO

Análises de tenacidade à fratura proveem meios de auxiliar na economia e segurança em projetos que envolvam integridade estrutural. Um dos ensaios que abrangem esta perspectiva é o ensaio de CTOD, que envolve a medição da abertura da ponta da trinca durante uma propagação estática e é mais adequado para aplicações onde a plasticidade nessa região é considerável. O objetivo deste trabalho é determinar e comparar resultados de tenacidade à fratura, na forma do ensaio de CTOD, utilizando diferentes metodologias de análise, de forma a identificar a adequação de métodos inovadores a resultados obtidos por ensaios normalizados. Para tanto, foram estudadas metodologias que visam à obtenção de valores de CTOD por medições superficiais, durante a realização dos ensaios, assim como foram realizadas medições nas superfícies de fratura, sem a necessidade de aquisição de dados durante os ensaios. Os resultados, evidenciados por técnicas de análise estatística, comprovam a equivalência entre os valores obtidos por ensaios normalizados e os valores obtidos nas demais metodologias estudadas, permitindo assim, a utilização destes métodos em substituição aos ensaios normalizados, no caso particular do material de estudo.

ABSTRACT

Fracture toughness analyzes provide means of assisting in economics and safety on projects that involve structural integrity. One of the assays covering this perspective is the CTOD test, which implicates measuring the crack tip opening during a static propagation and it is best suited for applications where plasticity on that region is considerable. The aim of this work is to determine and compare fracture toughness results, by the form of the CTOD test, using different analyses methodologies, in order to identify the adequacy of innovative methods with results obtained by standardized tests. In order to do so, different methodologies were studied to obtain CTOD values by surface measurements during the tests, as well as measurements were made on the fracture surfaces, without the need to acquire data during the tests. The results, evidenced by statistical analysis techniques, indicates the equivalence between values obtained by standardized tests and those obtained through other methodologies analyzed, thus allowing the use of these methods instead of the standardized tests in the particular case of the analyzed material.

1.0 INTRODUÇÃO

Técnicas de medição de tenacidade à fratura são utilizadas para prever a vida remanescente de componentes estruturais, possuindo uma notável aplicação em áreas onde o prolongamento da utilização destes componentes em serviço gera uma economia considerável nos custos de manutenção e um aumento de segurança na operação de grandes estruturas em setores vitais da economia, como nas indústrias naval, aeronáutica, ferroviária e de óleo e gás. (DARCIS et al, 2008) (HEERENS; SCHÖDEL, 2003)

A aplicação de materiais com comportamento dúctil fornece uma maior versatilidade em aplicações que utilizam a mecânica da fratura como ferramenta de projeto, permitindo um prolongamento de serviço devido à deformação plástica localizada durante a fratura, que atua de forma a permitir uma maior absorção de energia antes de atingir o tamanho de defeito crítico, se comparada a materiais que apresentam comportamento frágil.

Metodologias para a determinação de tamanho de defeito crítico ou de iniciação são aplicadas em laboratório para fornecer dados confiáveis na elaboração de projetos de estruturas metálicas. A utilização de normas específicas para estas determinações permite a comparação de métodos de análise entre laboratórios, de forma aumentar a precisão dos resultados obtidos. Porém, ao se basear na simples aplicação da norma, podem-se encontrar resultados que não correspondem às características observadas no material em serviço.

Devido a essas dificuldades, vários autores sugerem a utilização de diferentes métodos para a obtenção de tenacidade à fratura, em materiais de comportamento dúctil, sem a necessidade de modelagem matemática e que não dependam da geometria do corpo de prova, podendo, inclusive, serem aplicados diretamente em estruturas metálicas contendo trincas.

A fim de determinar a plasticidade na ponta da trinca, para verificar a aplicabilidade de diferentes formas de obtenção de valores de CTOD, para uma amostra de arame utilizado na camada da armadura de tração em *risers*, além de comparar a atuação destas metodologias inovadoras para a determinação de tenacidade à fratura

frente aos resultados obtidos pela aplicação de procedimento fornecido pela norma ASTM E1820, se realizou o presente estudo (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2017).

2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

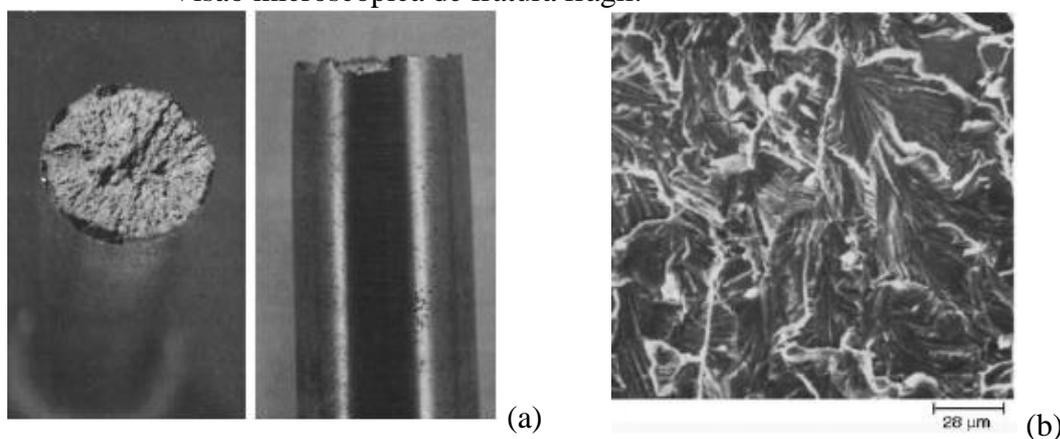
2.1 Aspectos Visuais de Fraturas

A falha pode ocorrer de forma frágil, dúctil ou de forma mista. O tipo de falha encontrada depende da capacidade do material de acomodar deformações plásticas, tendo como variáveis a temperatura, velocidade de carregamento, ambiente de análise, geometria do corpo e presença de defeitos no material (porosidades, partículas de segunda fase). Materiais que apresentam grande capacidade em tolerar deformações plásticas rompem de forma dúctil, enquanto materiais que não toleram, ou toleram pouca, deformação plástica rompem de forma frágil (LIU, 2005).

2.1.1 Fratura Frágil

Nas ocorrências de fratura frágil, ocorre a propagação de trinca em curto espaço de tempo, ocasionando uma falha catastrófica abrupta. A propagação é considerada instável, pois não ocorre a necessidade de um aumento da tensão aplicada para que ocorra a propagação da trinca, após a sua nucleação. Geralmente associada a um estado triaxial de tensões, tendo este corpo espessuras uniformes nas três dimensões. O aspecto da fratura costuma ser cristalino, macroscopicamente, e apresenta clivagem ou trincas intergranulares, microscopicamente, como mostra a Figura 2.1 (BROEK, 1988).

Figura 2.1 (a) Visão macroscópica de fratura frágil em corpo de prova de tração; (b) Visão microscópica de fratura frágil.

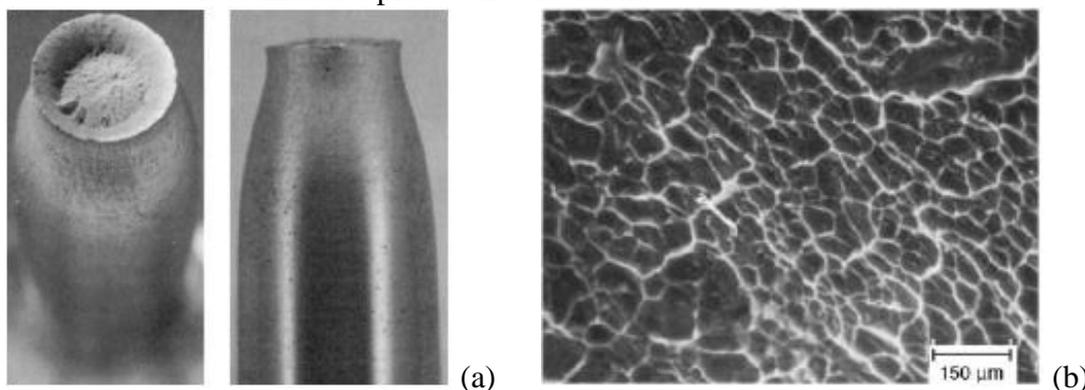


Fonte: (LIU, 2005).

2.1.2 Fratura Dúctil

A propagação de trinca ocorre de maneira lenta e gradual, mesmo após a nucleação, em situações onde a fratura dúctil é encontrada, possuindo, inclusive, uma região inicial de propagação estável. O estado plano de tensões costuma ser utilizado na avaliação de estruturas onde uma das dimensões é relativamente menor, frente às demais, simplificando os cálculos estruturais efetuados no dimensionamento estrutural. O aspecto macroscópico da fratura apresenta um visual fosco e fibroso na parte central da superfície, grande redução de área na superfície de fratura, e microscopicamente apresenta a formação de microcavidades no centro e formação de *shear lips* nas laterais, como ilustra a Figura 2.2 (BROEK, 1988).

Figura 2.2 (a) Visão macroscópica de fratura dúctil em corpo de prova de tração; (b) Visão microscópica de fratura dúctil.

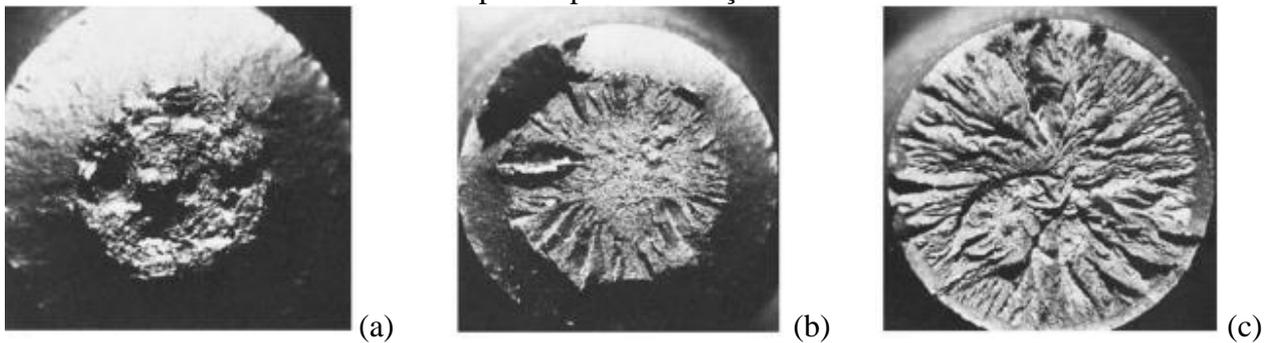


Fonte: (LIU, 2005).

2.1.3 Fratura Mista

Apresenta aspecto dúctil nas superfícies e aspecto frágil internamente, devido ao efeito de espessura, onde próximos às bordas do material predomina um estado plano de tensões, caracterizado por uma fratura dúctil, e no centro do material predomina um estado triaxial de tensões, caracterizado por uma fratura frágil, como mostra a Figura 2.3.

Figura 2.3 Aumento da fragilidade, de (a) até (c), com a diminuição da temperatura de ensaio em corpos de prova de tração.

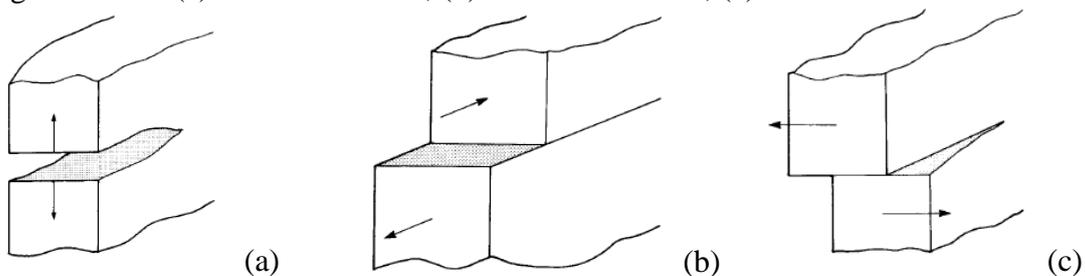


Fonte: (LIU, 2005).

2.2 Modos de Falha

Os movimentos relativos entre superfícies de trincas são comumente divididos em três modos de falha, como mostra a Figura 2.4: Modo I: modo de abertura ou trativo (superfícies da trinca se distanciam perpendicularmente em sentidos opostos), Modo II: modo de deslizamento ou cisalhamento (superfícies da trinca se distanciam paralelamente num mesmo plano, mas em sentidos opostos), Modo III: modo de rasgamento ou cisalhamento por torção (superfícies da trinca se distanciam em planos diferentes e sentidos opostos) (SMITH, 1991).

Figura 2.4 (a) Modo I de falha; (b) Modo II de falha; (c) Modo III de falha.



Fonte: (SMITH, 1991).

2.3 Histórico da Mecânica da Fratura

A necessidade de avaliar o efeito que a presença de defeitos, ou imperfeições, causa sobre a integridade estrutural de componentes mecânicos, levou ao desenvolvimento de metodologias de estudo aplicadas na medição e equacionalização

dos fenômenos que ocorrem durante a fratura de materiais aplicados na engenharia (CHIODO, 2009).

A principal forma de falha catastrófica observada em estruturas dificilmente está relacionada com um sobrecarregamento inesperado. Defeitos de projeto, de execução ou mesmo as próprias características do material empregado geram concentradores de tensão, que atuam como nucleadores de trincas. A nucleação de trincas e o seu lento crescimento subsequente atuam como os principais fatores no aparecimento de falhas catastróficas, mesmo quando a estrutura esteja submetida a esforços para os quais foi projetada (BROEK, 1988).

A presença de defeitos geométricos, e o seu efeito estrutural, apesar de historicamente conhecidos, foram analisados matematicamente por Inglis em 1913, ao propor modelos teóricos que consideravam a presença de defeitos elípticos para o cálculo da tensão aplicada na ponta de um defeito, localizado no centro de uma peça submetida a um carregamento estático (SHUKLA, 2011) (ANDERSON, 2004).

Posteriormente, Griffith propôs que a falha catastrófica ocorresse quando a energia de deformação, liberada pelo crescimento de uma trinca, ultrapassasse o valor da energia superficial do material. Esta relação, baseada no balanço energético, corresponde fielmente a resultados encontrados na prática, para materiais que apresentam um comportamento frágil, porém, ao ser replicada para materiais que apresentam um comportamento dúctil, a solução encontrada por Griffith apresenta disparidades (ANDERSON, 2004).

Irwin e Orowan, em seguida, apresentaram estudos independentes nos quais propunham uma modificação na teoria de Griffith, tornando-a aplicável a materiais que apresentam deformação plástica considerável (Shukla, 2011). Estes estudos foram baseados em que os fatores responsáveis pela resistência ao crescimento da trinca fossem os efeitos combinados da energia elástica superficial e a deformação plástica localizada.

Usando como critério, para que houvesse um mínimo avanço da trinca, a taxa de liberação de energia para que ocorresse a deformação deveria ser maior do que um trabalho crítico, caracterizado como a energia necessária para que ocorra a extensão unitária da trinca (ANDERSON, 2004).

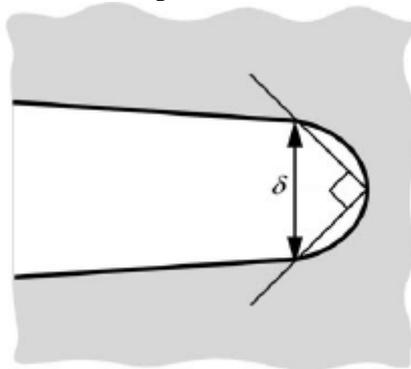
2.4 Obtenção de CTOD

A detecção de falhas, realizadas através de técnicas de inspeção não destrutivas, utiliza como o principal parâmetro de operação o tamanho de falha crítico, assumindo que defeitos que estejam abaixo ainda garantem um regime estável de trabalho. Estas técnicas de inspeção garantem a ausência de defeitos que ultrapassem o valor crítico, ainda pelo fator da segurança, comprimentos de trinca iniciais detectados pelos métodos de inspeção já ocupam valores superiores ao tamanho de defeito crítico do material de análise, garantindo que o material permaneça em serviço pelo maior tempo possível. A fim de determinar este tamanho de defeito crítico, se realizam os ensaios de mecânica da fratura (SMITH, 1991).

As medições de parâmetros de tenacidade à fratura são realizadas, de acordo com técnicas abrangidas pela MFEP, com uma abordagem destacada pela elaboração de curvas que relacionam o tamanho de trinca e um correspondente parâmetro de tenacidade necessária para que ocorra o crescimento da trinca, caracterizando uma curva de resistência ao crescimento de trinca (Curva-R). Os parâmetros de tenacidade geralmente utilizados são o CTOD ou a Integral-J. (GUBELJAK et al, 2011).

O CTOD pode ser descrito como um deslocamento característico ocorrido na ponta da trinca, que descreve as condições da zona plástica à frente da ponta da trinca no momento em que a fratura ocorre, tornando possível a descrição de algumas regiões em particular, como a iniciação do crescimento da trinca frente a um concentrador de tensões, seu crescimento estável e o seu posterior crescimento instável. A Figura 2.5 ilustra o conceito de CTOD (ERNST, 1985).

Figura 2.5 Conceito de abertura da ponta da trinca.

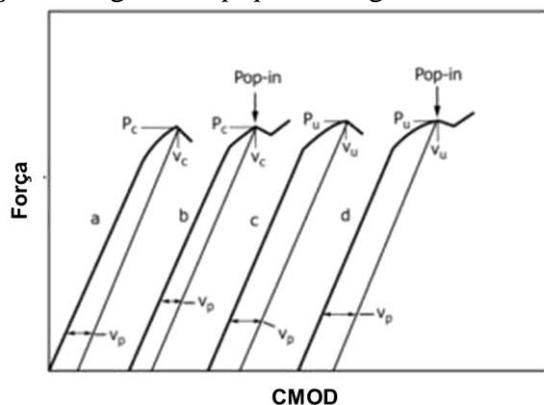


Fonte: (ANDERSON, 2004).

Algumas normas estipulam a obtenção direta de valores de CTOD a partir de procedimentos específicos (BS 7448), enquanto outras sugerem a obtenção da Integral-J e uma posterior conversão dos valores para que seja possível a caracterização do CTOD do material analisado, através da multiplicação de constantes relacionadas com o material de estudo (ASTM E-1820) (NIKISHKOV; HEERENS; SCHWALBE, 1999) (BRITISH STANDARD INSTITUTION, 1991) (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2017).

A Figura 2.6 mostra os tipos de curvas encontrados através dos ensaios de CTOD a partir de ensaios normalizados com e sem a presença de descontinuidades nos gráficos (*pop-in*). *Pop-in* é característica de uma súbita alteração no comportamento da curva, onde geralmente ocorre um decréscimo de força e um aumento da abertura da boca do entalhe (CMOD) instantânea (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2017).

Figura 2.6 Curvas características de ensaios normalizados de CTOD, mostrando a diferença do surgimento *pop-in* nos gráficos.



Fonte: Adaptado de (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2017).

A norma ASTM E1820 fornece a conversão de valores de Integral-J como meio para obtenção de CTOD. As Equações 1-10 evidenciam a forma de obtenção de CTOD através dos cálculos fornecidos pela norma (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2017).

$$J = J_{el} + J_{pl} \quad (1)$$

Onde:

J - Integral-J

J_{el} - Integral-J para o regime elástico

J_{pl} - Integral-J para o regime plástico

$$J = \frac{K^2 \cdot (1 - \nu^2)}{E} + \frac{\eta_{pl} \cdot A_{pl}}{B_N \cdot b_0} \quad (2)$$

Onde:

K - Fator de intensidade de tensões na ponta da trinca

ν - Coeficiente de Poisson

E - Módulo de elasticidade

$\eta_{pl} = 3,669 - 2,199 \cdot (a_0/W) + 0,437 \cdot (a_0/W)^2$ usando dados de cálculo de CMOD para A_{pl}

A_{pl} = Área abaixo da curva força x CMOD

B_N = Espessura central do corpo de prova ($B_N = B$ quando não há redução de espessura)

$b_0 = W - a_0$

$$K_{(i)} = \left[\frac{P_i \cdot S}{(B \cdot B_N)^{1/2} \cdot W^{3/2}} \right] f(a_i/W) \quad (3)$$

Onde:

P_i - Força aplicada

S - Distância entre os centros dos roletes inferiores

B - Espessura do corpo de prova

W - Largura do corpo de prova

$f(a_i/W)$ - Ver Equação 4

$$f\left(\frac{a_i}{W}\right) = \frac{3 \cdot \left(\frac{a_i}{W}\right)^{1/2} \left[1,99 - \left(\frac{a_i}{W}\right) \cdot \left(1 - \frac{a_i}{W}\right) \cdot \left(2,15 - 3,93 \cdot \left(\frac{a_i}{W}\right) + 2,7 \cdot \left(\frac{a_i}{W}\right)^2 \right) \right]}{2 \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{a_i}{W}\right) \cdot \left(1 - \frac{a_i}{W}\right)^{3/2}} \quad (4)$$

Onde:

a_i - Comprimento da trinca

$$\delta = \frac{J}{m \cdot \sigma_Y} \quad (5)$$

Onde:

δ - CTOD

σ_Y - Tensão de escoamento a tração

m - Ver Equação 6

$$m = A_0 - A_1 \cdot \left(\frac{\sigma_Y}{\sigma_{TS}}\right) + A_2 \cdot \left(\frac{\sigma_Y}{\sigma_{TS}}\right)^2 - A_3 \cdot \left(\frac{\sigma_Y}{\sigma_{TS}}\right)^3 \quad (6)$$

Onde:

σ_{TS} - Tensão de resistência à tração

A_0 - Ver Equação 7

A_1 - Ver Equação 8

A_2 - Ver Equação 9

A_3 - Ver Equação 10

$$A_0 = 3,18 - 0,22 \cdot \left(\frac{a_i}{w}\right) \quad (7)$$

$$A_1 = 4,32 - 2,23 \cdot \left(\frac{a_i}{w}\right) \quad (8)$$

$$A_2 = 4,44 - 2,29 \cdot \left(\frac{a_i}{w}\right) \quad (9)$$

$$A_3 = 2,05 - 1,06 \cdot \left(\frac{a_i}{w}\right) \quad (10)$$

A obtenção de CTOD se tornou um dos principais parâmetros utilizados na elaboração de diagramas de avaliação de integridade estrutural, juntamente com outros parâmetros de determinação de tenacidade à fratura. A utilização destes diagramas em componentes estruturais visa garantir um maior tempo de vida útil de componentes em serviço, assegurando economia de material e manutenção, através de vias de operação seguras (ZERBST; AINSWORTH; SCHWALBE, 2000).

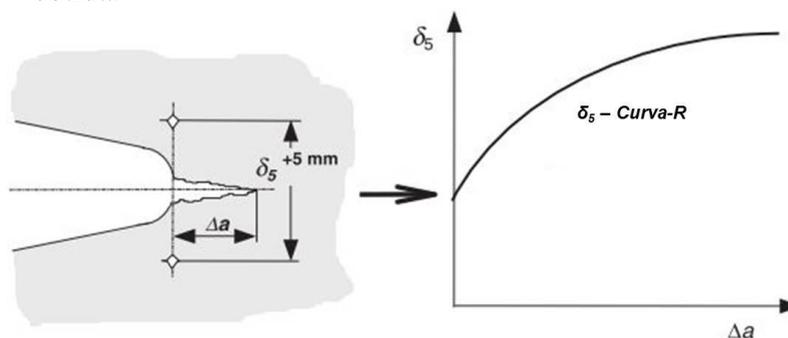
2.4.1 Conceito de δ_5

O método de obtenção de δ_5 , desenvolvido por Schwalbe, é uma técnica experimental para obtenção de medidas de CTOD, desenvolvida como uma forma de

substituição a Integral-J e ao método de obtenção de CTOD convencional, onde para altas taxas de crescimento de trinca, se tornam dependentes da geometria do corpo de prova utilizado (ERNST, 1985).

Neste método, os valores de CTOD são obtidos através de medições laterais realizadas no corpo de prova, partindo de dois pontos distintos perpendicularmente de 2,5mm da ponta da pré-trinca de fadiga. São realizadas identificações em uma das superfícies laterais do corpo de prova, com o uso de um microdurômetro, para indicar a posição de fixação do *clip-gage* ao início do ensaio, como ilustra a Figura 2.7 (SCHWALBE, 1995).

Figura 2.7 Ilustração da posição de medição de δ_5 e a correspondente Curva-R obtida.



Fonte: Adaptado de (GUBELJAK, 2011)

As vantagens da utilização desta forma de medição implicam que as medidas são realizadas diretamente na ponta da trinca, sem a necessidade da realização de cálculos posteriores ou modelagem matemática para aplicação prática. Além disto, o método permite a aplicação para qualquer geometria de corpo de prova ou estrutura que contenha uma trinca. Podem-se obter, através do método, Curvas-R, assim como valores de tenacidade referentes às etapas de iniciação e crítica do crescimento da trinca (CASTRODEZA; IPINA; BASTIAN, 2004).

Schwalbe comparou o efeito de geometria entre corpos de prova normalizados, relacionando-os com determinações práticas de CTOD e Integral-J, onde obteve uma melhor correlação prática de valores de CTOD com o crescimento de trinca correspondente. Através destes resultados, foi possível qualificar a medida superficial como um parâmetro mais adequado a medidas de CTOD, para comportamentos elasto-plásticos (HELMAN; SCHWALBE, 1984).

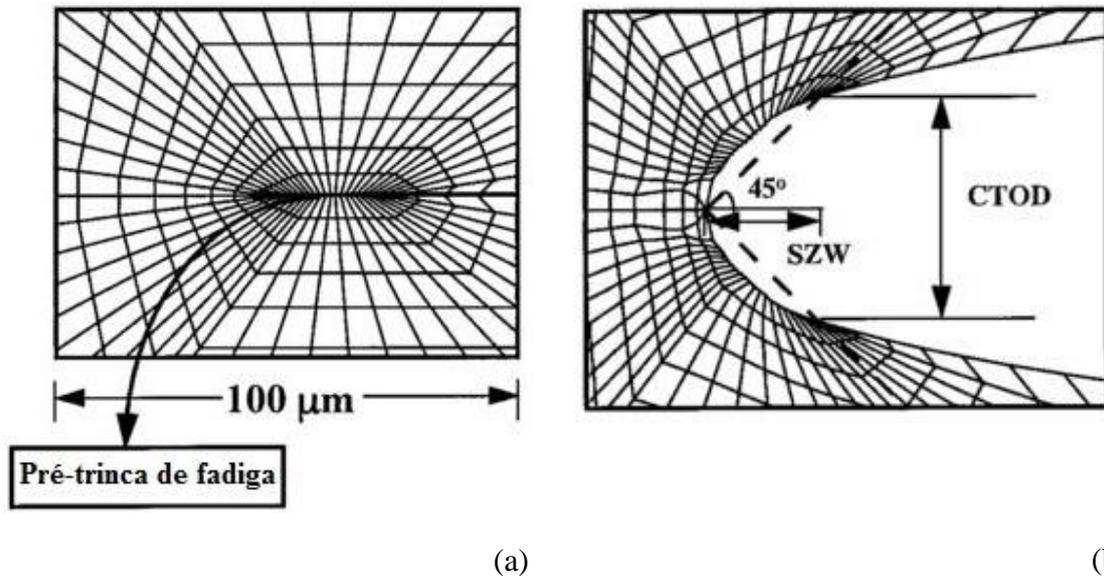
Paralelamente, esta técnica possui uma alta correlação com resultados obtidos através de ensaios normalizados, para materiais que apresentam um comportamento homogêneo, isto é, materiais que possuem mesma disposição de fases e propriedades mecânicas nas três dimensões. Além disto, estudos mostram boas correlações entre métodos convencionais e o método desenvolvido por Schwalbe para diferentes geometrias de corpos de prova, propagação de trincas por fluência, ou ainda, com aplicações em materiais compósitos (GUBELJAK et al., 2006) (HELMAN; SCHWALBE, 1984) (CASTRODEZA, 2002) (ZHONGHUA; BROCKS; SCHWALBE, 1997).

2.4.2 Stretch Zone

Alternativamente aos métodos de obtenção de valores de tenacidade fornecidos pelas normas ASTM, sobretudo quando o material em análise possui elevada plasticidade e baixa correlação com resultados encontrados na prática, foram propostos métodos de avaliação nos quais a medida da faixa de embotamento plástico (*blunting line*) é utilizada para determinar o comprimento de defeito crítico do material, possuindo a vantagem de não depender de fatores geométricos, apenas do modo de carregamento (SIVAPRASAD et al, 2001).

A iniciação da falha em materiais dúcteis é caracterizada pela presença de uma zona na qual se pode observar o estiramento de microcavidades na superfície de fratura, este efeito ocorre devido ao processo de embotamento da ponta da trinca, onde, a partir de uma trinca já existente (pré-trinca), o material é submetido a uma deformação crítica, ocasionando a formação de pequenos vazios acima da ponta da trinca, que ao coalescerem causam a abertura da trinca, como pode ser visto na Figura 2.8 (SURESH et al, 1999) (SAXENA; RAMAKRISHNAN; DUTTA, 2009).

Figura 2.8 (a) Configuração da ponta da trinca antes do embotamento; (b) Depois do embotamento.



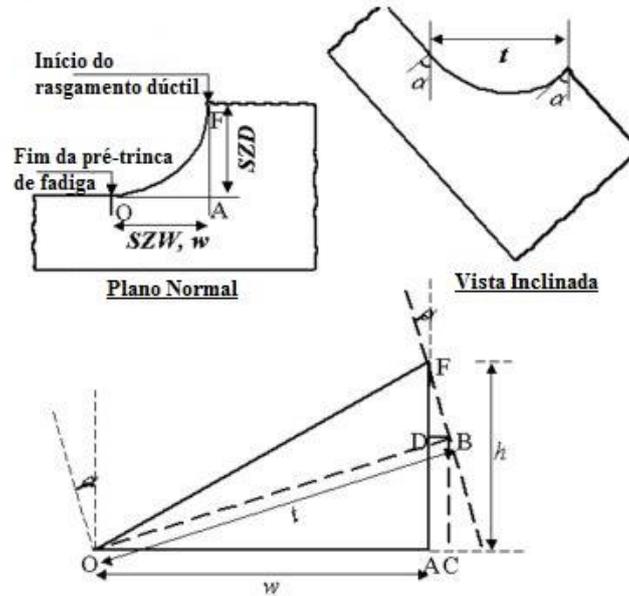
Fonte: Adaptado de (SURESH et al, 1999).

A faixa gerada pelo embotamento da ponta da trinca é denominada de *Stretch Zone* (SZ), podendo ser observada e medida através da utilização de microscópio eletrônico de varredura (MEV).

As duas superfícies do material devem ser medidas, para que ocorra a obtenção de valores mais confiáveis para medidas da SZ, sendo o resultado a média dos valores encontrados. Este fator se justifica pela formação de microtrincas geradas por zonas de deformação ao cisalhamento imposto ao material, criando um aspecto de *zig-zag* na lateral da superfície de fratura. Apesar de seu formato não ser dependente de características microestruturais, a microestrutura afeta o desenvolvimento das bandas de cisalhamento, possuindo um efeito direto sobre a deformação local crítica a qual a trinca será submetida antes do embotamento (HOELZER; ALI; EBRAHIMI, 1986).

A Figura 2.9 ilustra as regiões encontradas na SZ, de forma a possibilitar o cálculo de CTOD através deste método, de acordo com a Equação 11.

Figura 2.9 Configuração das medidas realizadas na *Stretch Zone*.



Fonte: Adaptado de (SIVAPRASAD et al, 2001).

$$\delta = 2.(t.\sqrt{2} - w) \quad (11)$$

Estudos realizados mostram que valores de CTOD obtidos através de medições SZ são inferiores aos métodos convencionais e de Schwalbe, mostrando que os métodos remotos de análise de CTOD não correspondem fielmente aos eventos ocorridos na ponta da trinca, isto é, apesar de fornecerem boas respostas e um ser um importante método de análise para aplicações práticas em análises de integridade estrutural, não determinam o deslocamento real ocorrido na ponta da trinca (SCHWALBE et al, 1985).

Apesar de fornecer os valores do deslocamento real ocorrido na ponta da trinca, o método de medição da SZ tem a desvantagem de ser medido apenas após o término dos ensaios, não podendo ser relacionado com o carregamento aplicado, apesar de ser uma função da velocidade de ensaio, além de fornecer apenas a medida do CTOD crítico e não apresentar claras evidências de instabilidades durante os ensaios, como o aparecimento de *pop-in* (ERNST, 1985).

2.5 Extensometria à laser

A interferometria à laser se baseia no uso de um feixe luz monocromática, com comprimento de onda conhecido, sobre uma superfície. Esta superfície reflete a luz, enviando-a diretamente aos detectores instalados no sistema de medição. A curva

obtida, pelo padrão de interferência encontrado, permite o cálculo do deslocamento ocorrido na superfície do objeto de análise, conforme apresenta a Equação 12 (ZHANG; PAN; CROSS, 2004).

$$I = \frac{1}{2} \cdot (I_{\text{máx}} + I_{\text{mín}}) + \frac{1}{2} \cdot (I_{\text{máx}} - I_{\text{mín}}) \cdot \cos\left(\frac{4\pi\Delta d}{\lambda}\right) \quad (12)$$

Onde:

I - Intensidade obtida pela leitura do detector

$I_{\text{máx}}$ - Intensidade máxima do feixe refletido

$I_{\text{mín}}$ - Intensidade mínima do feixe refletido

Δd - Deslocamento medido na superfície de análise

λ - Comprimento de onda do feixe utilizado

O uso de medições óticas tem as vantagens de não entrar em contato direto com o objeto de análise, evitando erros associados ao contato, como em aplicações onde a medição é efetuada em temperaturas diferentes da ambiente, onde gradientes de temperatura entre corpo de prova e instrumento de medição podem causar erros associados à dilatação térmica. Além disso, a interferometria tem a propriedade de realizar medidas em diversas regiões simultaneamente ou produzir diferentes comprimentos de trabalho para situações diversas, possuindo múltiplas funções se comparada a *clip-gages* fabricados por extensometria (ZAGAR, 1994).

Estudos demonstram a evolução da técnica, de forma que a técnica abrange medições que chegam a nanômetros de resolução, além de permitir a medição em superfícies irregulares e anguladas com a associação de feixes (TENDELA; GALIZZI, 1970) (OHTSUKA; ITOH, 1979) (BOBROFF, 1993).

A principal dificuldade na operação da interferometria está no seu uso em diferentes ambientes, onde ocorre a refração da luz. Existem métodos de cálculo para a compensação da refração, mas exigem o conhecimento exato dos índices de refração a serem considerados (BOBROFF, 1993) (KUTZ et al, 2016).

2.6 Análise estatística de dados

A análise estatística é uma ferramenta de fundamental importância na área da pesquisa, fornecendo estimativas de erros experimentais, permitindo analisar a significância dos resultados obtidos e comparações amostrais. Esta análise é justificada

pela presença de fatores não controlados durante experimentos, denominados de variação aleatória, sendo diferenças não significativas aceitas como fator de acaso (CAIERÃO, 2005) (CANTERI et al, 2001).

2.6.1 Análise de variância de um fator

A análise de variância, desenvolvida por Fisher, permite comparar médias de diversas populações ao mesmo tempo, representadas por variáveis quantitativas. Este teste torna possível apenas a verificação se as médias, as quais se deseja comparar, são estatisticamente iguais, ou seja, escolhendo-se um nível de confiabilidade (α) se testa a hipótese de todas as médias serem iguais, caso contrário, testes adicionais de múltiplas comparações podem ser efetuados para avaliar diferenças específicas entre as médias podem ser efetuados (LIMA DE FARIAS; DEMARQUI, 2017).

A ANOVA de um fator indica que apenas uma variável, com dois ou mais níveis de tratamento será testada, sendo apropriada para variáveis distribuídas de forma normal, com uma mesma variância. Os desvios do um tratamento dentro da população são considerados independentes entre si, ou seja, deseja-se comparar a variação entre os grupos com a variação dentro dos grupos, sendo a variação dentro dos grupos atribuída a erros experimentais, mas se a variação ocorrer entre os grupos, ela é atribuída ao efeito do tratamento recebido (SELTMAN, 2015) (SOUZA, 2002).

As Equações 13-19 apresentam os passos propostos para a realização da análise de variância, partindo de um teste de hipóteses (SOUZA, 2012).

Teste de hipóteses:

$$H_0: \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = \bar{X}_3 \dots$$

H_1 : alguma das médias difere entre si

a) Graus de liberdade:

Tratamentos: G.L.Tr. = $k - 1$;

Total: G.L.T. = $k.r - 1$;

Resíduo: G.L.R. = $k.(r - 1)$

Onde:

k - Número de tratamentos

r - Número de repetições

b) Cálculo do fator de correção:

$$C = \frac{(\sum X_i)^2}{N} \quad (13)$$

Onde:

X_i - Dado experimental obtido

N - Número de experimentos realizados

c) Soma de quadrados do total:

$$SQ_{Total} = \sum X_i^2 - C \quad (14)$$

d) Soma de quadrados dos tratamentos:

$$SQ_{Trat.} = \frac{\sum T^2}{r} - C \quad (15)$$

Onde:

T - Soma dos dados experimentais por tratamento

e) Soma dos quadrados dos resíduos:

$$SQ_{Res.} = SQ_{Total} - SQ_{Trat.} \quad (16)$$

f) Quadrado médio dos tratamentos:

$$QM_{Trat.} = \frac{SQ_{Trat.}}{k - 1} \quad (17)$$

g) Quadrado médio dos resíduos:

$$QM_{Res.} = \frac{SQ_{Res.}}{k.(r - 1)} \quad (18)$$

h) Valor de F:

$$F = \frac{QM_{Trat.}}{QM_{Res.}} \quad (19)$$

A Tabela 2.1 apresenta uma representação esquemática de resultados obtidos pela análise de variância.

Tabela 2.1 Exemplo de tabela obtida com os dados calculados na análise de variância.

Fontes de variação	S.Q.	G.L.	Q.M.	F _{Calc.}
Tratamentos	SQ _{Trat.}	k - 1	QM _{Trat.}	$F = \frac{QM_{Trat.}}{QM_{Res.}}$
Resíduo	SQ _{Res.}	k.(r - 1)	QM _{Res.}	
Total	SQ _{Tot.}	k.r - 1		

Fonte: o autor.

Compara-se o valor de F obtido com o valor de F tabelado, a fim de responder o teste de hipóteses:

$$F_{(G.L.Tr.; G.L.R.); \alpha} = F_{Tab.} \text{ (Valor tabelado)}$$

Se $F_{calc.} > F_{tab.} \rightarrow H_0$ é rejeitada.

O p-valor é calculado pela maioria dos programas estatísticos e representa a probabilidade de ser obtida uma observação da distribuição F maior ou igual ao valor observado pela $F_{Calc.}$. Assim sendo, se o p-valor for menor que α , rejeita-se H_0 (SOUZA, 2002).

2.6.2 Método de comparações múltiplas de Duncan

Com o teste de hipóteses fornecido pela análise de variância não é possível determinar quais médias diferem entre si, caso a hipótese de que pelo menos uma delas seja diferente venha a ser a hipótese aceita através do teste F. A fim de resolver este problema, Duncan propôs um método de comparação entre médias, através do índice apresentado na Equação 20, de forma a agrupar as médias que são estatisticamente iguais entre si e rejeitar médias não pertencentes aos grupos. Esta análise permite um diagnóstico mais profundo de dados estatísticos, garantindo que o pesquisador tome uma ação mais precisa sobre os dados em estudo (DUNCAN, 1955).

$$D = Z_{(k,\alpha)} \cdot \frac{\sqrt{QM_{Res.}}}{\sqrt{r}} \quad (20)$$

Onde:

D - Índice de Duncan

$Z_{(k,\alpha)}$ - Fator Z

Neste procedimento, ordenam-se as médias em ordem decrescente e calculam-se todas as estimativas dos contrastes que abrangem as médias analisadas. Conforme o valor calculado de índice D for maior do que o contraste analisado, as médias são agrupadas, caso contrário, diminui-se o número de médias abrangidas pelo método e compara-se novamente o índice D calculado para as médias abrangidas com os contrastes analisados (DUNCAN, 1955).

3.0 METODOLOGIA

3.1 Material Analisado

A armadura de tração é parte fundamental na fabricação de *risers* flexíveis, dutos projetados para suportar esforços dinâmicos ao atuar na extração e transporte de petróleo entre poços e plataformas, tendo a função de sustentar carregamentos estáticos, seja de tração ou flexão, durante a manipulação e serviço do duto. Esta armadura é composta por arames de aço ao carbono e alta resistência mecânica dispostos em forma helicoidal, formato que auxilia na acomodação de movimentos torcionais internos no duto. A Figura 3.1 ilustra o conceito de camadas num *riser* flexível *unbonded* (sem adesivo entre as camadas) e um fragmento da amostra utilizada neste estudo.

Figura 3.1 (a) Camadas encontradas num *riser* flexível; (b) Amostra de material que foi analisado.



Fontes: (a) (RUBIN, 2006); (b) o autor.

3.2 Caracterização Metalúrgica e Mecânica

3.2.1 Composição Química

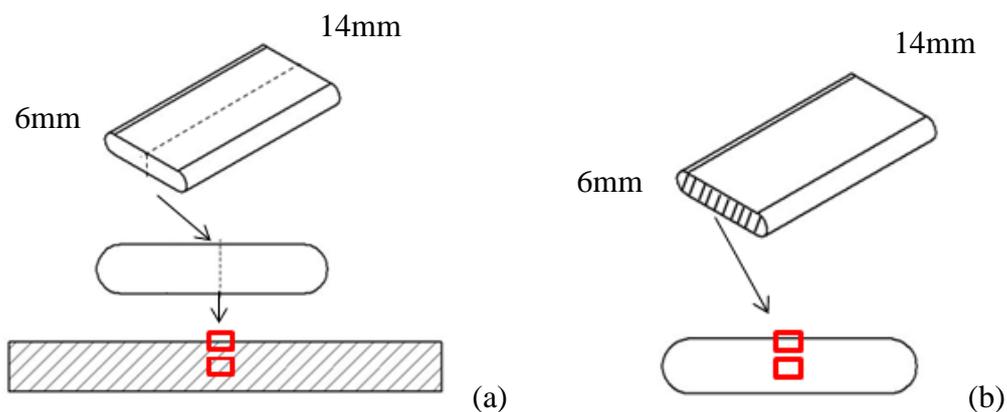
A análise química foi efetuada em uma amostra de arame de *riser*. Esta amostra foi preparada mediante lixamento para planificação e remoção de possíveis contaminantes com a utilização de uma lixa de 80mesh, sendo, em seguida, analisada através de espectrometria de emissão ótica, utilizando-se um espectrômetro marca

Spectro, modelo Spectrolab. O resultado expressa uma média de três análises efetuadas na amostra.

3.2.2 Caracterização Microestrutural

A análise microestrutural do arame foi realizada nas seções longitudinal e transversal, sendo analisadas as regiões do núcleo e da borda da amostra, como mostrado na Figura 3.2. A amostra foi preparada para observação mediante corte, embutimento em resina termofixa, lixamento e polimento. Para revelar a microestrutura foi realizado o ataque com reativo de Nital 2%. A observação foi efetuada através de microscopia ótica, utilizando-se um microscópio da marca Olympus, modelo BX 51 M, sendo que as micrografias foram obtidas através de câmera digital acoplada ao microscópio (VOORT, 2004).

Figura 3.2 (a) Seção longitudinal do arame; (b) Seção transversal do arame.



Fonte: o autor.

3.2.3 Análise de Inclusões

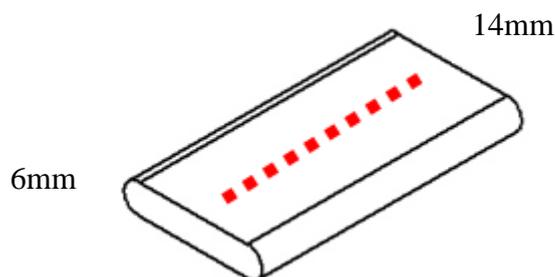
A análise de inclusões foi baseada na norma ASTM E45 – método A, realizada na seção longitudinal do arame, na região do núcleo, conforme mostrado na Figura 3.2 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2018).

A amostra foi preparada seguindo o procedimento de corte, embutimento em resina termofixa, lixamento e polimento, e em seguida foi observada em um microscópio óptico da marca Olympus, modelo BX 51 M.

3.2.4 Perfil de Dureza HV₁₀

A fim de se obter um perfil de dureza na superfície do arame, conforme mostrado na Figura 3.3, foi utilizado um microdurômetro automático da marca Instron, modelo Tuckon, na escala Vickers (HV), utilizando uma carga de 10kgf e espaçamento de 10mm entre as identações (KUHN, 2004).

Figura 3.3 Ilustração das identações HV₁₀ no corpo de prova.

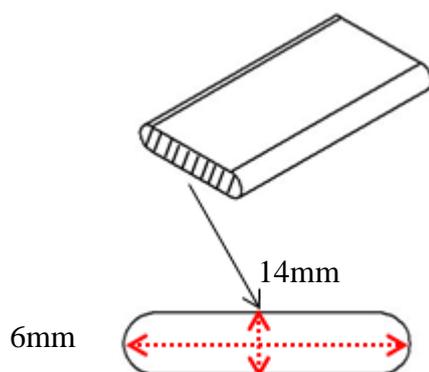


Fonte: o autor.

3.2.5 Perfil de dureza HV_{0,3}

Foram realizados dois perfis de microdureza no arame, a partir da seção transversal, nos sentidos horizontal e vertical, como ilustra a Figura 3.4. Para realização deste ensaio foi utilizado um microdurômetro automático da marca Instron, modelo Tuckon, na escala Vickers, com carga de 300grf e espaçamento de 0,3mm entre identações (KUHN, 2004).

Figura 3.4 Sentidos dos perfis de dureza obtidos na seção transversal.



Fonte: o autor.

3.2.6 Ensaio de Tração

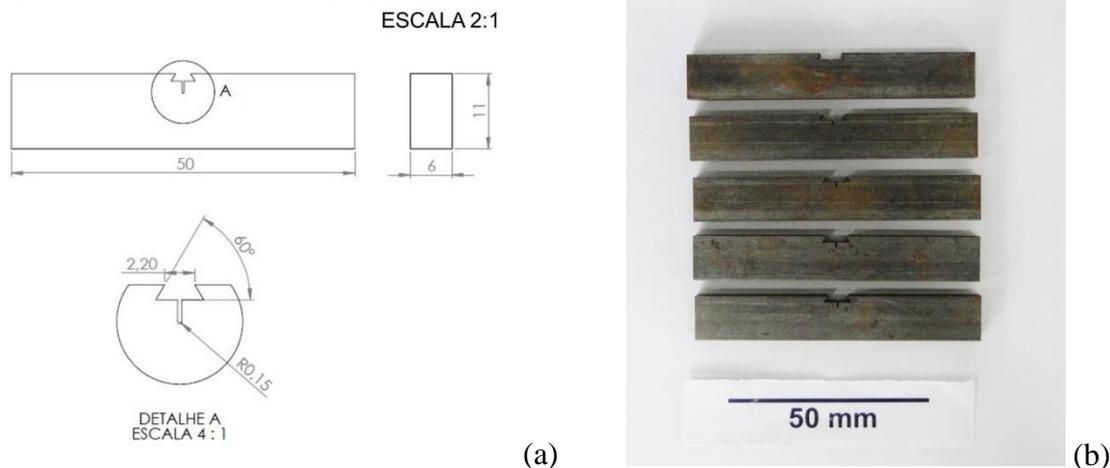
Foram retirados 3 corpos de prova *subsize*, através de usinagem, da amostra de arame, sendo que a geometria utilizada foi determinada de forma a atender aos parâmetros fornecidos pela norma ASTM E8, utilizada como procedimento padrão para a realização dos ensaios de tração. Os ensaios de tração foram realizados com velocidade de deslocamento de 1mm/min, utilizando uma máquina servo-hidráulica MTS, modelo 810 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2015).

A área da seção útil retangular, utilizada como constante na determinação dos valores de tensão de engenharia, foi medida com o auxílio de paquímetro digital, assim como os valores de comprimento inicial e final da amostra, utilizados para a determinação do alongamento após a fratura. A deformação foi obtida através da leitura de um *clip-gage* acoplado aos corpos de prova durante os ensaios, sendo obtidos, através desta leitura, os valores de alongamento à fratura. Os dados de força foram obtidos através da leitura de uma célula de carga de 100kN. A tensão de escoamento foi determinada considerando um *offset* de deformação no valor de 0,2%.

3.3 Ensaaios de CTOD

Foram obtidos 5 corpos de prova para os ensaios de CTOD, a partir do material de análise, sendo usinados por eletroerosão à fio com uma geometria de forma e de entalhe de modo que atendessem aos requisitos previstos na norma ASTM E1820 para um corpo de prova do tipo SE(B). Considerando as limitações geométricas do próprio material de estudo, os corpos de prova obtidos, assim como o modelo dimensional utilizado, são apresentados na Figura 3.5 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2017).

Figura 3.5 (a) Modelo projetado em mm; (b) Corpos de prova utilizados.



Fonte: o autor.

Os corpos de prova foram lixados nas regiões abaixo do entalhe das superfícies laterais, a fim de acompanhar o crescimento de trinca durante a etapa de pré-trincamento e diminuir a rugosidade superficial, de forma a evitar efeitos de concentradores de tensão na superfície e fornecer um acabamento uniforme para o crescimento regular de trinca durante os ensaios. Posteriormente, os corpos de prova foram medidos com auxílio de paquímetro digital, com resolução de 0,01mm, e marcados com auxílio de lâmina metálica nas superfícies laterais, a fim de identificar a região de término da etapa de pré-trincamento.

Após a etapa de preparação dos corpos de prova, foi realizada a etapa de pré-trincamento em fadiga, que é prevista em norma para que os ensaios reproduzam trincas com um ângulo mais agudo possível, ou de mesmo modo, possuindo um raio de curvatura na ponta da trinca tendendo a zero. Estas condições permitem uma reprodução fiel de trincas, já em estágio de propagação, encontradas em aplicações práticas.

Os pré-trincamentos foram realizados em uma máquina servo-hidráulica, da marca MTS, modelo 810, utilizando uma taxa variação de ΔK decrescente, seguindo os parâmetros apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 Parâmetros de pré-trincamento.

Frequência	15Hz
ΔK_{Final}	16 MPa.m ^{1/2}
Relação a/w final	0,5

Fonte: o autor.

Após a etapa de pré-trincamento, as amostras foram submetidas aos ensaios de tenacidade à fratura por flexão em 3 pontos, com taxa de deslocamento de 1mm/min. Os ensaios foram assistidos por medidor de força (célula de carga com capacidade de 100kN), medição da abertura da boca do entalhe (*clip-gage*) e medições laterais da abertura da ponta da trinca (câmera digital e extensômetro à laser), como mostra a Figura 3.6.

Figura 3.6 (1) Célula de carga; (2) *Clip-gage*; (3) Câmera digital; (4) Extensômetro à laser.



Fonte: o autor.

Conforme as amostras atingiam valores de carga máxima, observado através do início de declínio observado no carregamento, os ensaios foram interrompidos e se dava início à etapa de pós-fadiga nas amostras, de modo a proceder à fratura dos corpos de prova. Esta etapa se torna necessária para que ocorra a separação de etapas de ensaio, para que sejam evidenciadas as regiões de entalhe, pré-trinca, ensaio, pós-fadiga e

fratura final, tornando possíveis as medições posteriores aos ensaios nas superfícies de fratura. A Figura 3.7 ilustra a superfície de fratura obtida após a etapa de pós-fadiga.

Figura 3.7 Superfície de fratura.



Fonte: o autor.

3.3.1 Obtenção de CTOD Convencional

A partir da obtenção dos dados de força, através da célula de carga, e dos dados da abertura da boca do entalhe, através da leitura do *clip-gage*, durante os ensaios, pôde-se obter um gráfico característico do comportamento do avanço trinca durante os ensaios. Sendo que através de relações trigonométricas entre a abertura da boca do entalhe com a abertura da ponta da trinca, considerando os efeitos de geometria do corpo de prova, obtêm-se valores de tenacidade à fratura característicos do material de interesse.

Para a obtenção dos dados dimensionais, foi utilizado um paquímetro digital, com resolução de 0,01mm, para a medição da pré-trinca de fadiga, foi utilizado um projetor de perfis, marca Insize, modelo ISP-Z3015.

A norma ASTM E1820 foi utilizada como base para os cálculos de obtenção de CTOD, através das Equações 1-10. O valor de CTOD foi considerado como o ponto onde se atingiu a carga máxima, pois não foram evidenciadas instabilidades (*pop-in*) durante os ensaios.

3.3.2 Obtenção de CTOD pelo Método δ_5

Após a realização dos pré-trincamentos, as amostras duas marcações, nas duas superfícies laterais de análise, em distâncias de 5mm entre si e equidistantes da ponta da trinca, no sentido vertical, com auxílio de paquímetro digital, com resolução de 0,1mm. Estas marcações foram utilizadas como referência para a colagem de fitas retroreflexivas, utilizadas para a medição da variação da distância entre os pontos iniciais, tanto na extensometria à laser, quanto na análise de vídeo.

Extensometria à Laser

O extensômetro foi posicionado a uma distância de 380mm do corpo de prova, respeitando a distância focal do equipamento, com um ângulo de 45° em relação à superfície dos corpos de prova, necessário para evitar a reflexão total do laser emitido para o receptor do equipamento.

Durante a realização dos ensaios, foram adquiridos dados de diferença de comprimento entre as fitas retroreflexivas fixadas em cada amostra, através de um extensômetro à laser. Estes dados foram comparados com os dados obtidos pela leitura da célula de carga, de forma a se obter o momento de início de ensaio e momento em que a amostra atingiu a carga máxima, de forma a se obter o valor de δ_5 para cada amostra.

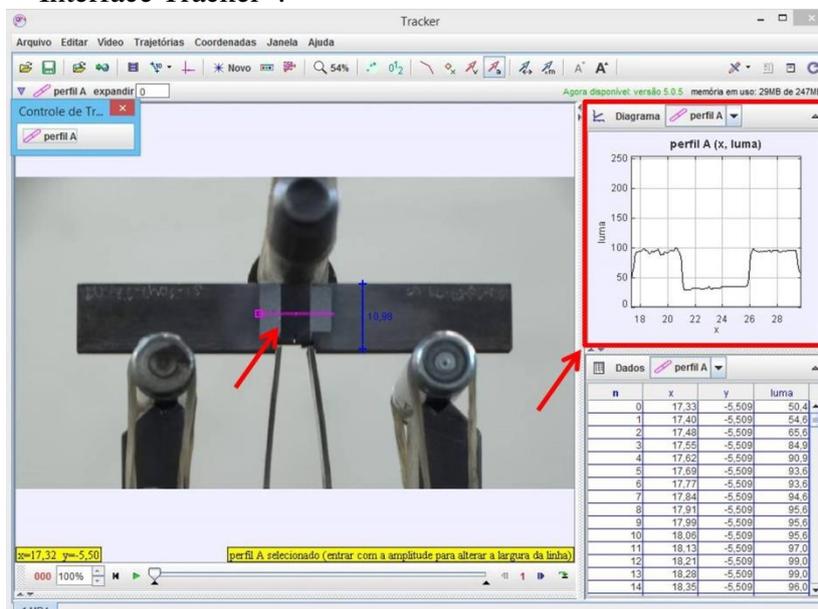
Análise de Vídeo

Durante a realização dos ensaios, foram adquiridos dados de vídeo através de uma câmera digital Canon®, modelo PowerShot SX530 HS, com resolução de 16.0 Megapixels. Estes dados foram analisados através do software de análise de vídeo Tracker® e comparados com os dados obtidos pela leitura da célula de carga, de forma a se obter o momento de início de ensaio e momento em que a amostra atingiu a carga máxima, para que se obtivessem os *frames* correspondentes.

Os *frames* inicial e final de ensaio foram analisados através dos gráficos de luminância por pixel, sendo demarcado o início das fitas retroreflexivas com um aumento significativo no gráfico e o final das fitas como uma queda abrupta no gráfico.

A diferença do comprimento interno entre as fitas retroreflexivas no início e fim de ensaio, representam os valores de δ_5 obtidos para cada amostra analisada. A Figura 3.8 ilustra a interface do software, sendo que as flechas indicam a região de análise e o respectivo gráfico gerado.

Figura 3.8 Interface Tracker[®].



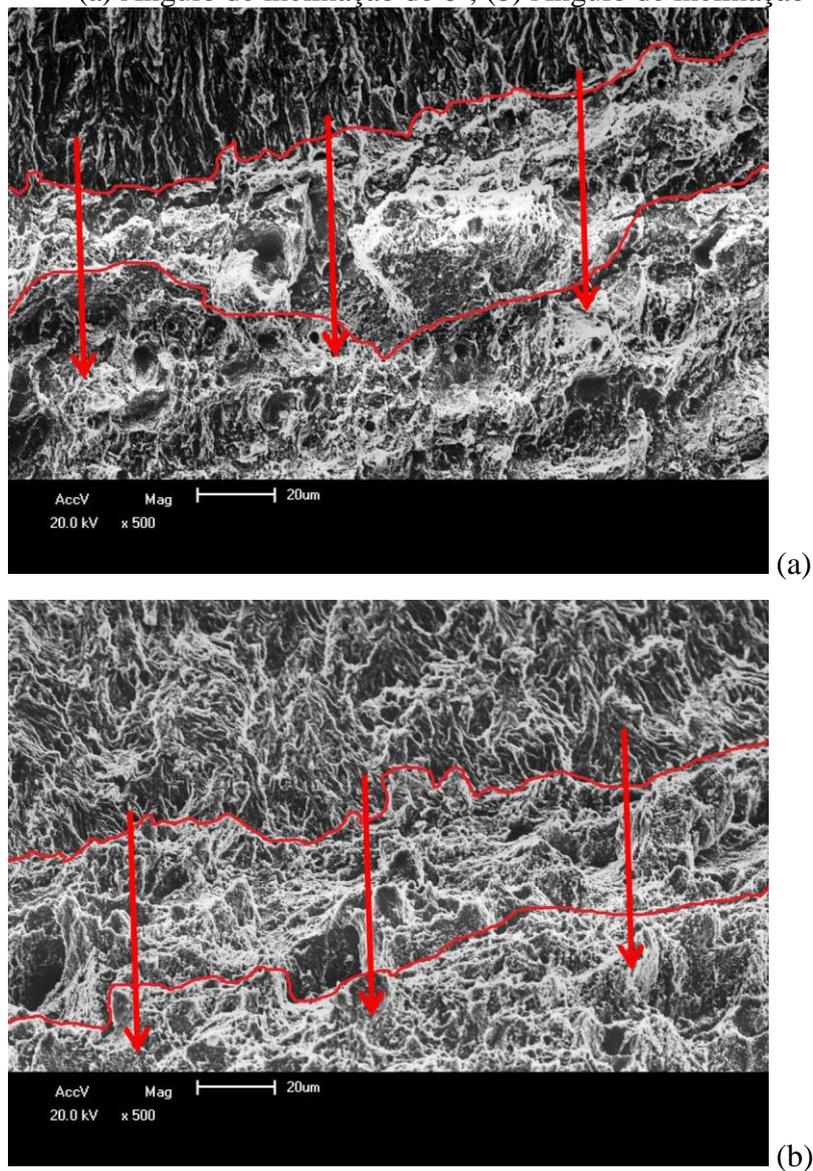
Fonte: o autor.

3.3.3 Obtenção de CTOD pela Medição da *Stretch Zone*

As faces fraturadas foram analisadas através de MEV da marca Shimadzu, modelo SSX - 550, de forma serem obtidos os valores de comprimento da *Stretch Zone* (SZ). Foram realizadas 4 medições na região central de fratura por amostra, sendo uma com ângulo de inclinação de 0° (t) e outra com inclinação de 45° (w) para cada face de fratura.

A Figura 3.9 apresenta um demonstrativo das fractografias obtidas pela análise de MEV, as linhas demarcam o início e término da SZ, enquanto as flechas indicam o sentido de propagação da trinca.

Figura 3.9 (a) Ângulo de inclinação de 0° ; (b) Ângulo de inclinação de 45° .



Fonte: o autor.

Para cada medição, foi realizada a média entre 15 pontos equidistantes para cada imagem obtida, através de análise de imagem pelo *software* ImageJ[®], assim como a média de medição para cada medida realizada, considerando o ângulo de inclinação analisado, de modo a serem obtidos t e w , para cada amostra. Desta forma, puderam-se obter os valores de CTOD para medições da SZ, de acordo com a Equação 11.

3.4 Análise Estatística de Dados

Foi efetuada a análise de variância a fim de verificar a homogeneidade entre as médias dos resultados obtidos para os 4 métodos de determinação de CTOD analisados, sendo verificada a possibilidade de análise através do teste de Duncan, caso as médias não fossem homogêneas. Para tanto, foram utilizadas as Equações 13-19, alinhadas à função estatística do Excel[®], para a análise de variância e a Equação 20 para determinação dos índices de Duncan correspondentes, associadas com a determinação do fator Z, através dos dados tabelados apresentados no Anexo A.

Os índices de Duncan foram comparados com os contrastes de forma decrescente, ou seja, caso o primeiro contraste testado estivesse com um valor abaixo do índice de Duncan, automaticamente o próximo contraste a ser testado já estaria com um valor abaixo, tornando o prosseguimento da etapa desnecessária, passando-se então, para a etapa posterior com um número menor de médias testadas.

4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização Metalúrgica e Mecânica

4.1.1 Composição Química

A Tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos através da análise da composição química da amostra, assim como os requisitos da norma SAE J403 para classificação de aço ao carbono 1070. Percebe-se que a amostra atende às faixas de composição previstas em norma, podendo, portanto ser classificada com um aço SAE 1070 (SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 2009).

Tabela 4.1 Composição química (% em massa), sendo o percentual restante em ferro.

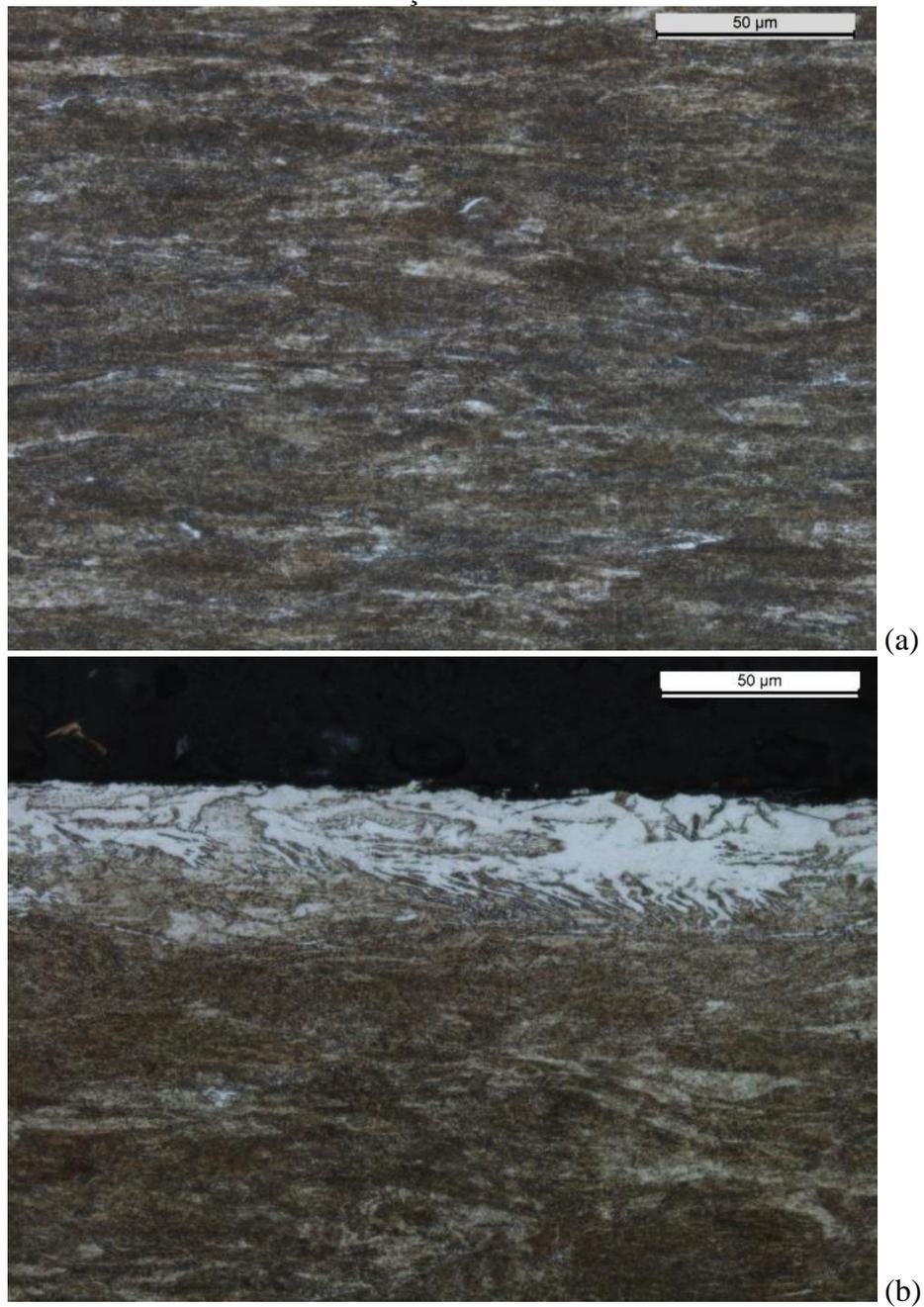
Elemento	C	Mn	S	P	Si	Residuais
SAE 1070	<u>0,65-0,75</u>	<u>0,60-0,90</u>	<u>Máx. 0,050</u>	<u>Máx. 0,030</u>	-	-
Amostra	0,716	0,791	0,00260	0,0120	0,194	0,0999

Fonte: (SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 2009); o autor.

4.1.2 Caracterização Microestrutural

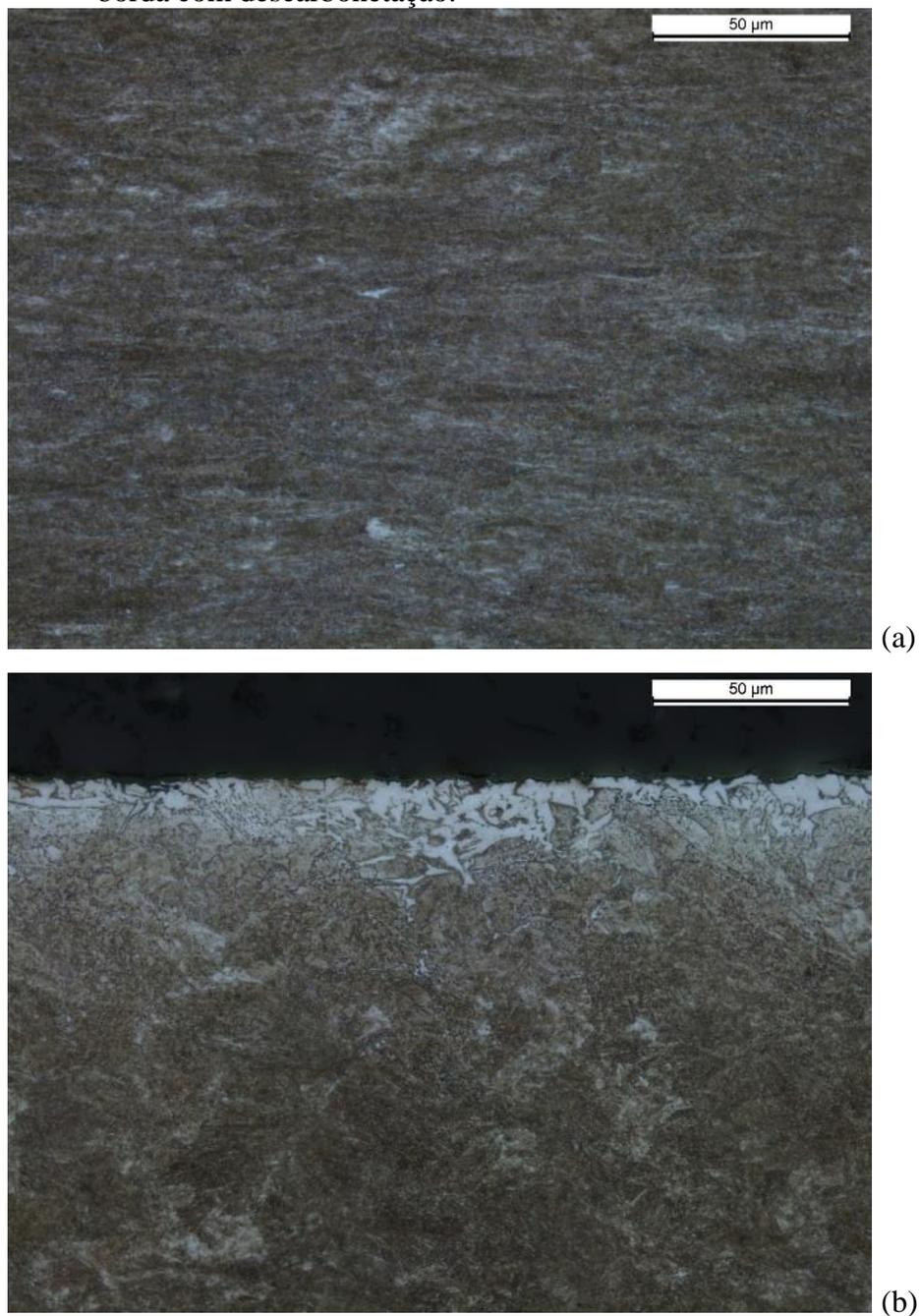
A seção longitudinal da amostra apresentou microestrutura composta por perlita deformada no sentido de laminação e descarbonetação superficial com ferrita em contorno de grão na borda, como pode ser visto na Figura 4.1. A seção transversal apresentou microestrutura perlítica e descarbonetação superficial com ferrita em contorno de grão na borda, como pode ser visto na Figura 4.2.

Figura 4.1 Micrografias da seção longitudinal: (a) Região do núcleo; (b) Região da borda com descarbonetação.



Fonte: o autor.

Figura 4.2 Micrografias da seção transversal: (a) Região do núcleo; (b) Região da borda com descarbonetação.



Fonte: o autor.

4.1.3 Análise de Inclusões

Após a realização do preparo da amostra, e posterior observação, não foi encontrada a presença de inclusões na seção longitudinal, na região do núcleo. Inclusões atuam como elementos nucleadores de trincas, por possuírem uma dureza maior do que o material analisado, criando pontos de triaxialidade de tensões no seu entorno,

fornecendo, da mesma forma, caminhos preferenciais para a propagação de trincas já existentes. Estes fatores podem causar a obtenção de valores menores de tenacidade à fratura, se comparados ao material livre de inclusões.

4.1.4 Perfil de Dureza HV₁₀

A Tabela 4.2 mostra os resultados obtidos após a realização do procedimento de ensaio, sendo obtida a média dos resultados, assim como o seu respectivo desvio padrão, como resultado representativo da superfície de análise.

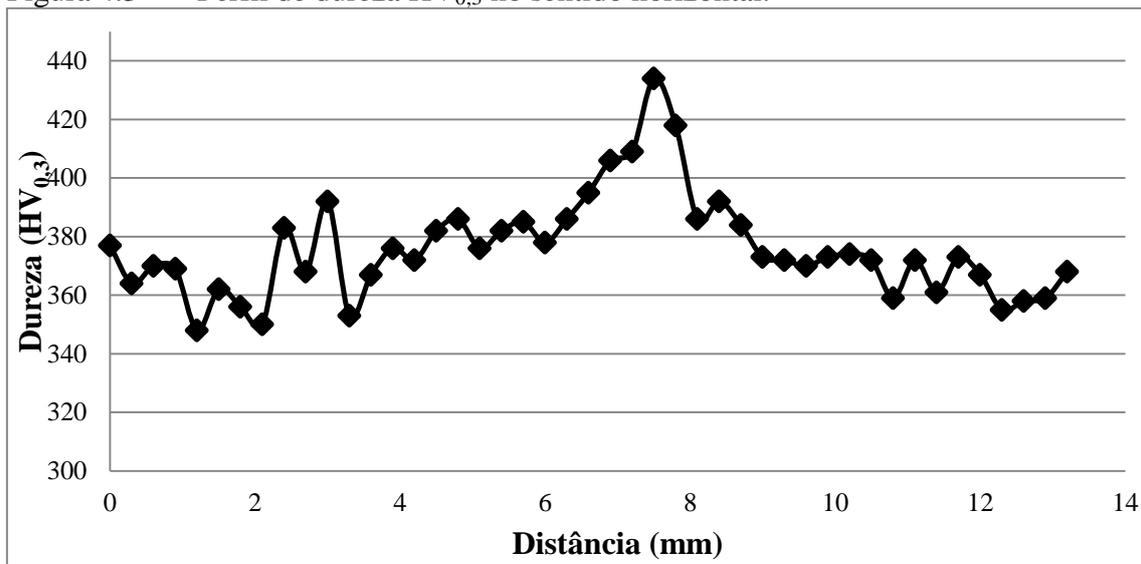
Tabela 4.2 Resultados do perfil de dureza HV₁₀.

Posição	Dureza HV ₁₀
1	346
2	343
3	357
4	363
5	357
Média	353 ± 8

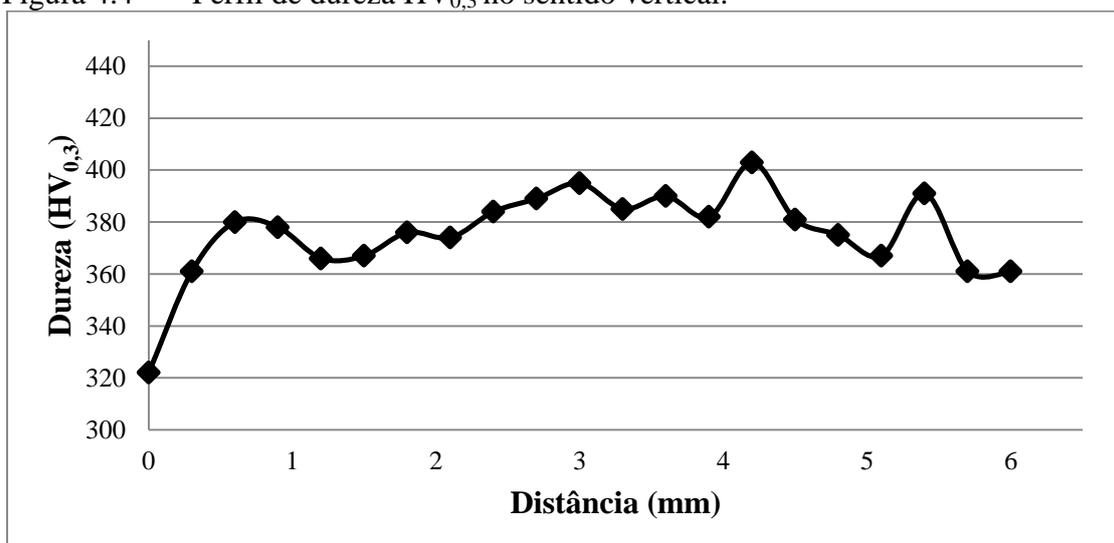
Fonte: o autor.

4.1.5 Perfil de Dureza HV_{0,3}

O perfil de microdureza Vickers 300grf do arame, realizado na seção transversal, apresentou queda de dureza nas regiões próximas às bordas, notadamente no sentido vertical de análise, condizendo com a descarbonetação superficial do material, devido às características mecânicas da ferrita, presente na superfície, que possui menor dureza do que a perlita, presente no núcleo. A Figura 4.3 apresenta o resultado do perfil de dureza HV_{0,3} da seção transversal, no sentido horizontal, e a Figura 4.4 apresenta o resultado do perfil de dureza HV_{0,3} da seção transversal, no sentido vertical.

Figura 4.3 Perfil de dureza $HV_{0,3}$ no sentido horizontal.

Fonte: o autor.

Figura 4.4 Perfil de dureza $HV_{0,3}$ no sentido vertical.

Fonte: o autor.

4.1.6 Ensaio de Tração

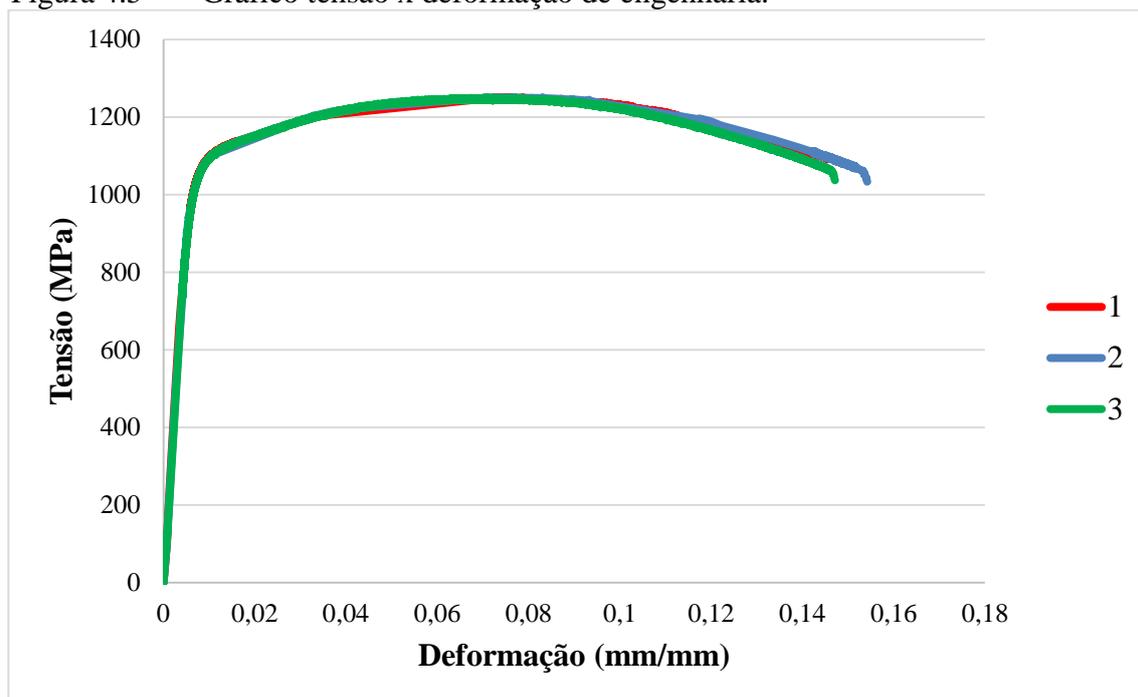
A Tabela 4.3 apresenta os resultados obtidos após a realização dos ensaios, assim como os valores de desvio padrão calculados. Percebe-se que o material apresenta altos valores de resistência, aliados a um alongamento razoável, resultado de uma boa acomodação do movimento das discordâncias pelo material, levando a uma plasticidade visível no gráfico tensão x deformação de engenharia, ilustrado na Figura 4.5.

Tabela 4.3 Resultados dos ensaios de tração.

Amostra	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Alongamento à fratura (%)	Alongamento após a fratura (%)
1	1045	1252	14,53	7,31
2	1048	1253	15,42	7,04
3	1052	1251	14,74	7,08
Média	1049 ± 4	1252 ± 1	14,90 ± 0,47	7,14 ± 0,15

Fonte: o autor.

Figura 4.5 Gráfico tensão x deformação de engenharia.



Fonte: o autor.

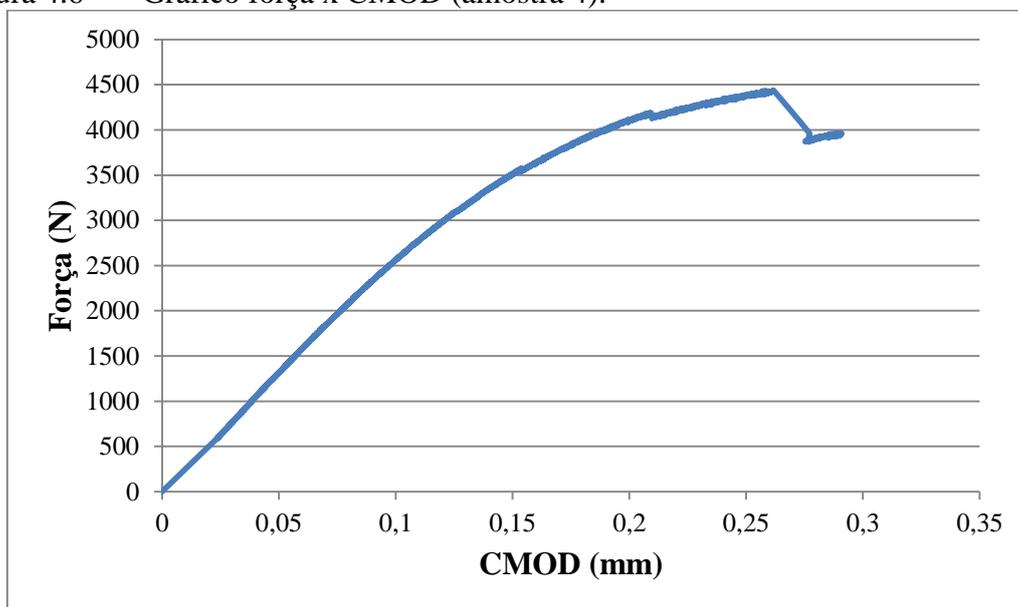
A presença de plasticidade nos ensaios de tração torna esperada a obtenção de valores válidos nos resultados dos ensaios de CTOD, tornando o material analisado apto para realização dos ensaios previstos no decorrer do presente estudo.

4.2 Ensaio de CTOD

4.2.1 Obtenção de CTOD pelo Método Convencional

Através dos dados de força adquiridos, relacionados com os dados da abertura da boca do entalhe (CMOD), obtiveram-se curvas como a apresentada na Figura 4.6. Observa-se uma pequena plasticidade através do gráfico, caracterizada pela região não linear da curva e pela relação P_m/P_Q , que sendo maior do que 1,1 invalida resultados obtidos por métodos de análise de tenacidade à fratura para materiais que possuem comportamento frágil.

Figura 4.6 Gráfico força x CMOD (amostra 4).



Fonte: o autor.

A Tabela 4.4 apresenta os resultados obtidos através da técnica de ensaio proposto pela norma ASTM E1820. Para a obtenção dos resultados de CTOD, foram utilizadas as Equações 1-10.

Tabela 4.4 Resultados de CTOD obtidos por técnica convencional.

Amostra	1	2	3	4	5	Média
W (mm)	10,98	11,00	10,95	10,97	10,96	-
B (mm)	6,00	6,04	6,01	6,00	6,02	-
S (mm)	44,04	44,04	44,04	44,04	44,04	-
A _p (N.mm)	893,73	929,37	852,11	694,34	1027,12	-
P _m (N)	4200,10	4474,17	4477,21	4436,21	4630,43	-
P _m /P _Q	1,50	1,49	1,54	1,48	1,50	-
a _{inicial} (mm)	2,67	2,64	2,63	2,64	2,69	-
a _{final} (mm)	6,33	6,21	6,15	6,19	6,15	-
δ_u (mm)	0,061	0,062	0,059	0,052	0,068	0,060 ± 0,006

Fonte: o autor.

Onde:

W - Largura do corpo de prova

B - Espessura do corpo de prova

S - Distância entre os centros dos roletes inferiores

A_p - Área da região abaixo da curva do gráfico força x CMOD

P_m - Força máxima obtida no ensaio

P_Q - Força correspondente ao cruzamento de uma reta com 5% a menos de inclinação do que a reta da região linear de ensaio

a_i - Comprimento do entalhe

a_{final} - Comprimento da pré-trinca de fadiga

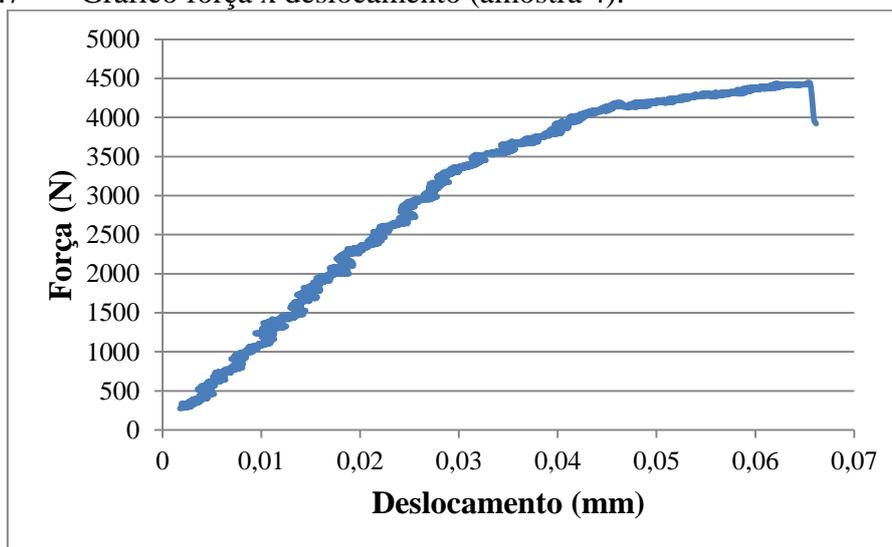
Apesar do material não possuir uma alta plasticidade na ponta da trinca, devido aos baixos valores de CTOD encontrados, observa-se uma baixa variação entre os resultados, através do valor de desvio padrão associado à média. Este resultado é esperado pela própria reprodutibilidade fornecida pela padronização do método de ensaio.

4.2.2 Obtenção de δ_5 por Extensometria à Laser

A partir dos dados obtidos através dos ensaios, puderam-se relacionar os dados de força com os dados de deslocamento entre as fitas retroreflexivas, gerando curvas

onde se pode observar uma pequena região plástica, característica necessária para a obtenção de resultados válidos de CTOD, assinalada pelo início de uma região não linear na curva, que aparece conforme ocorre a abertura lateral da trinca. A Figura 4.7 apresenta uma curva demonstrativa dos gráficos obtidos nos ensaios, nota-se um maior ruído no sinal da leitura, se comparado a Figura 4.6.

Figura 4.7 Gráfico força x deslocamento (amostra 4).



Fonte: o autor.

Através das curvas obtidas, relacionou-se o ponto de carga máxima de ensaio com o respectivo deslocamento entre as fitas retroreflexivas para que fossem determinados os resultados de δ_5 apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 Resultados obtidos por extensometria à laser.

Amostra	1	2	3	4	5	Média
δ_5 (mm)	0,069	0,094	0,064	0,062	0,078	0,073 ± 0,013

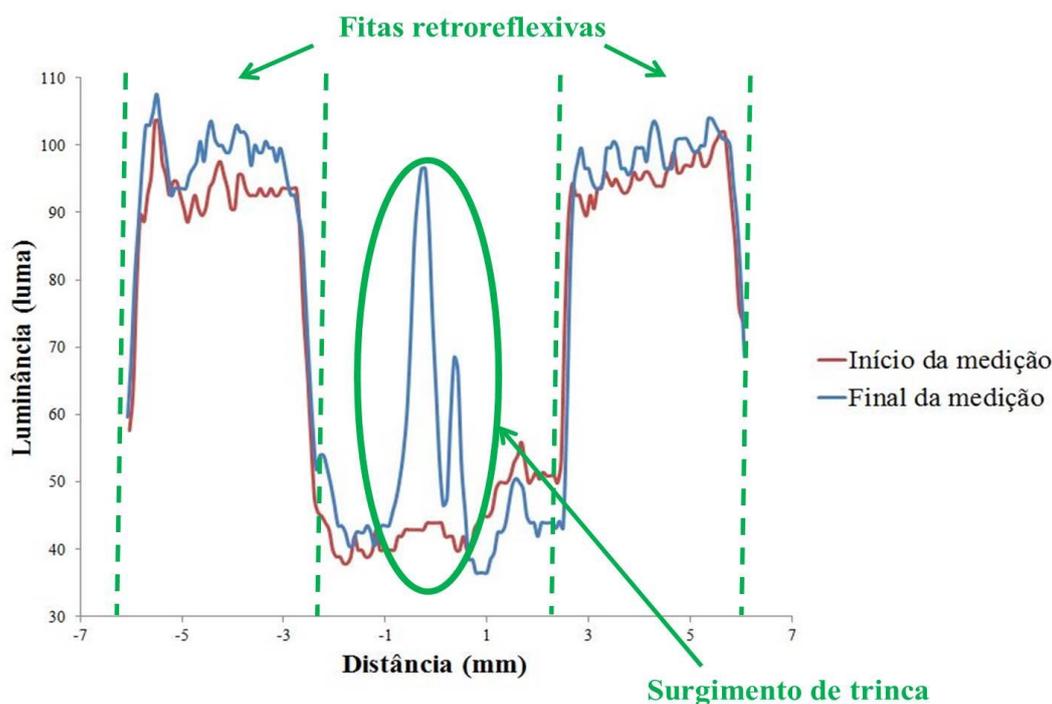
Fonte: o autor.

Observa-se através dos resultados, uma grande variação relativa entre os ensaios, ilustrada pelo valor de desvio padrão relacionado com a média dos valores encontrados. A disparidade entre os resultados, principalmente com as amostras 2 e 5 entre as demais, pode ser proveniente de má fixação das fitas retroreflexivas junto aos corpos de prova, seja esta fixação possivelmente alterada antes do início dos ensaios.

4.2.3 Obtenção de δ_5 por Análise de Vídeo

Através das curvas de luminância x distância, puderam-se observar o aparecimento das trincas, pelo aumento súbito nos valores de luminância encontrados ao serem relacionados os momentos de início e término dos ensaios. Esta diferença de luminância se deve ao campo de tensões formado na ponta da trinca, gerando deformações, notadas pelas inflexões externas nas superfícies dos corpos de prova, ou seja, alterando o valor do ângulo entre a superfície normal ao corpo de prova e a ponta da trinca. A alteração deste ângulo afeta a incidência e reflexão da luz sobre a região da ponta da trinca, gerando mudanças nos valores de luminância encontrados. A Figura 4.8 ilustra as curvas obtidas, indicando a posição das fitas retroreflexivas, assim como a região de surgimento da trinca.

Figura 4.8 Gráfico luminância x distância (amostra 4).



Fonte: o autor.

A Tabela 4.6 apresenta os resultados obtidos. Pode-se observar a proximidade entre os resultados entre si, caracterizados pelo baixo valor de desvio padrão associado à média. Isto se deve, principalmente, aos efeitos de resolução da câmera utilizada, pois a medição de luminância é efetuada a cada pixel, sendo que o tamanho de pixel (resolução) utilizado deve comportar as medidas a serem realizadas, ou seja, quanto menor o tamanho de pixel, maior será a precisão da medida efetuada.

Tabela 4.6 Resultados obtidos por análise de vídeo.

Amostra	1	2	3	4	5	Média
δ_5 (mm)	0,072	0,073	0,071	0,072	0,069	0,071 ± 0,002

Fonte: o autor.

4.2.4 Obtenção de CTOD pela Medição da *Stretch Zone*

A Tabela 4.7 apresenta os resultados encontrados através de medições da *Stretch Zone* (SZ). Os resultados encontrados para uma inclinação de 45° (t) são ligeiramente superiores aos valores encontrados sem a inclinação das faces (w), este fato indica uma baixa plasticidade na ponta da trinca, pois quanto maior a relação t/w, maior será o valor de raio da ponta da trinca, ou seja, no momento em que ocorre o embotamento (separação das faces da trinca) o raio da ponta da trinca é uma função da acomodação de deformações nesta região.

Tabela 4.7 Resultados obtidos através de MEV.

Amostra	1	2	3	4	5	Média
t (μm)	39,57	51,53	41,69	29,57	30,05	-
w (μm)	38,72	39,54	30,63	18,75	22,5	-
δ_{SN} (mm)	0,030	0,067	0,057	0,046	0,040	0,048 ± 0,014

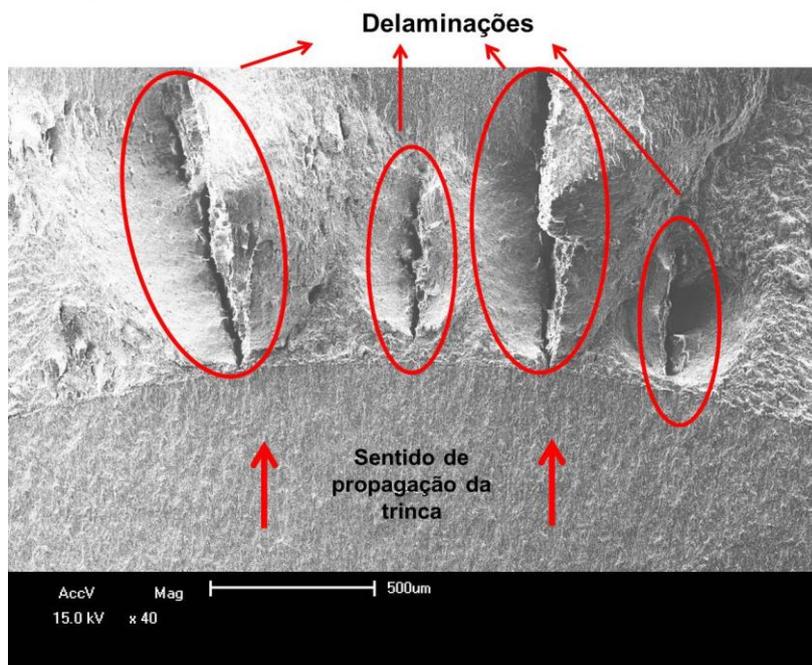
Fonte: o autor.

Percebe-se que os valores encontrados através do método de medição da *Stretch Zone* são inferiores aos demais métodos, isto evidencia a diferença entre a obtenção de valores de CTOD obtidos por técnicas indiretas, se comparado ao que de fato ocorre durante a etapa de embotamento, característica da obtenção do valor máximo de CTOD (SCHWALBE et al, 1985).

Observa-se uma grande variação entre os resultados encontrados, evidenciada pelo valor de desvio padrão associado à média. Esta variação pode ser função da presença de delaminações nas regiões próximas à SZ, assim como nas regiões onde

foram efetuadas as medições. As delaminações geralmente atuam de forma a aumentar localmente a plasticidade nas regiões adjacentes entre delaminações, devido ao efeito de redução de espessura (predomínio de estado plano de tensões) tendo o seu efeito diminuído nas regiões centrais entre duas delaminações. A Figura 4.9 ilustra a superfície de fratura com a presença de delaminações (ZHAO et al., 2017) (RUGGIERI; HIPPERT, 2015).

Figura 4.9 Imagem em MEV da superfície de fratura com delaminações.



Fonte: o autor.

4.2.5 Análise Estatística dos Resultados de CTOD

Foram utilizados os resultados experimentais dos 4 métodos de ensaio analisados, de forma a determinar se estatisticamente, com um nível de confiança de 95%, as médias seriam equivalentes entre si. A Tabela 4.8 apresenta os resultados obtidos através da análise de variância.

Tabela 4.8 Resultados da análise de variância.

Fonte da variação	S.Q.	G.L.	Q.M.	P-valor	F _{Calc.}	F _{Tab.}
Método de análise	0,002051	3	0,000684			
Erro	0,00166	16	0,000104	0,00415	6,589861	3,238872
Total	0,00371	19				

Fonte: o autor.

Como $F_{\text{Calc.}} > F_{\text{Tab.}}$, as médias amostrais não são homogêneas entre si, o que caracterizaria que os resultados obtidos seriam equivalentes, estatisticamente. Portanto, se torna necessário o aprofundamento da análise estatística para que se possa concluir quais das médias diferem entre si.

Teste de Duncan

Após a determinação de que as médias dos resultados não são homogêneas entre si, foi efetuado o teste de Duncan, com um nível de confiança de 95%, para o agrupamento das médias. As médias foram organizadas de forma decrescente, com a seguinte ordem: Laser, Vídeo, Convencional e *Stretch Zone*. A Tabela 4.9 apresenta os resultados obtidos através do teste de Duncan, os contrastes com fundo vermelho possuem valores acima do índice de Duncan, enquanto os contrastes com fundo verde possuem valores abaixo do índice de Duncan correspondente.

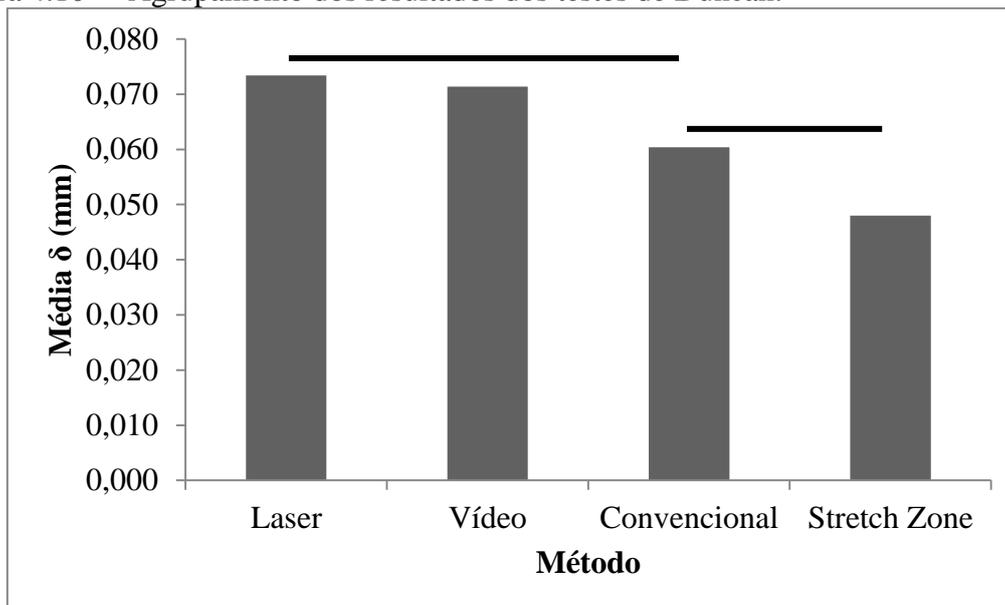
Tabela 4.9 Resultados dos testes de Duncan para agrupamento dos métodos.

Índice D	D₄	D₃	D₂
	0,0145	0,0142	0,0135
Fator Z	Z_(4; 95%)	Z_(3; 95%)	Z_(2; 95%)
	3,19	3,11	2,96
Contrastes	Laser-<i>Stretch Zone</i>	Laser-Convencional	
	0,0254	0,0130	
	Vídeo-<i>Stretch Zone</i>	Vídeo-Convencional	
		0,0234	0,0110
	Convencional-<i>Stretch Zone</i>		
			0,0124

Fonte: o autor.

Pela observação dos resultados dos testes, as médias foram agrupadas em dois grupos, conforme ilustra a Figura 4.10. Pode-se notar que apesar dos resultados não serem homogêneos entre si, todas as técnicas alternativas de análise estudadas são equivalentes ao método convencional. Isto comprova a validade dos métodos estudados e justifica uma possível alteração de método de ensaio para o material analisado, em caso de necessidade.

Figura 4.10 Agrupamento dos resultados dos testes de Duncan.



Fonte: o autor.

5.0 CONCLUSÕES

A partir das análises empregadas no presente estudo, permite-se concluir que:

- Análises de caracterização preliminares aos testes de tenacidade à fratura, indicaram que o material analisado apresentou plasticidade suficiente para a obtenção de resultados válidos de CTOD pelo método convencional (normalizado) de ensaio;

- A determinação da tenacidade à fratura do material, através do ensaio de CTOD, foi realizada e comparada para diferentes técnicas de medição, utilizando o material de interesse;

- A resolução dos equipamentos e as formas empregadas nas medições podem constituir em erros acumulados ao resultado final de cada análise;

- Os valores de CTOD obtidos por medições da *Stretch Zone* foram inferiores aos demais, mostrando que as técnicas empregadas de medição superficial, assim como a metodologia normalizada de ensaios, não correspondem fielmente aos eventos que ocorrem na ponta da trinca, apesar de fornecerem boas estimativas;

- Análises estatísticas mostraram a compatibilidade entre os resultados obtidos através das metodologias estudadas com o método de análise convencional para o material de estudo.

6.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar a comparação entre métodos utilizando um material de alta plasticidade;
- Inserir o método de medição por queda de potencial, a fim de compará-lo com os demais;
- Comparar o efeito da variação da região de no valor obtido de CTOD, pelo método da *Stretch Zone*;
- Realizar a verificação da eficácia de medição dos métodos analisados para análise de amostras imersas em meio corrosivo.

7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, T. L. **Fracture mechanics : fundamentals and applications**. 3 ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E8/E8M**: Tension Testing of Metallic Materials. West Conshohocken, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E45-A**: Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel. West Conshohocken, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E1820**: Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness. West Conshohocken, 2017.

BOBROFF, N. **Recent advances in displacement measuring interferometry**. Measurement Science and Technology 4. p. 907-926, 1993.

BRITISH STANDARD INSTITUTION. **BS 7448-1**: Fracture mechanics toughness tests. Part 1: Method for Determination of K_{Ic}, Critical CTOD and Critical J Values of Metallic Materials. Londres, 1991.

BROEK, D. **The Practical Use of Fracture Mechanics**. 1.ed. Galena: Kluwer Academic Publishers, 1988.

CAIERÃO, E. **Aplicação dos testes de comparação de médias em ensaios de cevada**. Pesq. Agrop. Gaúcha, v.12. n. 1-2, p. 51–55, 2006.

CANTERI, M. G. et al. **SASM-AGRI - Sistema para análise e separação de médias em experimentos agrícolas pelos Métodos Scott-Knott, Tukey e Duncan**. Revista Brasileira de Agrocomputação, 1(2). p.18-24, 2001.

CASTRODEZA, E. **Determination of CTOD_c in fibre metal laminates by ASTM and Schwalbe methods**. Materials Research 5(2), p. 119–124, 2002.

CASTRODEZA, E.; IPINA, J. E.; BASTIAN, F. L. **Fracture toughness evaluation of unidirectional fibre metal laminates using traditional CTOD (δ) and Schwalbe (δ_5) methodologies**. Engineering Fracture Mechanics 71(7–8), p. 1127–1138, 2004.

CHIODO, S. G. **Procedimento de avaliação da integral J e CTOD para dutos com trincas circunferenciais submetidos à flexão e aplicações à Instalação de risers pelo método carretel**. **Dissertação**. EP: USP, 2009.

DARCIS, P. P. et al. (2008). **Crack tip opening angle optical measurement methods in five pipeline steels**. Engineering Fracture Mechanics 75(8), 2453–2468, 2009.

DUNCAN, D. B. **Multiple Range and Multiple F Tests**. International Biometric Society Stable 11(1), 1–42, 1955.

ERNST, H. A. **Relations Between the Crack Tip Opening Displacement, δ_5 , and the Modified J, J_M**. Geesthacht: The Crack Tip Opening Displacement in Elastic-Plastic Fracture Mechanics. p. 197-206, 1985.

GUBELJAK, N. et al. **CTOD-R curve construction from surface displacement measurements.** Engineering Fracture Mechanics 78(11), p. 2286–2297, 2011.

GUBELJAK, N. et al. **Object grating method application in strain determination on CTOD tests.** Strain 42(2), 81–87, 2006.

HEERENS, J.; SCHÖDEL, M. **On the determination of crack tip opening angle, CTOA, using light microscopy and δ_5 measurement technique.** Engineering Fracture Mechanics 70(3–4), p. 417–426, 2003.

HELLMAN, D.; SCHWALBE, K. H. **Geometry and size effects on J-R and CTOD-R curves under plane stress conditions.** Fracture Mechanics: Fifteenth Symposium. ASTM STP 833. p. 577–603, 1984.

HOELZER, D. T.; ALI, J. A.; EBRAHIMI, F. **A study of the correlation between crack tip opening displacement (CTOD) and stretch zone width (SZW).** Scripta Metallurgica 20(11), p. 1575–1580, 1986.

KUHN, H. et al. **ASM Handbook vol. 8.** Materials Park: ASM International, 2004.

KUTZ, M. et al. **Handbook of Measurement in Science and Engineering.** 1 ed. v. 3. New Jersey: Wiley, 2016.

LIMA DE FARIAS, A. M.; DEMARQUI, F. N. **Análise de variância.** 1. ed. Rio de Janeiro: UFF, 2017.

LIU, A. F. **Mechanics and Mechanisms of Fracture: An Introduction.** Materials Park: ASM International. 2005.

NIKISHKOV, G. P.; HEERENS, J.; SCHWALBE, K. H. **Transformation of CTOD δ_5 to CTOD δ_{BS} and J-integral for 3PB- and CT-specimens.** Engineering Fracture Mechanics 63, p. 573–589, 1999.

OHTSUKA, Y.; ITOH, K. **Two-frequency laser interferometer for small displacement measurements in a low frequency range.** Applied Optics 18(2). p. 219–224, 1979.

RUBIN, A. **Qualification of Steel Wire for Flexible Pipes.** 61st Annual Conference & Exposition Corrosion, NACE, 2006.

RUGGIERI, C.; HIPPERT, E. **Delamination effects on fracture behavior of a pipeline steel: A numerical investigation of 3-D crack front fields and constraint.** International Journal of Pressure Vessels and Piping 128. p. 18–35, 2015.

SAXENA, S.; RAMAKRISHNAN, N.; DUTTA, B. K. **Determination of stretch zone width using fem.** Engineering Fracture Mechanics 76. p. 911-920, 2009.

SCHWALBE, K. H. **Introduction of δ_5 as an Operational Definition of the CTOD and its Practical Use.** Fracture Mechanics 26. p. 763-778, 1995.

SCHWALBE, K. H. et al. **Relationships Between Various Definitions of the Crack Tip Opening Displacement.** Geesthacht: The Crack Tip Opening Displacement in Elastic-Plastic Fracture Mechanics. p. 133-153, 1985.

SELTMAN, H. J. **Experimental Design and Analysis,** 2015. <<http://>

<http://www.stat.cmu.edu/~hseltman/309/Book/Book.pdf>> Acesso em 19 de Abr. 2018.

SHUKLA, A. **Practical Fracture Mechanics in Design**. 2 ed. New York: Marcel Dekker, 2011.

SIVAPRASAD, S. et al. **Can Stretch Zone Measurements Provide a Good Estimate of Fracture Toughness?** ICF10, Honolulu, 2–7, 2001.

SMITH, R. N. L. **Basic Fracture Mechanics**. 1. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1991.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. **J403: Chemical Compositions of SAE Carbon Steels**. Warrendale, 2009.

SOUZA, A. M. . et al. **Introdução a projetos de experimentos**. 1 ed. Santa Maria: UFSM, 2002.

SURESH, R. K. V. et al. **On the Determination of J_{IC} Using the Stretch Zone Width Method**. Journal of Testing and Evaluation 27(3). p. 211–218. 1999.

TENDELA, L. P.; GALIZZI, G. E. **Interferometric displacement measurement on scattering surfaces utilizing speckle effect** **Interferometric displacement measurement on scattering surfaces utilizing speckle effect**. Journal of Physics E: Scientific Instruments 3, p. 241-218, 1970.

VOORT, G. F. V. et al. **ASM Handbook vol. 9**. Materials Park: ASM International, 2004.

ZAGAR, B. G. **A laser-interferometer measuring displacement with nanometer resolution**. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 43(2), p. 332–336, 1994.

ZERBST, U.; AINSWORTH, R. A.; SCHWALBE, K. **Basic principles of analytical of flaw assessment methods**. International Journal of Pressure Vessels and Piping 77(2000), p. 855–867, 2000.

ZHANG, Q. M.; PAN, W. Y.; CROSS, L. E. (2004). **Laser interferometer for the study of piezoelectric and electrostrictive strains**. Journal of Applied Physics 63(8), p. 2492-2496, 1988.

ZHAO, Y. et al. **Enhancement of low temperature toughness of nanoprecipitates strengthened ferritic steel by delamination structure**. Materials Science and Engineering A 691(2), p. 162–167, 2017.

ZHONGHUA, L., BROCKS, W., SCHWALBE, K. H. **Engineering treatment model (ETM) for creep crack driving force estimation**. Icf 68(9), p. 221–233, 1997.

ANEXO A

Tabela studentizada de fatores Z, com um nível de confiança de 95%. (DUNCAN, 1955)

$\frac{p}{n_2}$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	50	100
1	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0
2	6.09	6.09	6.09	6.09	6.09	6.09	6.09	6.09	6.09	6.09	6.09	6.09	6.09	6.09	6.09	6.09
3	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50
4	3.93	4.01	4.02	4.02	4.02	4.02	4.02	4.02	4.02	4.02	4.02	4.02	4.02	4.02	4.02	4.02
5	3.64	3.74	3.79	3.83	3.83	3.83	3.83	3.83	3.83	3.83	3.83	3.83	3.83	3.83	3.83	3.83
6	3.46	3.58	3.64	3.68	3.68	3.68	3.68	3.68	3.68	3.68	3.68	3.68	3.68	3.68	3.68	3.68
7	3.35	3.47	3.54	3.58	3.60	3.61	3.61	3.61	3.61	3.61	3.61	3.61	3.61	3.61	3.61	3.61
8	3.26	3.39	3.47	3.52	3.55	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56
9	3.20	3.34	3.41	3.47	3.50	3.52	3.52	3.52	3.52	3.52	3.52	3.52	3.52	3.52	3.52	3.52
10	3.15	3.30	3.37	3.43	3.46	3.47	3.47	3.47	3.47	3.47	3.47	3.47	3.47	3.47	3.47	3.47
11	3.11	3.27	3.35	3.39	3.43	3.44	3.45	3.46	3.46	3.46	3.46	3.46	3.46	3.46	3.46	3.46
12	3.08	3.23	3.33	3.36	3.40	3.42	3.44	3.44	3.46	3.46	3.46	3.46	3.46	3.46	3.46	3.46
13	3.06	3.21	3.30	3.35	3.38	3.41	3.42	3.44	3.45	3.45	3.46	3.46	3.46	3.47	3.47	3.47
14	3.03	3.18	3.27	3.33	3.37	3.39	3.41	3.42	3.44	3.45	3.46	3.46	3.47	3.47	3.47	3.47
15	3.01	3.16	3.25	3.31	3.36	3.38	3.40	3.42	3.43	3.44	3.45	3.46	3.47	3.47	3.47	3.47
16	3.00	3.15	3.23	3.30	3.34	3.37	3.39	3.41	3.43	3.44	3.45	3.46	3.47	3.47	3.47	3.47
17	2.98	3.13	3.22	3.28	3.33	3.36	3.38	3.40	3.42	3.44	3.45	3.46	3.47	3.47	3.47	3.47
18	2.97	3.12	3.21	3.27	3.32	3.35	3.37	3.39	3.41	3.43	3.45	3.46	3.47	3.47	3.47	3.47
19	2.96	3.11	3.19	3.26	3.31	3.35	3.37	3.39	3.41	3.43	3.44	3.46	3.47	3.47	3.47	3.47
20	2.95	3.10	3.18	3.25	3.30	3.34	3.36	3.38	3.40	3.43	3.44	3.46	3.46	3.47	3.47	3.47
22	2.93	3.08	3.17	3.24	3.29	3.32	3.35	3.37	3.39	3.42	3.44	3.45	3.46	3.47	3.47	3.47
24	2.92	3.07	3.15	3.22	3.28	3.31	3.34	3.37	3.38	3.41	3.44	3.45	3.46	3.47	3.47	3.47
26	2.91	3.06	3.14	3.21	3.27	3.30	3.34	3.36	3.38	3.41	3.43	3.45	3.46	3.47	3.47	3.47
28	2.90	3.04	3.13	3.20	3.26	3.30	3.33	3.35	3.37	3.40	3.43	3.45	3.46	3.47	3.47	3.47
30	2.89	3.04	3.12	3.20	3.25	3.29	3.32	3.35	3.37	3.40	3.43	3.44	3.46	3.47	3.47	3.47
40	2.86	3.01	3.10	3.17	3.22	3.27	3.30	3.33	3.35	3.39	3.42	3.44	3.46	3.47	3.47	3.47
60	2.83	2.98	3.08	3.14	3.20	3.24	3.28	3.31	3.33	3.37	3.40	3.43	3.45	3.47	3.48	3.48
100	2.80	2.95	3.05	3.12	3.18	3.22	3.26	3.29	3.32	3.36	3.40	3.42	3.45	3.47	3.53	3.53
∞	2.77	2.92	3.02	3.09	3.15	3.19	3.23	3.26	3.29	3.34	3.38	3.41	3.44	3.47	3.61	3.67