

**JOYCE ANTUNES DA SILVA**

**AVALIAÇÃO DA INCERTEZA ASSOCIADA À  
TENACIDADE À FRATURA OBTIDA VIA INTEGRAL J**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

**2023**

**JOYCE ANTUNES DA SILVA**

**AVALIAÇÃO DA INCERTEZA ASSOCIADA À TENACIDADE À  
FRATURA OBTIDA VIA INTEGRAL J**

**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 e Processos de Fabricação

Orientadora: Profa. Dra. Rosenda Valdés Arencibia

**UBERLÂNDIA – MG**

**2023**

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU  
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

S586 Silva, Joyce Antunes da, 1996-  
2023 AVALIAÇÃO DA INCERTEZA ASSOCIADA À TENACIDADE À  
FRATURA OBTIDA VIA INTEGRAL J [recurso eletrônico] /  
Joyce Antunes da Silva. - 2023.

Orientadora: Rosenda Valdés Arencibia.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de  
Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Mecânica.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2023.145>

Inclui bibliografia.

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

CDU: 621



**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 629, PPGEM				
Data:	29/03/2023	Hora de início:	08:00	Hora de encerramento:	10 h : 00 mm
Matrícula do Discente:	12022EMC008				
Nome do Discente:	Joyce Antunes da Silva				
Título do Trabalho:	Avaliação da incerteza associada à tenacidade à fratura obtida via integral J				
Área de concentração:	Materiais e Processos de Fabricação				
Linha de pesquisa:	Tribologia e Materiais				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	2018/00479-8 Avaliação da tenacidade à fratura e da vida remanescente à fadiga através da técnica de indentação instrumentada.				

Reuniu-se por meio de videoconferência a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: Arthur Alves Fiocchi - FEMEC/UFU; Antônio Piratelli Filho - UnB; e Rosenda Valdés Arencibia - FEMEC/UFU, orientadora da candidata.

Iniciando os trabalhos a presidente da mesa, Dra. Rosenda Valdés Arencibia, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu à Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da 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.

05/04/2023 10:15

SEI/UFU - 4376107 - Ata de Defesa - Pós-Graduação



Documento assinado eletronicamente por **Rosenda Valdes Arencibia, Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/03/2023, 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 29/03/2023, às 11:10, 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 **Arthur Alves Fiocchi, Professor(a) do Magistério Superior**, em 30/03/2023, às 08:48, 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](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **4376107** e o código CRC **5DCEB4FD**.

---

Referência: Processo nº 23117.022429/2023-41

SEI nº 4376107

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela vida e pelas infinitas oportunidades de crescimento.

Agradeço aos meus pais, Maria do Carmo Ferreira da Silva e Romeu Antunes da Silva, por estarem ao meu lado sempre e apoiarem todas as minhas escolhas. Agradeço também à minha irmã Jordania Antunes Cunha, meu cunhado Icaro Iury Cunha e meu sobrinho Théo Antunes Cunha por toda força e por todos os momentos de felicidade que me fizeram continuar essa caminhada.

À minha orientadora Professora Rosenda Valdés Arencibia, por toda dedicação, carinho e cuidado realizando uma orientação responsável, leve e criteriosa. Agradeço por sempre motivar a minha carreira acadêmica e profissional sendo um espelho de pessoa e professora.

Aos alunos de graduação Filipe Reis, Vitor Nakayama e Bruno de Oliveira por se dedicarem e acrescentarem no desenvolvimento do presente trabalho. Agradeço toda contribuição nesse desafio.

Aos meus amigos Tamyres Guerra, Guilherme Bernardes, Carol Caetano, Carol Xavier e Thaís Lopes por me apoiarem e me motivarem nessa etapa de suma importância na minha vida. Agradeço por todos os momentos que passamos juntos.

Agradeço também à toda equipe do LTAD.

SILVA, J. A. **Avaliação da incerteza associada à tenacidade à fratura obtida via integral J**. 2023. 120 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

### Resumo

Este trabalho tem como objetivo avaliar a incerteza associada à tenacidade à fratura obtida via ensaios convencionais (Integral J) de acordo com as determinações da norma ASTM E1820 (ASTM, 2020). Para tanto foi efetuado um estudo minucioso do método de ensaio, bem como da instrumentação utilizada. Em seguida foram identificados todos os mensurandos e as variáveis de entrada, bem como os modelos matemáticos para cálculo da incerteza de medição. O método GUM e o de Monte Carlo foram aplicados. Foi desenvolvida e documentada uma metodologia de cálculo utilizando o Microsoft Excel® 2019. Os resultados obtidos mostraram que a incerteza expandida associada à tenacidade à fratura via ensaio Integral J, considerando três corpos de prova fabricados em aço AISI 4340 (28 HRC), é 12,91 kJ/mm<sup>2</sup> representando 8,5 % do valor médio de J (152,18 J/mm<sup>2</sup>) com probabilidade de abrangência de 95,45 %. A maior contribuição neste caso está associada à variabilidade dos valores de J obtidos considerando a realização de três ensaios em condições de repetibilidade. Analisando dados da literatura foi possível observar que esta variabilidade pode gerar uma incerteza expandida de até 14,5 % do valor médio de J.

---

*Palavras-chave: Tenacidade à Fratura. Incerteza de Medição. Integral J. ASTM E1820.*

SILVA, J. A. **Assessment of uncertainty associated with fracture toughness obtained via J-integral**. 2023. 120 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

### **Abstract**

This work aims to evaluate the uncertainty associated with the fracture toughness obtained via conventional tests (J integral) in accordance with the determinations of the ASTM E1820 (ASTM, 2020) Standard. For that, a detailed study of the test method was carried out, as well as the instrumentation used. Then, all measurands and input variables were identified, as well as the mathematical models for calculating the measurement uncertainty. The GUM and Monte Carlo methods were applied. A methodology was developed and documented using Microsoft Excel® 2019. The results obtained showed that the expanded uncertainty associated with fracture toughness obtained via J Integral test, considering three specimens manufactured in AISI 4340 (28 HRC) steel, is 12.91 kJ/mm<sup>2</sup>, representing 8.5 % of the average value of J (152.18 J/mm<sup>2</sup>) with coverage probability of 95.45 %. The greatest contribution in this case is associated with the variability of J values obtained considering three tests performed under repeatability conditions. Analyzing data from the literature, it was possible to observe that this variability can generate an expanded uncertainty of up to 14.5 % of the average value of J.

---

*Keywords: Fracture Toughness, J-integral, Measurement Uncertainty. ASTM E1820.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Esquema representativo dos diferentes tipos de mecânica à fratura (Modificada de ANDERSON, 2005).....	9
Figura 2.2	Os três modos de fratura de uma trinca.....	10
Figura 2.3	Zona plástica na frente da trinca definida inicialmente por Irwin et. al (1958) e Irwin (1960) (Modificada de ANDERSON, 2005) .....	11
Figura 2.4	Relação entre $K_C$ e a espessura do corpo de prova (Modificada de MEDINA, 2014).....	13
Figura 2.5	Geometria e dimensões do corpo de prova SE(B) definidas na norma ASTM E399 (Modificada de ASTM, 2019).....	13
Figura 2.6	Geometria e dimensões do corpo de prova C(T) definidas na norma ASTM E399 (Modificada de ASTM, 2019).....	14
Figura 2.7	Três tipos de curvas carga vs. deslocamento obtidas em um ensaio de tenacidade à fratura de acordo com a norma ASTM E399 (ASTM, 2019) (Modificada de ZHU e JOYCE, 2012).....	14
Figura 2.8	Representação esquemática de um caminho escolhido no método Integral J (Modificada de LOPEZ, 2010).....	16
Figura 2.9	Curva $J_R$ (Modificada de ANDERSON, 2005).....	17
Figura 2.10	Distribuição normal .....	20
Figura 2.11	Distribuição retangular (INMETRO, 2012b modificada).....	20
Figura 2.12	Valores da incerteza padrão (em porcentagem) associada aos parâmetros $a_{0q}$ , $\alpha$ e $\eta$ utilizados nas equações para cálculo da tenacidade à fratura via ensaios CTOD-R e J-R resultantes da pesquisa de Koepke et al. (2023).....	26
Figura 3.1	Dimensões dos corpos de prova C(T) especificados pela ASTM E1820 (ASTM,2018).....	29
Figura 3.2	Geometria e dimensões do corpo de prova para o ensaio de tração com dimensões em mm (ASTM E8, 2016).....	30
Figura 3.3	Diagrama de Ishikawa indicando os fatores de influência na tenacidade à fratura obtida pelo método Integral J.....	33
Figura 3.4	Diagrama de Ishikawa com os fatores de influência associados ao módulo de elasticidade.....	33

Figura 3.5	Diagrama de Ishikawa com os fatores de influência associados ao limite de escoamento.....	33
Figura 3.6	Diagrama de Ishikawa com os fatores de influência associados ao limite de resistência.....	34
Figura 3.7	Diagrama de Ishikawa com os fatores de influência associados ao comprimento da pré trinca. ....	34
Figura 3.8	Diagrama de Ishikawa com os fatores de influência associados às dimensões do corpo de prova. ....	34
Figura 3.9	Diagrama de Ishikawa com os fatores de influência associados à área. ....	35
Figura 3.10	Desenho técnico do corpo de prova C(T) da norma ASTM E1820 – 20a (ASTM,2020).....	35
Figura 4.1	Histograma dos valores simulados de J durante a simulação de Monte Carlo.....	60
Figura 4.2	Histograma dos valores simulados de J durante a simulação de Monte Carlo.....	75
Figura 4.3	Média dos valores de J. ....	77

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Sistemas de medição utilizados na verificação dimensional dos corpos de prova C(T).....	36
Tabela 3.2	Sistemas de medição utilizados na determinação da tenacidade à fratura para os ensaios de Integral J.....	36
Tabela 3.3	Modelos matemáticos utilizados para avaliação da incerteza associada aos mensurandos avaliados durante o controle dimensional e geométrico dos corpos de prova.....	37
Tabela 3.4	Aplicação da lei de propagação de incertezas nos modelos matemáticos.....	38
Tabela 3.5	Modelos matemáticos após o cálculo das derivadas parciais.....	39
Tabela 3.6	Funções utilizada durante a simulação (Excel®, 2019).....	40
Tabela 4.1	Valores obtidos durante a medição do diâmetro (D) do CP do ensaio de tração com paquímetro digital.....	57
Tabela 4.2	Resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada ao diâmetro do CP do ensaio de tração.....	57
Tabela 4.3	Resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada à área da secção transversal do CP do ensaio de tração.....	58
Tabela 4.4	Resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada à força aplicada ao CP do ensaio de tração.....	58
Tabela 4.5	Tabela resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associado à deformação do CP do ensaio de tração.....	59
Tabela 4.6	Resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada ao módulo de elasticidade.....	60
Tabela 4.7	Valores de força de escoamento ( $F_e$ ) gerados pela máquina de ensaio universal durante o ensaio de tração do CP.....	62
Tabela 4.8	Resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada à força de escoamento.....	62
Tabela 4.9	Resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada ao limite de escoamento.....	63
Tabela 4.10	Valores de força máxima ( $F_{máx}$ ) gerados pela máquina de ensaio universal durante o ensaio de tração do CP.....	64

Tabela 4.11	Resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada à força máxima.....	64
Tabela 4.12	Resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada ao limite de resistência.....	65
Tabela 4.13	Valores obtidos durante a medição da espessura (B) do CP C(T) com paquímetro digital.....	65
Tabela 4.14	Resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada a espessura do CP C(T).....	66
Tabela 4.15	Valores obtidos durante a medição de L do CP C(T) com paquímetro digital.....	66
Tabela 4.16	Resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada à L do CP C(T).....	67
Tabela 4.17	Valores obtidos durante a medição do comprimento do entalhe $a_0$ do CP C(T) com o projetor de perfil.....	67
Tabela 4.18	Resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada à $a_0$ do CP C(T).....	68
Tabela 4.19	Valores obtidos durante a medição da largura W do CP C(T) com o projetor de perfil.....	68
Tabela 4.20	Resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada à W do CP C(T).....	69
Tabela 4.21	Valores obtidos durante a medição do LLD do CP C(T) com o projetor de perfil.....	69
Tabela 4.22	Resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada ao LLD do CP C(T).....	70
Tabela 4.23	Valores obtidos durante a medição do COD do CP C(T) com o projetor de perfil.....	70
Tabela 4.24	Resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada ao COD do CP C(T).....	71
Tabela 4.25	Valores obtidos durante a medição da espessura com entalhe lateral (Bn) do CP C(T) com paquímetro digital.....	71
Tabela 4.26	Resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada à espessura com entalhe lateral do CP C(T).....	72
Tabela 4.27	Valores obtidos durante a medição do comprimento da pré trinca do CP C(T) com o microscópio óptico.....	72
Tabela 4.28	Resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada à pré trinca do CP C(T).....	73

Tabela 4.29	Valores obtidos durante a medição do comprimento da pré trinca após o ensaio do CP C(T) com o microscópio óptico.....	74
Tabela 4.30	Resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada à pré trinca após ensaio do CP C(T).....	74
Tabela 4.31	Resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada à área plástica.....	75

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

### Lista de símbolos:

$A$	Área da seção transversal
$a_0$	Comprimento do entalhe
$A_n$	Área do CP do ensaio de tração
$A_{pl}$	Área plástica
$B$	Espessura do corpo de prova
$B_n$	Espessura do corpo de prova com entalhe lateral
$CS$	Coefficiente de sensibilidade
$CP$	Corpo de prova
$D$	Diâmetro do corpo de prova
$d$	Diâmetro do corpo de prova de tração
$DP$	Distribuição de probabilidade
$E$	Módulo de elasticidade
$F$	Força do módulo de elasticidade
$F_e$	Força de elástica
$F_{máx}$	Força máxima
$f(a/W)$	Função geometria
$G$	Taxa de liberação de energia
$GL$	Graus de liberdade
$J$	Integral-J
$J_{IC}$	Tenacidade à fratura de iniciação elastoplástica
$J_{pl}$	Componente plástico da integral J
$k$	Fator de abrangência
$K$	Fator de intensidade de tensão
$K_C$	Fator de intensidade de tensão crítico
$K_I$	Fator de intensidade de tensão do modo I
$K_{IC}$	Tenacidade à fratura no estado plano de deformação
$K_{máx}$	Fator de intensidade de tensão máximo
$K_{mín}$	Fator de intensidade de tensão mínimo
$K_Q$	Tenacidade à fratura condicional
$l$	Comprimento inicial do CP
$L$	Comprimento total
$M$	Mensurando

$n$	Número de leituras
$N$	Distribuição Normal
$\bar{n}$	Vetor normal ao contorno
$P$	Força
$P_{máx}$	Força máxima aplicada
$P_Q$	Força a secante de 5 %
$P_r$	Pré trinca
$R$	Razão de fadiga
$R$	Distribuição retangular
$R^2$	Coefficiente de correlação
$r$	Raio de arredondamento na ponta da trinca
$s$	Desvio padrão da variável
$T$	Distribuição <i>t-Student</i>
$TA$	Tipo de avaliação
$\bar{T}$	Vetor tensão
$u_c$	Incerteza-padrão combinada da variável
$\bar{u}$	Vetor deslocamento na direção $x$
$U$	Incerteza expandida
$U(x)$	Incerteza expandida da variável $x$
$u(x)$	Incerteza-padrão da variável $x$
$VE$	Variáveis de entrada
$v_{ef}$	Graus de liberdade efetivos
$v_{pl}$	Deslocamento plástico
$W$	Largura do corpo de prova
$\bar{X}$	Média aritmética dos valores obtidos durante a medição

#### Lista de símbolos gregos:

$\Delta A$	Correção devido à ampliação da objetiva utilizada
$\Delta C$	Correção devido à calibração do sistema de medição
$\Delta l_{me}$	Correção devido ao desvio de paralelismo para medidas externas para paquímetro digital
$\Delta l$	Diferença do comprimento inicial menos o final
$\Delta K$	Varição do fator de intensidade de tensão
$\Delta R$	Correção devido à resolução do sistema de medição
$\sigma$	Tensão remota atuante

$\sigma_{ys}$	Limite de escoamento
$\nu$	Coeficiente de Poisson

#### Lista de siglas e abreviaturas:

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ASTM	<i>American Standard for Testing and Materials</i>
A(B)	Flexão em forma de arco
A(T)	Tração em forma de arco
COD	Comprimento da abertura do entalhe
C(T)	Compacto de tração
CTOA	<i>Crack Tip Opening Angle</i>
CTOD	<i>Crack Tip Opening Displacement</i>
DC(T)	Compacto de tração circular
GUM	<i>Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement</i>
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
JCGM	<i>Joint Committee for Guides in Metrology</i>
LLD	Comprimento da linha de carga
LTAD	Laboratório de Tecnologia e Atrito e Desgaste
MFLE	Mecânica da Fratura Linear Elástica
MFEP	Mecânica da Fratura Elastoplástica
NBR	Norma Técnica
POP	<i>Procedimento Operacional Padrão</i>
RVDT	<i>Rotary Variable Differential Transformer</i>
SEN(B)	Flexão a três pontos
SNTT	<i>Spiral Notch Torsion Test</i>
SNTT	Teste de Torção em Entalhe Helicoidal

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO I – Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivo Principal .....	2
1.2. Objetivos Secundários .....	2
1.3. Justificativa .....	3
1.4. Contribuição técnico-científica do trabalho.....	4
<b>CAPÍTULO II – Revisão Bibliográfica .....</b>	<b>6</b>
2.1. Mecânica da Fratura .....	6
2.1.1. Fator de intensidade de tensão K.....	9
2.1.2. Integral J.....	15
2.2. Incerteza de medição .....	18
2.2.1. Método GUM .....	18
2.2.2. Método de Monte Carlo .....	23
<b>CAPÍTULO III – Metodologia .....</b>	<b>28</b>
3.1. Ensaio Integral J .....	28
3.2. Identificação dos mensurandos que interferem no cálculo da incerteza associada à tenacidade à fratura obtida via Integral J.....	32
3.3. Identificação e especificação de todos os sistemas de medição utilizados ....	34
3.4. Definição dos modelos matemáticos.....	36
3.5. Cálculo da incerteza padrão associada a todas as variáveis de entrada .....	41
3.6. Cálculo da incerteza padrão combinada e da expandida associada às variáveis de saída .....	42
<b>CAPÍTULO IV – Resultados e Discussões .....</b>	<b>45</b>
4.1. Resultados do cálculo de incerteza associada ao módulo de elasticidade.....	45
4.1.1. Resultados do cálculo da incerteza associada ao diâmetro do CP do ensaio de tração.....	45
4.1.2. Resultados do cálculo da incerteza associada à área da secção transversal do CP do ensaio de tração.....	47
4.1.3. Resultados do cálculo da incerteza associada à força aplicada do CP do ensaio de tração.....	47

4.1.4. Resultados do cálculo da incerteza associada à deformação aplicada do CP do ensaio de tração.....	48
4.1.5. Resultados do cálculo da incerteza associada ao módulo de elasticidade.....	48
4.2. Resultados do cálculo de incerteza associada ao limite de escoamento.....	50
4.2.1. Resultados do cálculo da incerteza associada à força de escoamento.....	50
4.2.2. Resultados do cálculo da incerteza associada ao limite de escoamento.....	51
4.3. Resultados do cálculo de incerteza associada ao limite de resistência.....	52
4.3.1. Resultados do cálculo da incerteza associada à força máxima.....	52
4.3.2. Resultados do cálculo da incerteza associada ao limite de resistência.....	53
4.4. Resultados do cálculo de incerteza associada ao corpo de prova C(T).....	54
4.4.1. Resultados do cálculo da incerteza associada a espessura B.....	54
4.4.2. Resultados do cálculo da incerteza associada ao comprimento total L.....	55
4.4.3. Resultados do cálculo da incerteza associada ao comprimento do entalhe $a_0$ .....	56
4.4.4. Resultados do cálculo da incerteza associada à largura W.....	57
4.4.5. Resultados do cálculo da incerteza associada ao comprimento da linha de carga, LLD.....	60
4.4.6. Resultados do cálculo da incerteza associada ao comprimento da abertura do entalhe, COD.....	60
4.4.7. Resultados do cálculo da incerteza associada à espessura com entalhe lateral $B_n$ .....	60
4.4.8. Resultados do cálculo da incerteza associada ao comprimento da pré trinca.....	61
4.5. Resultados do cálculo de incerteza associados aos resultados do ensaio Integral J.....	62
4.5.1. Resultados do cálculo da incerteza associada ao comprimento da pré trinca após ensaio.....	62

4.5.2. Resultados do cálculo da incerteza associada à área plástica.....	63
4.5.3. Resultados do cálculo da incerteza associada à J.....	64
4.6. Resultados da avaliação da repetibilidade entre os CPs.....	65
<b>CAPÍTULO V – Conclusões .....</b>	<b>68</b>
<b>CAPÍTULO VI – Propostas para Trabalhos Futuros .....</b>	<b>70</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>71</b>
<b>ANEXOS</b>	
<b>Anexo I - Certificado de Calibração da Instron.....</b>	<b>97</b>
<b>Anexo II - Certificado de Calibração do Paquímetro Digital.....</b>	<b>101</b>
<b>Anexo III - Certificado de Calibração do Projetor de Perfil.....</b>	<b>103</b>
<b>Anexo IV - Certificado de Calibração do Extensômetro.....</b>	<b>107</b>
<b>Anexo V - Certificado de Calibração do RVDT .....</b>	<b>111</b>
<b>Anexo VI - Certificado de Calibração do Extensômetro CP117855 .....</b>	<b>115</b>
<b>Anexo VII - Certificado de Calibração do Termohigrômetro Digital .....</b>	<b>119</b>



# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

A resistência de um material à propagação de trinca é a definição da tenacidade à fratura e é uma das propriedades mecânicas mais importantes na avaliação da integridade estrutural e previsões de vida à fadiga de estruturas com defeitos (JEON et al., 2017; CHEN et al., 2018; Zhang et al., 2019). Adicionalmente, Zhang et al. (2020) destacam que esta é essencial na pesquisa da propagação de trincas por fadiga e vida à fadiga.

A tenacidade à fratura pode ser determinada por meio de ensaios convencionais como o método da Integral J de acordo com as determinações da norma ASTM E1820 (ASTM, 2020) o fator de intensidade de tensão ( $K$ ) e o deslocamento de abertura na ponta da trinca (*CTOD - Crack Tip Opening Displacement*). A determinação da tenacidade à fratura é essencial para projetar e fabricar estruturas de engenharia, pois sua falha pode causar perda econômica e de vidas humanas (AKÇAY e OTERKUS, 2021). Segundo Launey e Ritchie (2009), a maioria dos materiais é limitada por sua resistência à fratura. Assim, as estruturas mais críticas, como pontes, navios, vasos de pressão nuclear e estruturas *offshore*, são fabricadas a partir de materiais de alta tenacidade à fratura. Portanto, uma determinação precisa e confiável da tenacidade à fratura é de grande importância para a avaliação de falhas de equipamentos (ZHANG et al., 2020). Acrescenta-se a necessidade de avaliar e declarar a incerteza associada aos valores de tenacidade.

A Integral J é baseada em conceitos físicos e se fundamenta em equações de balanço de energia (RODRIGUES, 2020). Esta técnica pode ser entendida como um balanço energético que objetiva 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”.

De acordo com Koepke et al. (2023), nenhum dos métodos existentes fornece orientação para estimar a incerteza dos resultados da medição associados a tenacidade à fratura. Estes autores destacam que devido à natureza complexa do procedimento de ensaio e dos cálculos, as técnicas tradicionais de propagação de erros encontradas no GUM (*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*) não são práticas.

Na literatura estudada, merece destaque o trabalho de Koepke et al. (2023). Esses autores aplicaram satisfatoriamente o método de Monte Carlo para calcular a incerteza padrão associada aos parâmetros previstos de profundidade inicial da trinca  $a_{0q}$ ,  $\alpha$  e  $\eta$  usados nas equações para cálculo da tenacidade à fratura via deslocamento da abertura da ponta da trinca nos ensaios CTOD e integral J. Eles também investigaram o efeito de diferentes distribuições de probabilidade (normal, retangular e triangular) das tolerâncias especificadas para os mensurandos e variáveis de entrada nos resultados.

## 1.1 Objetivo principal

O objetivo principal desta dissertação é determinar a incerteza associada à tenacidade à fratura obtida via ensaios convencionais (Integral J) de acordo com as determinações da norma ASTM E1820 (ASTM, 2020).

## 1.2 Objetivos secundários

- a) Desenvolver, validar e documentar uma metodologia para cálculo da incerteza de medição associada à tenacidade à fratura obtida via ensaios convencionais (Integral J).
- b) Identificar os fatores que contribuem para a incerteza associada à tenacidade à fratura.
- c) Determinar a contribuição dos fatores de influência na incerteza final associada à tenacidade à fratura e propor alternativas para reduzir seus efeitos.
- d) Contribuir para a rastreabilidade metrológica dos valores de tenacidade à fratura, visando o atendimento da NBR ISO/IEC 17025 (2017).

### 1.3 Justificativa

A tenacidade à fratura é uma propriedade mecânica utilizada para avaliar a capacidade que o material possui de resistir à propagação de uma trinca ou para que procedimentos de manutenção sejam realizados de forma adequada. Em alguns casos, ainda existe a necessidade de estimar a vida remanescente de componentes que estão em uso. Para que essas decisões sejam tomadas é necessário que os resultados de medição sejam confiáveis. A garantia da confiabilidade metrológica de um resultado de medição requer a garantia da rastreabilidade metrológica estabelecida na NBR ISO/IEC 17025 (ABNT, 2017).

De acordo com o Vocabulário Internacional de Metrologia (INMETRO, 2012), a rastreabilidade metrológica é definida como a propriedade de um resultado de medição pela qual tal resultado pode ser relacionado a uma referência através de uma cadeia ininterrupta e documentada de calibrações, cada uma contribuindo para a incerteza de medição.

A declaração da incerteza de medição é tão importante quanto a apresentação do resultado de medição em si (DÉSEFANT e PRIEL, 2017). A comparação entre resultados de medição entre si ou com valores de referência especificados em normas técnicas, em manuais dos fabricantes ou em documentos emitidos por órgãos regulamentadores são impossíveis de serem realizadas sem que a incerteza seja determinada (BIPM et al., 2008). A incerteza de medição indica de forma quantitativa a qualidade dos mesmos. Desta forma, aqueles que utilizam estes resultados podem avaliar sua confiabilidade (BIPM et al., 2008). Além disso, a avaliação da incerteza de medição é crucial durante o controle dimensional e geométrico de peças, sendo um dos conceitos mais importantes na especificação da geometria do produto (WEN et al., 2013).

Seja qual for o ensaio utilizado para determinação da tenacidade à fratura, a avaliação da incerteza associada não é uma tarefa simples devido principalmente ao número significativo de mensurandos envolvidos no cálculo. Cada um destes mensurandos é determinado de forma diferente, utilizando modelos matemáticos distintos. Adicionalmente, alguns desses modelos matemáticos são de média complexidade impossibilitando a aplicação do método GUM. Isso torna o cálculo de incerteza associada à tenacidade à fratura um desafio (KOEPEKE et al., 2023), difícil de ser superado por muitos. Adicionalmente, os autores destacam a dificuldade para calcular a incerteza neste caso utilizando as técnicas tradicionais de propagação de erro. De acordo do Koepke et al. (2023), a incerteza associada à tenacidade à fratura é um componente chave que falta nos protocolos de ensaios amplamente aceitos.

Koepke et al. (2023) aplicaram de forma satisfatória o método de Monte Carlo para calcular a incerteza padrão associada aos parâmetros  $a_{0q}$ ,  $\alpha$  e  $\eta$  utilizados nas equações para cálculo da tenacidade à fratura via ensaios CTOD-R e J-R. Estes autores também investigaram o efeito de diferentes distribuições de probabilidades (normal, retangular e

triangular) das tolerâncias especificadas para os mensurandos e as variáveis de entrada nos resultados. A abordagem desenvolvida por Koepke et al. (2023) apresenta limitações, quais sejam: i) não consideraram os parâmetros metrológicos dos sistemas de medição e sensores utilizados no controle dimensional e geométrico dos corpos de prova, bem como na realização do ensaio e ii) não declararam a incerteza associada à tenacidade à fratura.

No caso particular dos ensaios Método Teste de Torção em Entalhe Helicoidal (SNTT), Wang e Liu (2004) inferiram que a incerteza associada à tenacidade à fratura no estado plano de deformação ( $K_{IC}$ ) fornecido por este método deveria ser menor que a incerteza associada aos resultados obtidos pelo método convencional. Entretanto, estes autores não declararam a incerteza associada aos resultados e, conseqüentemente, os valores de  $K_{IC}$  não são rastreáveis metrologicamente.

Rodrigues (2020) avaliou a incerteza associada à tenacidade à fratura do aço AISI 4340 temperado e revenido (45 HRC) obtida por meio de ensaios SNTT utilizando os métodos de Monte Carlo e GUM. Como resultado deste estudo tem-se que a média do  $K_{IC}$  foi de  $102,2 \text{ MPa}\sqrt{m}$  e a incerteza expandida de  $1,8 \text{ MPa}\sqrt{m}$ . Esta incerteza representa 1,8 % da média, indicando uma excelente qualidade dos valores de  $K_{IC}$ .

#### 1.4 Contribuição técnico-científica do trabalho

Os resultados obtidos neste trabalho ampliam o estado atual de conhecimento para o cálculo de incerteza associada à tenacidade à fratura de materiais obtidos seguindo as determinações da norma ASTM E1820 (ASTM, 2020). Adicionalmente se espera:

- Desenvolver, documentar e validar uma metodologia para o cálculo da incerteza associada à tenacidade à fratura obtida via ensaios convencionais (Integral J);
- Contribuir para a tomada de decisões de previsão da vida remanescente e de manutenção dos componentes em uso.

Para melhor compreensão do processo de estudo e pesquisa, este trabalho está organizado da seguinte forma:

No Capítulo II, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o assunto dando ênfase na mecânica da fratura, no ensaio convencional de medição da tenacidade à fratura (Integral J), e na incerteza de medição.

No Capítulo III, é apresentado o desenvolvimento das metodologias para determinação da tenacidade à fratura e o cálculo da incerteza de medição associada a tenacidade. Em

seguida são definidos os modelos matemáticos necessários para avaliação da incerteza de medição via GUM ou Monte Carlo.

No Capítulo IV, apresentam-se os resultados obtidos acompanhados das respectivas discussões.

No Capítulo V, se encontram as principais conclusões do trabalho e as propostas para trabalhos futuros.

## **CAPÍTULO II**

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo, são apresentados os fundamentos teóricos relacionados ao tema incerteza de medição, enfatizando os principais conceitos e os métodos de cálculo. Também são abordados outros temas considerados relevantes para o desenvolvimento desta pesquisa, quais sejam: mecânica da fratura e integral J. Embora esta dissertação vise a avaliação da incerteza de medição associada à tenacidade à fratura, optou-se por apresentar primeiro a revisão da literatura para a tenacidade.

#### **2.1 Mecânica da Fratura**

A ocorrência de fraturas vem sendo um obstáculo relutante para a humanidade desde o 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, essa dificuldade aumenta gradualmente, pois tecnologias mais complexas implicam, conseqüentemente, em fraturas e comportamentos estruturais mais difíceis de serem previstos (RODRIGUES, 2020). 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.

Duas causas podem ser citadas como as responsáveis pela maioria das fraturas estruturais (ANDERSON, 2005): negligência durante o projeto, construção ou operação da estrutura; e aplicação de um processo ou material novo, o que implica em comportamentos imprevisíveis ou até mesmo indesejáveis. A primeira causa é frequente, tendo em vista que existem alguns processos de fabricação, que são muito complexos e que facilmente resultam em microestruturas não previstas nos componentes fabricados. Além disso, as simulações durante o projeto e construção das estruturas nem sempre conseguem reproduzir de forma completa as condições de serviço. Em muitos casos, parte-se de pressupostos e aproximações que podem implicar em erros. Já a segunda causa tem se tornado habitual, pois a inovação tecnológica e o desenvolvimento de novos materiais têm propiciado comportamentos estruturais que são complexos e difíceis de serem estimados.

Ao longo do desenvolvimento da mecânica da fratura, diferentes parâmetros foram criados 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 - Crack Tip Opening Displacement*).

Irwin (1957) propôs o primeiro conceito do fator  $K$  como sendo o parâmetro que é capaz de descrever a intensidade dos campos elásticos desenvolvidos na ponta de uma trinca, e sua utilização simboliza a mecânica da fratura linear. A integral-J foi proposta por Rice (1968) e, diferentemente do que Irwin (1957) propôs, esse parâmetro descreve a intensidade dos campos elastoplásticos que se desenvolvem na ponta de uma trinca. Esse conceito está diretamente relacionado à mecânica da fratura elastoplástica. Wells (1963) foi o primeiro a propor o conceito do *CTOD*, o qual é normalmente utilizado como parâmetro de fratura, e em prática, pode ser utilizado como um correspondente do fator  $K$  ou da integral-J. Métodos experimentais distintos foram desenvolvidos para determinação de cada um desses parâmetros capazes de descrever a 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 do material: o comportamento de fratura, o comportamento da deformação e o efeito da restrição da geometria.

O comportamento de fratura remete aos micromecanismos 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, 2019).

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  $CTOD$  ( $\delta$ ).

A integral- $J$  quantifica a 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, 2020) foi desenvolvida com o objetivo de regulamentar a determinação das curvas de tenacidade de iniciação elastoplástica ( $J_{IC}$ ), assim como a curva  $J$ - $R$ . A norma ASTM E1290 (ASTM, 2013) foi desenvolvida para avaliar o  $CTOD$ .

Outro fator para analisar o desempenho do material em um ensaio de tenacidade à fratura é o comportamento da resistência e deformação do material, o qual pode ser caracterizado como elástico linear, elástico não linear ou elastoplástico. Normalmente, esse comportamento é de suma importância na determinação de qual método de ensaio de fratura deve ser adotado, e consequentemente, qual parâmetro para descrever a tenacidade do material será utilizado.

O uso desses métodos da mecânica da fratura, além de outros aqui não citados, como ( $CTOA$  - *Crack Tip Opening Angle*), permite a utilização da tenacidade à fratura como um parâmetro de projeto para um componente mecânico ou estrutural. Porém, as dimensões dos corpos de prova dos ensaios podem influenciar fortemente as condições de tensão na ponta da trinca, resultando em valores equivocados (ZHU e JOYCE, 2012). O que acontece é que, caso haja elevada restrição geométrica, as tensões atuantes na ponta da trinca são mais altas o que pode promover uma fratura mais frágil, ou, ainda, diminuir a área sob a curva de tenacidade à fratura dúctil do material. Por outro lado, caso haja baixa restrição, menores tensões podem ser observadas na ponta da trinca, o que tende a minimizar a possibilidade de ocorrer fratura frágil, bem como, aumentar a área sob a curva de tenacidade à fratura dúctil do material.

Essa restrição geométrica, geralmente, é especificada em função do estado de tensão que esta gera na ponta da trinca, quais sejam, plano de deformação ou plano de tensão,

sendo o primeiro aquele com menor valor de tenacidade à fratura associado. Normalmente, a fim de reduzir os efeitos das dimensões do corpo de prova, as normas ASTM E399 (ASTM, 2019) e ASTM E1820 (ASTM, 2020) definem faixas limites para as dimensões da trinca inicial, ligamento e espessura. Entretanto, apesar das práticas adotadas para reduzir este efeito, as dimensões do corpo de prova contribuirão para a incerteza associada à tenacidade à fratura.

Como mostra a Fig. 2.1, 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).

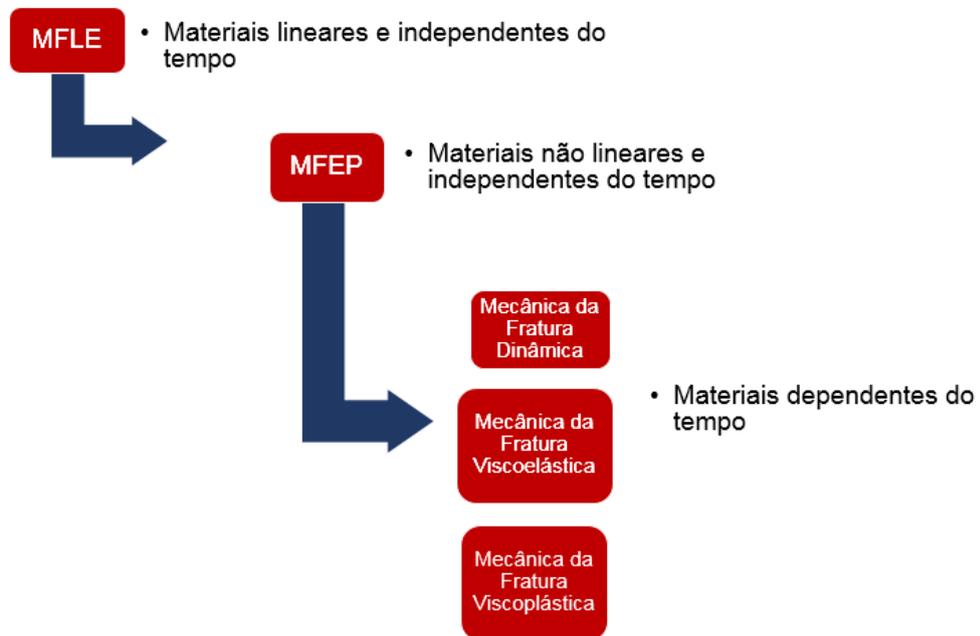


Figura 2.1 - Esquema representativo dos diferentes tipos de mecânica à fratura (Modificada de ANDERSON, 2005).

### 2.1.1 Fator de intensidade de tensão $K$

Os conceitos de mecânica da fratura precedentes ao ano de 1960 tratam apenas dos materiais que seguem a Lei de Hooke, ou seja, materiais chamados lineares e que se caracterizam como aqueles que falham de forma frágil, estabelecendo a MFLE. O parâmetro que é utilizado na MFLE para avaliar a tenacidade à fratura de materiais metálicos é o fator de intensidade de tensão,  $K$ .

De acordo com López (2010 apud Westergaard, 1927) definiu que para verificar as distribuições de tensões existentes na ponta de uma trinca deve-se dividir o modo com que as superfícies da trinca se movimentam em três tipos (Fig. 2.2). O modo I é caracterizado pela

presença de deslocamentos locais na direção  $y$  que são simétricos em relação aos planos  $x-y$  e  $x-z$ , sendo ainda o mais frequente e fácil de simular em ensaios de laboratório. Já no modo II, o deslocamento que ocorre é relativo entre as superfícies da fratura, ocorrendo ao longo do eixo  $x$  e é simétrico em relação ao plano  $x-y$  e assimétrico em relação ao plano  $x-z$ . O modo III, chamado de modo de torção, é caracterizado por deslocamentos locais na direção  $z$  e é assimétrico em relação aos planos  $x-y$  e  $x-z$ .

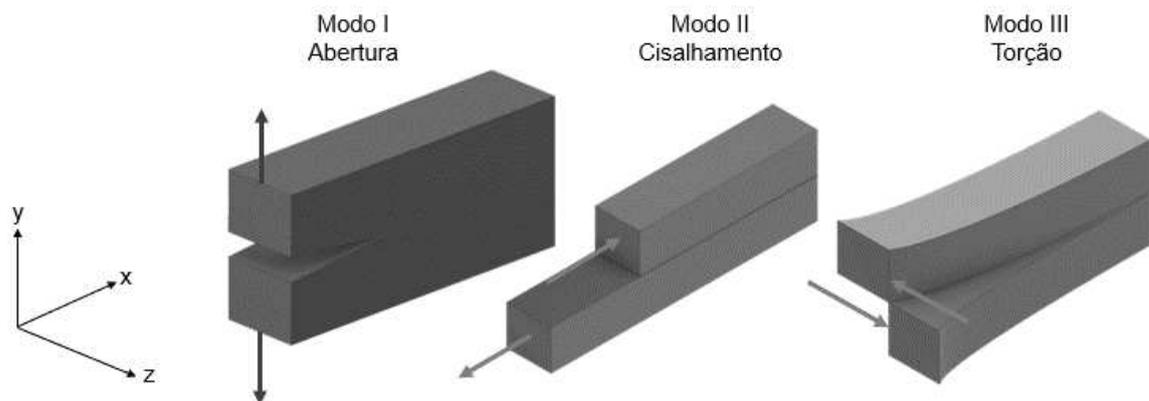


Figura 2.2 - Os três modos de fratura de uma trinca.

A cada um desses modos de fratura corresponde um campo de tensões diferente e, por consequência, um fator de intensidade de tensão  $K$  singular, conhecidos como  $K_I$ ,  $K_{II}$  e  $K_{III}$ , respectivamente para os modos I, II e III. Existem, porém, casos em que se pode tratar o campo de tensões na ponta da trinca em função de dois ou dos três tipos de modo de fratura, o chamado modo misto.

Irwin (1957) e Williams (1957) obtiveram um equacionamento capaz de relacionar o valor de  $K_I$  com o campo de tensão em uma trinca, considerando uma trinca ao longo da espessura e de comprimento  $2a$  localizada no meio de uma placa infinita submetida à uma tensão remota  $\sigma$ , como mostra a (Eq. (2.1)).

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

Na Equação (2.1),  $i$  e  $j$  denotam as coordenadas retangulares  $x$  e  $y$  ou as coordenadas polares  $r$  e  $\theta$  considerando a origem na ponta da trinca,  $f_{ij}(\theta)$  são as funções angulares de tensão,  $r$  é distância da ponta da trinca e  $K_I = \sigma\sqrt{\pi a}$ . O equacionamento de Williams (1957) considerava além do termo da Eq. (2.1), termos de ordem superior. Esse segundo termo foi denotado, a posteriori, como tensão-T. A Equação (2.1) indica o campo elástico localizado na

ponta da trinca é singular, tendo em vista que à medida que  $r$  tende a zero, as tensões tendem ao infinito.

Entretanto, o que se observa na realidade é que não é possível obter tensões infinitas na ponta da trinca. Mesmo para materiais que possuem baixa capacidade de se deformar, pequenas deformações plásticas geradas na ponta da trinca, mantêm as tensões finitas. Dessa forma, Irwin et al. (1958) e Irwin (1960) obtiveram uma estimativa para o tamanho da zona plástica localizada na frente da ponta da trinca ( $r_y$ ), como indica a Eq. (2.2) e ilustra a Fig. 2.3. Na Equação (2.2),  $\sigma_{ys}$  é o limite de escoamento do material.

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

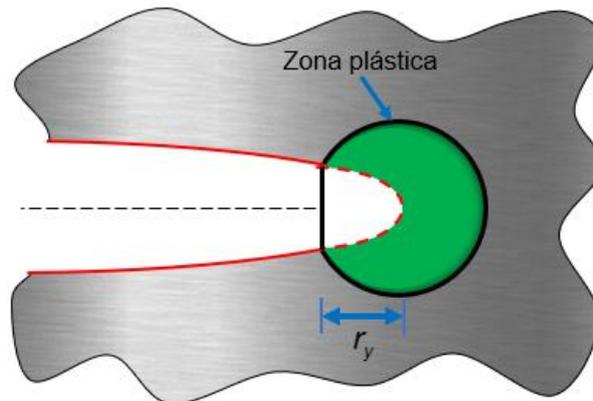


Figura 2.3 - Zona plástica na frente da trinca definida inicialmente por Irwin et al. (1958) e Irwin (1960) (Modificada de ANDERSON, 2005).

Vale ressaltar que a Eq. (2.2) é estritamente correta apenas para aqueles materiais que apresentam um comportamento com pequena escala de escoamento. Caso o material tenha comportamento plástico mais acentuado, o tamanho da zona plástica é maior, sendo aproximadamente o dobro de  $r_y$ .

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)).

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

Na Equação (2.3),  $E$  é o módulo de elasticidade e  $\nu$  é o coeficiente de Poisson do material.

As tensões ou deformações na ponta da trinca podem se elevar até um valor crítico. A partir desse valor,  $K_I$  passa a ser denominado  $K_C$  e a fratura do material pode ocorrer. Irwin et. al (1958) mostraram ainda que para um mesmo material, há uma dependência do valor de  $K_C$  com a espessura do corpo de prova. Essa dependência está diretamente relacionada às restrições de plasticidade que ocorrem na ponta da trinca. Sendo que, à medida que a espessura do corpo de prova aumenta, o valor de  $K_C$  diminui até atingir estabilidade, em função da predominância do estado plano de deformação. O ponto no qual ocorre essa estabilidade de  $K_C$  determina o  $K_{IC}$  do material, conhecido como tenacidade à fratura no estado plano de deformação para o modo I de fratura, como mostra a Fig. 2.4. Esse fator representa o valor mínimo de tenacidade que qualquer material possui, e por isso, é um parâmetro muito útil para projetos de componentes mecânicos e estruturais. Posteriormente, foi definido que para corpos de prova com pequenas espessuras, há a predominância do estado plano de tensão, e que para corpos de prova com espessuras maiores, há a predominância do estado plano de deformação.

Após todo o trabalho desenvolvido pelos estudiosos, principalmente Irwin, a *American Society for Testing and Materials* (ASTM), foram regulamentadas normas para padronização da definição de  $K_{IC}$ , bem como métodos e corpos de prova para ensaios de determinação experimental do valor desse parâmetro (RODRIGUES, 2020).

A norma ASTM E1823 (ASTM, 2013) definiu, em sua primeira edição em 1996,  $K_{IC}$  como sendo a resistência à propagação de uma trinca quando um estado plano de deformação é verificado em modo I de falha. Ainda, as taxas de carregamento são baixas sobre uma predominância do comportamento linear elástico do material, não sendo necessária qualquer correção em relação à presença de uma zona plástica na frente da trinca. Entretanto, a norma que regulamenta o método de determinação de  $K_{IC}$ , a ASTM E399 (ASTM, 2019), foi pela primeira vez publicada ainda em 1972.

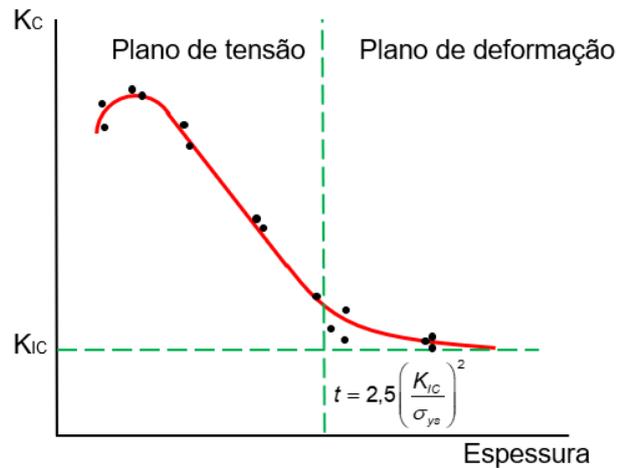


Figura 2.4 - Relação entre  $K_C$  e a espessura do corpo de prova (Modificada de MEDINA, 2014).

A norma ASTM E399 (ASTM, 2019) aborda a adoção de cinco tipos de corpos de prova para determinar o valor de  $K_{IC}$  quais sejam: flexão a três pontos, SEN(B); compacto de tração, C(T); compacto de tração circular DC(T); tração em forma de arco, A(T); e flexão em forma de arco A(B). Os mais utilizados atualmente são o SEN(B) e o C(T), cujas geometrias são mostradas nas Figs. 2.5 e 2.6, respectivamente. A norma regulamente ainda que, prévio ao ensaio de tenacidade, é necessário a realização de um processo de abertura de pré-trinca por fadiga. Ao final desse processo, a relação entre a trinca inicial (comprimento do entalhe somado ao comprimento da pré-trinca aberta por fadiga) e a largura do corpo de prova ( $W$ ) deve permanecer entre 0,45 e 0,55.

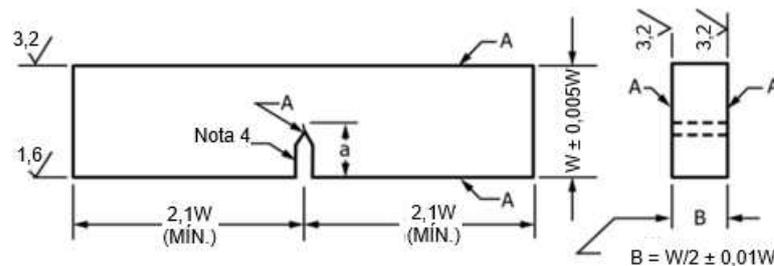


Figura 2.5 - Geometria e dimensões do corpo de prova SE(B) definidas na norma ASTM E399 (Modificada de ASTM, 2019).

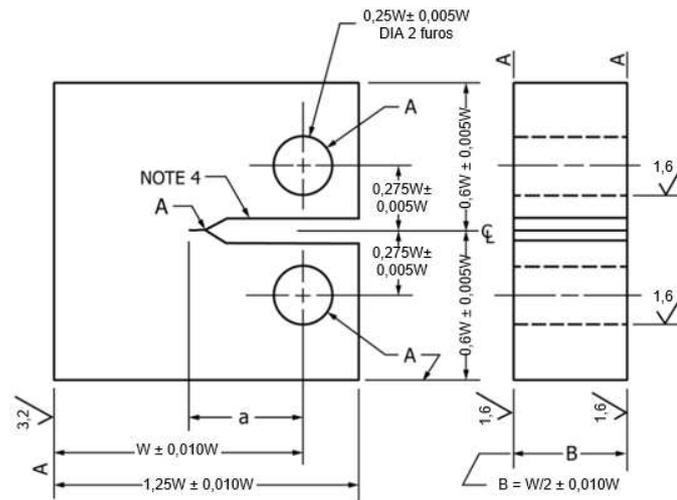


Figura 2.6 - Geometria e dimensões do corpo de prova C(T) definidas na norma ASTM E399 (Modificada de ASTM, 2019).

Na Figura 2.7 mostra três tipos comuns de curvas de carga vs. deslocamento obtidos em ensaios seguindo a norma ASTM E399 (ASTM, 2019). É possível notar a definição de um parâmetro  $P_Q$  para cada um dos tipos por meio de uma secante a 5 % da linha que denota o comportamento linear do material. Essa linha secante a 5 % é utilizada, pois é por meio dela que se pode definir um  $K_{IC}$  com 2 % ou menos de propagação de trinca. No tipo I, o material desvia levemente da linearidade antes de atingir o máximo de carga ( $P_{máx}$ ), e nesse tipo  $P_Q$  é igual à carga em que a secante a 5 % toca a curva. Para o tipo II, há uma pequena queda na carga em função de um crescimento instável de trinca e, portanto,  $P_Q$  é definido como sendo a carga a partir da qual ocorre essa queda. No tipo III, o material não sai da linearidade, e  $P_Q$  é definido como sendo  $P_{máx}$ . Por meio de  $P_Q$  é possível determinar a tenacidade à fratura condicional ( $K_Q$ ), como mostra a (Eq. (2.4)).

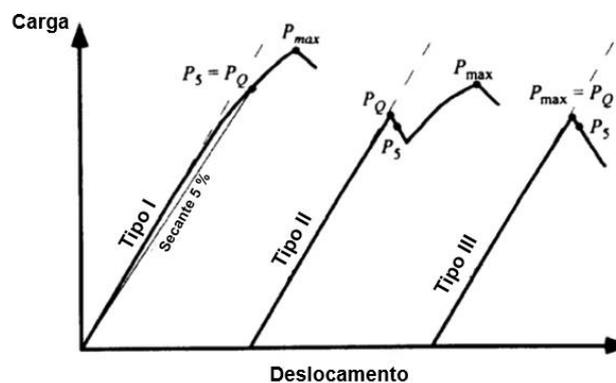


Figura 2.7 - Três tipos de curvas carga vs. deslocamento obtidas em um ensaio de tenacidade à fratura de acordo com a norma ASTM E399 (ASTM, 2019) (Modificada de ZHU e JOYCE, 2012).

$$K_Q = \frac{P_Q f(a/w)}{B\sqrt{w}} \quad (2.4)$$

Na Equação (2.4),  $B$  é a espessura do corpo de prova,  $W$  é a largura do corpo de prova e  $f(a/W)$  é uma função dependente da relação entre o comprimento de trinca inicial e a largura do corpo de prova ( $a/W$ ). A função  $f(a/W)$  varia de acordo com o tipo de corpo de prova ensaiado.

Além disso, como já dito anteriormente, o valor de  $K_{IC}$  diminui à medida que se eleva a espessura do corpo de prova, até o momento em que passa a predominar o estado plano de deformação e é possível determinar o valor de  $K_{IC}$ . Dessa forma, a norma ASTM E399 (ASTM, 2019) regulamenta as dimensões do corpo de prova para que se obtenha corretamente  $K_{IC}$ . Para tanto duas imposições propostas por Brown e Srawley (1966) e Srawley et al. (1967), juntamente com aquela que determina a faixa de  $a/W$  entre 0,45 e 0,55, são responsáveis por validar o resultado do ensaio. Nas Equações (2.5) e (2.6) são mostradas essas imposições. Verificada a validade do ensaio,  $K_Q$  pode enfim ser definido como o  $K_{IC}$  do material ensaiado.

$$B, a, (W - a) \geq 2,5 \left( \frac{K_Q}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (2.5)$$

$$P_{m\acute{a}x} \leq 1,1P_Q \quad (2.6)$$

### 2.1.2 Integral J

Diferentemente da MFLE, na qual uma limitação muito importante é a consideração de que não ocorre deformação plástica na ponta da trinca, a Mecânica da Fratura Elastoplástica possibilita efetuar o estudo do desenvolvimento da trinca e a tenacidade à fratura considerando que a ponta da trinca se deforma plasticamente (HAAG, 2012). A MFEP dispõe de duas abordagens a serem seguidas: o método CTOD e o método da Integral J. O primeiro é baseado em conceitos físicos, enquanto o segundo se fundamenta em equações de balanço de energia.

Anderson (2005) afirma que ambos os métodos (CTOD e Integral J) são capazes de prover parâmetros que podem ser utilizados como critérios na análise de fraturas. Além disso, seus valores críticos manifestam baixa dependência das dimensões do corpo de prova em questão, logo a MFEP apresenta limites dimensionais menos severos que a MFLE.

Baseado nos conceitos da teoria da plasticidade, Rice (1968) desenvolveu o método da Integral J, a qual pode ser entendida 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”. Na Equação (2.7) é mostrada a formulação da Integral J obtida por Rice (1968).

$$J = \int_{\Gamma} \left( W dy - \bar{T} \cdot \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) ds \quad (2.7)$$

Na Equação 2.7,  $\Gamma$  é o contorno escolhido a ser seguido (Fig. 2.8), 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,  $\bar{T}$  é o vetor tensão definido pela normal  $\bar{n}$  ao contorno,  $\bar{u}$  é o vetor deslocamento na direção  $x$  e  $s$  é o comprimento do caminho escolhido.

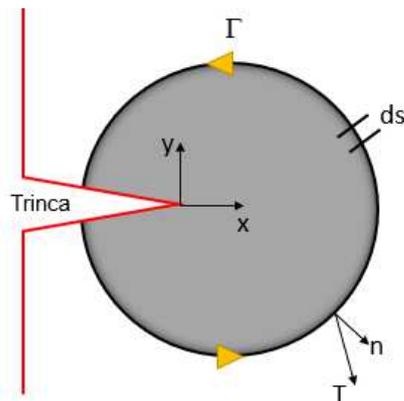


Figura 2.8 - Representação esquemática de um caminho escolhido no método Integral J (Modificada de LOPEZ, 2010).

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.

Assim como no ensaio de determinação de  $K_{IC}$ , no ensaio para obter a integral J é necessário medir a força aplicada e o deslocamento na linha de aplicação da força. A norma ASTM E1820 (ASTM, 2020) 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 mostrada a Fig. 2.9. 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).

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, quebrado e o comprimento da trinca medido na superfície de fratura. Cada um deles é utilizado para gerar um único ponto na curva  $J-R$ . A norma ASTM E1820 (ASTM, 2020) prevê que nesse ensaio é determinado o  $J_{IC}$  no início de propagação dúctil e, portanto, não é necessária uma curva  $J-R$  completa.

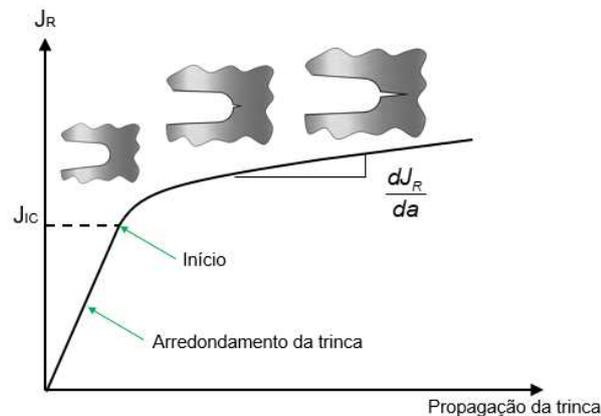


Figura 2.9 - Curva  $J_R$  (Modificada de ANDERSON, 2005).

Para o ensaio de um único corpo de prova, deve ser obtida a curva  $J-R$  completa. Para tanto, dois métodos foram desenvolvidos com os comprimentos de trinca sendo monitorado durante o ensaio. O primeiro e mais utilizado é o método da flexibilidade elástica com descarregamento, o qual utiliza as propriedades elásticas do corpo de prova para avaliar o comprimento da trinca. Foi proposto pioneiramente por Clarke et al. (1976) e posteriormente padronizado pela norma ASTM E813 (ASTM, 1981). Joyce e Gudas (1979) aprimoraram esse método ao desenvolverem um programa computacional interativo para a realização de uma série de ensaios para avaliação da flexibilidade elástica do corpo de prova. Atualmente a norma ASTM E1820 (2020) abrange as regulamentações para esse método, definindo como deve ser realizada a medição do comprimento da trinca instantâneo e a construção da curva  $J-R$ .

Medina (2014) alega que utilizar o valor de  $J_{IC}$  como um limitante de projeto é muito conservador, tendo em vista que, teoricamente, à medida que a trinca cresce, ocorre o aumento da resistência, o que é excluído das considerações da Integral  $J$ .

## 2.2 Incerteza de Medição

De acordo como Vocabulário Internacional de Metrologia, incerteza de medição consiste em um parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas (INMETRO, 2012). Assim sendo, ela é empregada para indicar a qualidade de uma medição. Todo resultado de medição tem uma incerteza associada (FAZANI et al., 2022).

O *Joint Committee for Guides in Metrology* (JCGM) (BIPM et al., 2008) declara que a incerteza do resultado de uma medição reflete a falta de conhecimento exato do valor do mensurando. Portanto, a incerteza de medição é uma indicação quantitativa que reflete a qualidade do resultado de uma medição, de forma a garantir às pessoas que o utilizam uma confiabilidade relevante. De acordo com o JCGM 100 (BIPM et al., 2008), para determinar a incerteza de medição deve-se definir corretamente o mensurando e após isso, identificar todas as variáveis que podem afetar o resultado de medição.

O cálculo da incerteza é relativamente simples, mas, dependendo do propósito de uso e do nível de exatidão requerido para uma análise, a definição do mensurando e a obtenção da incerteza associada a este pode se tornar bastante complexa (DIAS, 2016). De acordo com Valdés et al. (2019), uma das etapas mais complexas na avaliação da incerteza está relacionada à identificação das variáveis de entrada ou fatores de influência que afetam o resultado da medição.

Existem métodos padronizados para a estimativa da incerteza de medição que são utilizados por profissionais e pesquisadores de todo o mundo. O mais conhecido deles é o método GUM, descrito no Guia para a Expressão da Incerteza de Medição (*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*), publicado na ISO (*International Organization for Standardization*) em parceria com outras organizações.

Utilizando o método GUM é possível estimar a incerteza em diversos processos de medição. No entanto, quando os cálculos são muito complexos para serem efetuados analiticamente, emprega-se o método de Monte Carlo. Este se baseia em simulações computacionais e se tornou popular devido ao aumento da capacidade de processamento dos computadores pessoais. A seguir, são detalhados os métodos GUM e Monte Carlo para o cálculo da incerteza de medição.

### 2.2.1 Método GUM

O método de cálculo de incerteza de medição apresentado no GUM tem como base a definição das variáveis que exercem alguma influência sobre o processo de medição. Para obter o valor da incerteza, deve-se, portanto, conhecer a respeito das fontes que, direta ou indiretamente, fazem com que a indicação do sistema de medição não corresponda

exatamente ao valor verdadeiro do mensurando. Couto (2002) define que a avaliação da estimativa da incerteza de medição pelo método clássico definido pelo guia ISO GUM pode ser feita a partir das etapas básicas: avaliação das fontes de incertezas padrão das grandezas de entrada; determinação da incerteza padrão combinada; cálculo dos graus de liberdade efetivos; determinação da incerteza expandida. Nesse caso, adota-se um modelo matemático que combina todas as variáveis e estabelece as relações entre elas. Nos casos mais simples, o modelo consiste na soma algébrica das variáveis de influência identificadas.

Cada variável de entrada possui sua incerteza-padrão  $u(x)$  associada, sendo essas incertezas caracterizadas por apresentarem probabilidade de abrangência igual a 68,27 %. Como a obtenção dos valores das variáveis de influência pode ocorrer de formas distintas, as avaliações das incertezas são classificadas como Tipo A ou Tipo B.

A avaliação do Tipo A é empregada quando é possível realizar uma análise estatística da variável analisada. Nesse caso, calcula-se a média e o desvio padrão de uma amostra de valores disponíveis, sendo o desvio padrão utilizado na equação para obtenção da incerteza-padrão (Eq. (2.8)).

$$u(x) = \sqrt{\frac{s^2}{n}} \quad (2.8)$$

Na Equação (2.8),  $s$  é o desvio padrão das leituras efetuadas e  $n$  o número de leituras efetuadas.

É válido destacar que as variáveis que são avaliadas desta maneira possuem uma distribuição de probabilidade normal ou *T-Student*. A variabilidade das leituras efetuadas para a determinação do valor do mensurando é um exemplo de variável de influência para a qual se aplica a avaliação do Tipo A. Como se recomenda efetuar no mínimo cinco leituras para determinar o valor de indicação fornecido por um sistema ou instrumento de medição, temos à disposição dados suficientes para a análise estatística requerida.

Segundo o INMETRO (2008), uma avaliação Tipo A da incerteza padrão é aquela obtida de uma análise estatística de uma série de observações de um mensurando, assumindo uma distribuição normal, Fig. 2.10, ou outra qualquer. Um componente de incerteza obtido por uma avaliação do Tipo A é caracterizado por um desvio padrão que considera as flutuações aleatórias e as influências consideradas constantes dos resultados de um dado experimento.

Naquelas situações onde a estimativa  $x_i$  de uma grandeza de entrada  $X_i$  não tenha sido obtida através de observações repetidas, a variância estimada associada  $u^2(x_i)$  ou a incerteza padrão  $u(x_i)$  é avaliada por julgamento científico, baseado nas informações disponíveis sobre a possível variabilidade de  $X_i$ . O correto uso dessas informações exige o discernimento

baseado na experiência e no conhecimento geral, sendo esta uma habilidade que pode ser adquirida com o tempo e a prática.

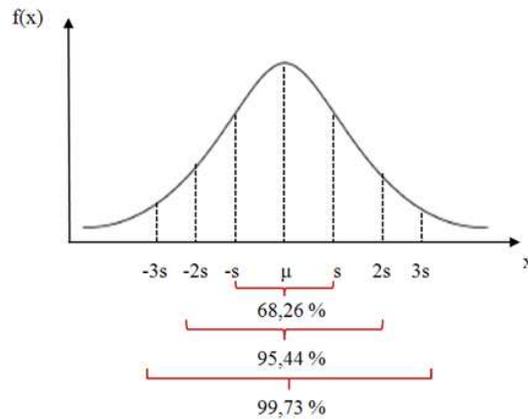


Figura 2.10 – Distribuição normal.

Em muitas aplicações é possível encontrar declarada uma incerteza expandida  $U(x_i)$  com um fator de abrangência  $k_{x_i}$  associado, tendo um nível de confiança de 90 %, 95 % ou 99 % (VALDÉS et al., 2019). Quando não for especificada uma distribuição diferente, pode ser utilizada a distribuição normal para calcular a incerteza-padrão como mostra a (Eq. (2.9)).

$$u(x_i) = \frac{U(x_i)}{k_{x_i}} \quad (2.9)$$

Em outros casos, é possível estimar apenas os limites superior e inferior para  $X_i$  e estabelecer que a probabilidade de que o valor  $X_i$  pertença ao intervalo  $[-a, +a]$  é (1) um e a probabilidade para que o valor  $X_i$  esteja fora desse intervalo é (0) zero. Para tais situações devem ser utilizada a distribuição retangular ou uniforme, Fig. 2.11 (INMETRO, 2012).

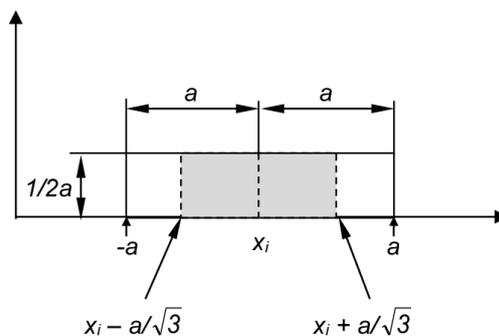


Figura 2.11 – Distribuição retangular (INMETRO, 2012b modificada).

Se não houver conhecimento específico de possíveis valores de  $X_i$  dentro do intervalo, pode-se assumir que é igualmente provável que  $X_i$  esteja em qualquer ponto do intervalo. Então,  $x_i$ , esperança ou valor esperado de  $X_i$ , é o ponto médio no intervalo  $[-a, +a]$ . Ainda,  $X_i$  pode assumir infinitos valores e conseqüentemente o seu grau de liberdade é infinito. Caso a diferença entre os limites,  $[-a, +a]$ , designada por  $2a$ , então a variância estimada é calculada a partir da (Eq. (2.10)).

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (2.10)$$

Como  $x_i$  pode assumir infinitos valores no intervalo  $[-a, +a]$  então o número de graus de liberdade é igual a infinito. O uso da distribuição retangular ou uniforme é recomendado quando se dispõe de pouca informação sobre uma determinada variável. Às vezes, é mais realista esperar que valores perto dos limites sejam menos prováveis do que perto do ponto médio, assim faz se necessário o uso de uma distribuição trapezoidal simétrica, com uma base de largura  $a - (-a) = 2a$  e topo igual a  $2a\beta$ , onde  $0 \leq \beta \leq 1$  (INMETRO, 2012).

Já no caso da avaliação de incerteza do Tipo B, as informações sobre as variáveis de influência são obtidas em certificados de calibração ou manuais técnicos. Elas também podem ser especificações do fabricante do equipamento utilizado, dados de medições prévias ou conhecimento a respeito do processo de medição e do comportamento dos instrumentos.

Em se tratando das variáveis cuja avaliação é classificada como Tipo B, sabe-se que suas distribuições de probabilidade podem ser retangulares, trapezoidais ou triangulares. Isso depende basicamente da probabilidade de ocorrência dos valores que estão situados próximos ao valor médio.

É válido destacar que as distribuições de probabilidade mais comuns das referidas variáveis são a retangular e a triangular. As Equações (2.11) e (2.12) são utilizadas para o cálculo das incertezas padrão das variáveis que assumem as distribuições retangular e triangular, respectivamente.

$$u(x) = \frac{\textit{estimativa}}{\sqrt{6}} \quad (2.11)$$

Após o cálculo das incertezas-padrão relativas às variáveis de influência, devemos combiná-las a fim de conhecer o valor que representa a incerteza do processo de medição avaliado. A incerteza-padrão combinada  $u_c(y)$  é, portanto, o valor que representa a incerteza do processo, sendo também expressa com probabilidade de abrangência de 67,28 %.

A incerteza-padrão combinada é obtida por meio da “lei de propagação de incertezas”, apresentada pela (Eq. (2.12)).

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i) \cdot u(x_j) \cdot r(x_i, x_j) \quad (2.12)$$

Na Equação (2.12),  $u(x_i)$  é a incerteza padrão de cada componente de incerteza que pode ser do tipo A ou B. Além disso,  $x_i$  e  $x_j$  são as estimativas de  $X_i$  e  $X_j$  e  $u(x_i, x_j) = u(x_j, x_i)$  é a covariância estimada e  $r(x_i, x_j)$  é o coeficiente de correlação entre as estimativas  $x_i$  e  $x_j$ .

Nos casos em que o coeficiente de correlação entre as estimativas  $x_i$  e  $x_j$  assume valor nulo, a equação para determinação de  $u_c^2(y)$  é simplificada, pois apenas o primeiro termo precisa ser calculado (Eq. (2.13)).

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (2.13)$$

Apesar da incerteza-padrão combinada englobar a contribuição de todas as variáveis do processo, sua probabilidade de abrangência de 68,27 %, correspondente a um único desvio padrão, é muito baixa para as aplicações relacionadas à engenharia mecânica. Devido a esse fato, é necessário elevar esse percentual para que a maioria dos valores situados ao redor da média aritmética seja considerada. Ao multiplicar o desvio padrão por 2, obtém-se uma probabilidade de abrangência de 95,45 % para a distribuição normal (INMETRO, 2012).

Esse novo percentual é mais adequado para os processos de medição dimensional, pois além de englobar uma ampla faixa de valores, não torna as aplicações tão onerosas quanto se buscasse uma confiabilidade de 100 %.

Como o tamanho amostral dos processos de medição é normalmente menor que 30, é utilizada a distribuição *T-Student* ao invés da distribuição normal. Desta forma, o nível de confiabilidade estabelecido para a expressão da incerteza de medição é arredondado para 95 %, o que facilita a extração de dados da tabela *T-Student*.

Por fim, conhecendo a probabilidade abrangência requerida e os graus de liberdade efetivos de uma medição, basta consultar a tabela da distribuição *T-Student* para estabelecer o fator de abrangência  $k$  que será utilizado para multiplicar a incerteza-padrão combinada. A Equação (2.14) permite determinar os graus de liberdade efetivos ( $v_{eff}$ ), denominada equação de *Welch-Satterthwaite*, na qual  $v_i$  representa os graus de liberdade da variável  $x_i$ .

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \quad (2.14)$$

Para o cálculo da contribuição de cada variável de entrada na incerteza final, utiliza-se a (Eq. (2.15)):

$$Cont(\bar{x}) = \frac{u^2(\bar{x}) \cdot 100 \%}{u_c^2(y)} \quad (2.15)$$

Incerteza expandida ( $U_p$ ) é o nome dado ao produto da incerteza-padrão combinada e do fator de abrangência  $k$  estipulado, Eq. (2.16).

$$U_p = k \cdot u_c \quad (2.16)$$

Por fim, o resultado da medição deve ser expresso como a média aritmética das leituras realizadas com o instrumento ou sistema de medição, seguido do valor da incerteza expandida, que pode ser somada ou subtraída da média ( $RM = \text{média aritmética} \pm U_p$ , para uma probabilidade de abrangência de 95 % ou 95,45 %). O valor da probabilidade de abrangência considerado para o cálculo da incerteza expandida também deve ser apresentado.

### 2.2.2 Método de Monte Carlo

Conforme mencionado inicialmente, o método de Monte Carlo é empregado nos casos em que o cálculo da incerteza de medição pelo método do GUM se mostra ineficaz. Algumas das derivadas parciais obtidas através da “lei de propagação de incertezas” simplesmente não podem ser resolvidas analiticamente.

Por se tratar de um método basicamente numérico, a aplicação de Monte Carlo não exige a resolução de derivadas parciais, apesar de requerer uma boa capacidade de processamento de dados. Devido aos avanços tecnológicos na área dos microprocessadores, os computadores pessoais atuais já contam com os recursos necessários para a realização de todos os cálculos.

No subitem referente ao método do GUM, foi descrito o procedimento de identificação das variáveis de influência do processo de medição, elaboração do modelo matemático de incerteza e o cálculo das incertezas-padrão. Essas etapas também devem ser realizadas para o cálculo da incerteza por Monte Carlo. As diferenças entre os dois métodos surgem a partir desse ponto.

Em um *software* que permita realizar operações com vetores ou matrizes, serão definidas colunas para cada variável de influência do processo de medição identificada. Nessas colunas, deve-se gerar uma quantidade pré-determinada de números aleatórios. À quantidade de números gerados atribui-se o nome iterações, que de acordo com o INMETRO (2008) é de 1 000 000.

Os números aleatórios gerados para cada variável possuem limites inferiores e superiores que dependem dos valores de incerteza-padrão e do tipo de avaliação A ou B realizada. No caso das variáveis submetidas à avaliação Tipo A, o limite inferior para o número aleatório gerado corresponde à média aritmética decrescida do valor de incerteza-padrão. Já o limite superior consiste na média acrescida da incerteza-padrão. Como nesses casos a geração dos números aleatórios se baseia na distribuição normal, uma pequena parcela dos números gerados deverá extrapolar os limites estipulados.

Considerando as variáveis cujas avaliações são do Tipo B, os limites inferior e superior dos números aleatórios variam em torno de zero. Nesses casos o limite inferior corresponde a zero menos o valor da incerteza-padrão, enquanto o limite superior é igual a zero mais o valor dessa incerteza.

Quando os números de todas as variáveis de entrada forem gerados, é necessário propaga-los utilizando o modelo matemático da medição. Desta forma são obtidos os valores do mensurando. Em seguida, já é possível determinar os valores de incerteza-padrão combinada e expandida, além de elaborar um histograma que nos mostra como os valores somados estão distribuídos em torno da média das leituras efetuadas.

Sabendo que a distribuição de probabilidade dos números obtidos é normal, basta calcular o desvio padrão populacional da soma para conhecer a incerteza-padrão combinada, com um nível de abrangência de 68,27 %. A incerteza expandida, com nível de abrangência de 95,45 % é obtida em ao multiplicar a incerteza-padrão combinada por 2,00.

Determinando o número de classes, que é dado pela raiz quadrado do número de iterações realizadas, e a largura das classes, é possível confeccionar o histograma relativo às somas obtidas. Dessa forma, é possível ver a curva característica da distribuição normal, com a quantidade de valores somados reduzindo gradativamente à medida que eles se afastam da média das leituras.

O coeficiente de assimetria e a curtose também devem ser calculados. Eles indicam se os resultados obtidos através da simulação de Monte Carlo são satisfatórios. Considerando uma distribuição normal ideal, os valores do coeficiente de assimetria e a curtose assumem os valores 0 e 3, respectivamente.

Caso a aplicação específica apresente valores muito próximos aos teóricos, recomenda-se aplicar novamente o método de Monte Carlo, agora com um número maior de iterações. Se os novos parâmetros calculados apresentarem diferenças apenas na segunda ou na terceira casa decimal em relação aos parâmetros anteriores, os valores de incerteza-padrão combinada e incerteza expandida calculados são considerados aceitáveis.

Rodrigues et al. (2020), avaliaram de forma pioneira a incerteza associada à tenacidade à fratura ( $K_{IC}$ ) obtida via ensaios (*SNTT- Spiral Notch Torsion Test*) usando os métodos GUM e Monte Carlo. Durante a simulação de Monte Carlo,  $10^6$  iterações foram realizadas usando

o Microsoft Excel 2020. A incerteza expandida associada ao  $K_{IC}$  foi  $1,8 \text{ MPa}\sqrt{m}$ , que representa 1,76 % do valor médio ( $102,2 \text{ MPa}\sqrt{m}$ ).

Jeon et al. (2009) apresentaram um modelo simplificado para estimativa da incerteza associada às propriedades de tração obtidas via ensaio de indentação instrumentada. Os autores observaram incertezas da ordem de 18,9 % e 9,8 % para a resistência ao escoamento e à tração, respectivamente. Se observa que estes valores de incerteza são significativamente maiores que aqueles obtidos por Rodrigues et al., (2020) para a tenacidade à fratura.

Já Kostic et al. (2021) apresentam resultados de pesquisas teóricas e experimentais relacionadas à incerteza associada ao módulo de elasticidade utilizando diferentes equipamentos de ensaio de tração. As investigações experimentais do material S355J2 foram conduzidas em um equipamento de ensaio de tração convencional (*CTTD - Conventional Tensile Testing Device*) com um extensômetro e em um pequeno equipamento de ensaio de tração de laboratório (*SLTTD - Small Laboratory Tensile Testing Device*) e as incertezas foram calculadas a partir do método GUM. Os valores médios das incertezas no módulo de elasticidade encontrados são: 1,97 % para o CTTD e 1,56 % para o SLTTD. Estes valores de incerteza são menores que os obtidos por Jeon et al. (2009) para às propriedades de tração obtidas via ensaio de indentação instrumentada e semelhantes aos encontrados por Rodrigues et al., (2020) para a tenacidade à fratura.

Reis (2022) avaliou a incerteza associada ao módulo de elasticidade a partir do ensaio de tração realizado pela máquina de teste universal da fabricante Instron® modelo 8801 utilizando o método GUM. Os resultados de incerteza expandida associada ao módulo de elasticidade do corpo de prova cilíndrico representam 1,38 % da média, enquanto ao corpo de prova retangular é 1,55 %. Conclui-se que os resultados podem ser considerados adequados tendo em vista que quando comparados com os encontrados na literatura são similares.

Fabricio et al., (2015) avaliaram o desdobramento e a aplicação das etapas do GUM na estimativa da incerteza de medição do ensaio de  $K_{IC}$ . Os autores observaram que a maior contribuição para a incerteza foi a variabilidade dimensional entre os corpos de prova. Ainda completam que isso pode ter ocorrido devido a diferenças entre os corpos de prova, mas outra possível razão para isso é o número limitado de corpos de prova (quatro). Com um número maior de corpos de prova, a contribuição de incerteza do desvio padrão para a incerteza combinada tende a ser menor.

Fabricio et al., (2017) também implementaram o cálculo da incerteza para o ensaio de tenacidade à fratura  $K_{IC}$  de materiais metálicos através do Método de Monte Carlo. Os autores concluíram que os valores de incerteza de medição obtidos foram considerados não significativos, cerca de 1 % dos valores de  $K_{IC}$ , e os valores de  $K_{IC}$  considerando a incerteza de medição ficaram dentro do critério de aceitação do material.

Koepke et al. (2023) calcularam a incerteza padrão associada aos parâmetros  $a_{0q}$ ,  $\alpha$  e  $\eta$  utilizados nas equações para cálculo da tenacidade à fratura via ensaios CTOD-R e J-R e investigaram o efeito de diferentes distribuições de probabilidades (normal, retangular e triangular) das tolerâncias especificadas para os mensurandos e as variáveis de entrada nos resultados. Como alternativa à natureza complexa dos cálculos associados à estimativa da incerteza usando as técnicas de propagação de erros, os autores utilizaram o MMC. Foram realizadas simulações de forma a obter 10 000 conjuntos de valores válidos para gerar as curvas. Os conjuntos de dados que não atendiam certos critérios previamente estabelecidos foram excluídos.

Na Figura 2.12 são mostrados os valores (em porcentagem) da incerteza padrão associada aos parâmetros investigados resultantes da pesquisa de Koepke et al. (2023).

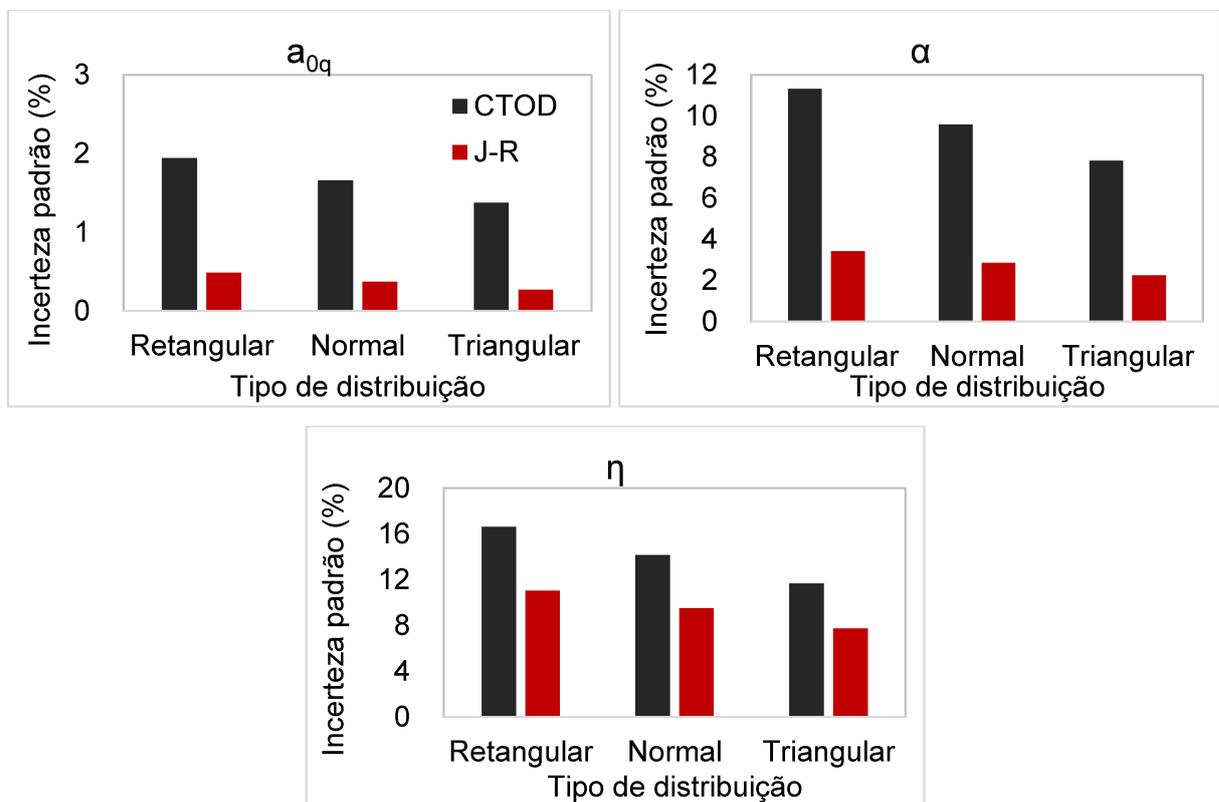


Figura 2.12 - Valores da incerteza padrão (em porcentagem) associada aos parâmetros  $a_{0q}$ ,  $\alpha$  e  $\eta$  utilizados nas equações para cálculo da tenacidade à fratura via ensaios CTOD-R e J-R resultantes da pesquisa de Koepke et al. (2023).

As principais conclusões formuladas pelos autores foram:

- Quando considerada a distribuição triangular os valores de incerteza padrão foram os menores para os três parâmetros investigados;

- Embora a distribuição triangular produza as menores incertezas padrão, ela pode ser a menos relevante para os mensurandos avaliados nesses métodos e, portanto, leva a uma incerteza subestimada.
- O método CTOD-R apresentou os maiores valores de incerteza para todos os parâmetros avaliados e em todas as condições investigadas.

Outras conclusões que podem ser elaboradas são:

- Os valores de incerteza padrão associados à  $a_{0q}$ , são menores ou iguais a 2 % para ambos os métodos e podem ser considerados adequados.
- Por sua vez, a incerteza padrão associada à  $\alpha$  e  $\eta$ , (considerando a distribuição normal) atingem valores de 10 % e 14 %, respectivamente, para o método CTOD-R e 3 % e 10 %, respectivamente, para o método J-R. Se infere, portanto, que a incerteza associada à tenacidade à fratura será maior que 10 % para ambos os métodos.

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGIA**

Este capítulo apresenta os dados experimentais a metodologia proposta para avaliação da incerteza associada à tenacidade à fratura obtida via integral J. Para tanto foram propostas as seguintes etapas. Inicialmente é apresentada a metodologia de ensaio Integral J para determinar a tenacidade à fratura do aço AISI 4340. Em seguida são identificados todos os mensurandos que interferem no cálculo da incerteza associada à tenacidade à fratura, bem como os sistemas de medição utilizados. Além disso são definidos os modelos matemáticos necessários para avaliação da incerteza de medição via GUM ou Monte Carlo. A metodologia detalhada para cálculo da incerteza padrão associada a todas as variáveis de entrada, bem como o cálculo da incerteza padrão combinada e a expandida associada às variáveis de saída é apresentada. Os cálculos foram realizados utilizando o Microsoft Excel® 2019.

Vale ressaltar que a metodologia foi desenvolvida inicialmente tomando como base um corpo de prova, isto porque o cálculo da incerteza associada ao valor da tenacidade à fratura para os diferentes corpos de prova é igual. Em seguida a incerteza associada ao J foi calculada considerando a variabilidade dos valores obtidos a partir dos três ensaios realizados. Por fim, estas incertezas foram combinadas utilizando a lei de propagação de incertezas para obtenção da incerteza expandida associada à tenacidade à fratura.

#### **3.1. Ensaio Integral J**

A tenacidade à fratura do aço AISI 4340 (28 HRC) foi determinada por meio de ensaios normatizados pela ASTM E1820 (ASTM, 2020) (integral J ou ensaio  $J_{IC}$ ). Para tanto foi utilizada uma máquina de teste universal, da fabricante Instron® modelo 8801, com faixa

nominal de  $\pm 100$  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®, Anexo 1, declara uma incerteza expandida de 0,09 kN para um fator de abrangência de aproximadamente 95 % dentro do intervalo de força de 22,4745 kN a 100,1324 kN.

Para realizar o ensaio pelo método de Integral J foi escolhido o corpo de prova (CP) do tipo *Compact Tension*, C(T). A Figura 3.1 mostra o desenho técnico do corpo de prova C(T) ensaiado neste trabalho. Para fabricação destes, chapas das dimensões  $250 \text{ mm}^3 \times 25 \text{ mm}^3 \times 32 \text{ mm}^3$  foram retirados da chapa de aço AISI 4340, por meio da máquina de eletroerosão a fio da marca AgieCharmiles modelo FW2U. Um fio de molibdênio com diâmetro de 0,18 mm foi utilizado. Foram fabricados quatro corpos de prova conforme determina a norma ASTM E1820 – 20ª (ASTM, 2020).

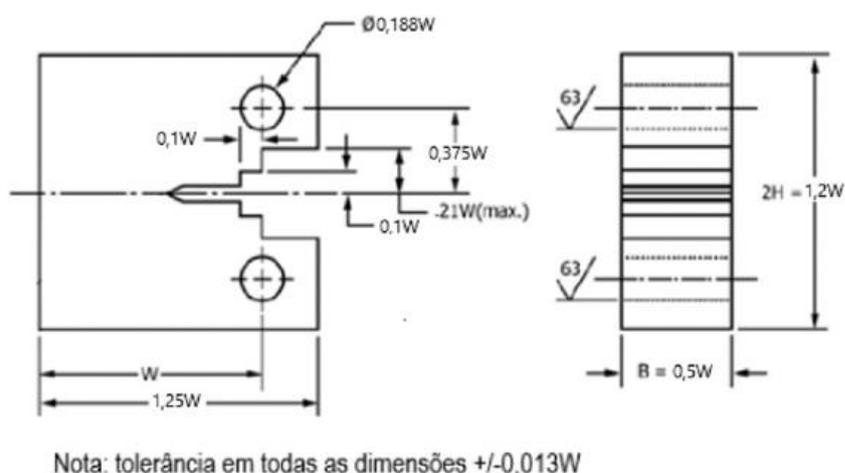


Figura 3.1 – Dimensões dos corpos de prova C(T) especificados pela ASTM E1820 (ASTM,2020).

A verificação dimensional dos corpos de prova é focada na análise das dimensões e proporções determinadas pela ASTM E1820 (ASTM, 2020) e se basearam no valor de  $W$ , que é a distância perpendicular entre a base do corpo de prova e a linha que atravessa o centro dos pontos de fixação na máquina de ensaios.

Nesta etapa foram utilizados um paquímetro digital de resolução 0,01 mm e faixa nominal de 150 mm, e um projetor de perfil, com lente de ampliação de 10X, com resolução de 0,001 mm e faixa nominal de 50 mm para medições lineares. Ambos da marca Mitutoyo. O certificado de calibração do paquímetro (Anexo 2) declara uma incerteza associada à calibração do paquímetro de 0,01 mm para a realização de medições externas. A incerteza expandida associada ao desvio de paralelismo entre as superfícies para medições externas é

de 0,01 mm. Em ambos os casos o fator de abrangência (k) é igual a 2,00 e a probabilidade de abrangência de 95 %. Por sua vez, o certificado de calibração do projetor (Anexo 3) declara uma incerteza expandida associada à calibração para medidas lineares utilizando o eixo X de 0,002 mm. O fator de abrangência (k) é igual a 2,03 com 99 graus de liberdade efetivos. Este certificado declara, também, a incerteza associada ao aumento da lente, como sendo 0,01 % do valor do mensurando, para um fator de abrangência (k) igual a 2,00 e infinitos graus de liberdade. Foram efetuadas de cada mensurando 3 medições para cada mensurando

O limite de escoamento, o limite de resistência e o módulo de elasticidade do aço AISI 4340 foram determinados por meio de ensaios de tração, executados conforme a norma ASTM E8/E8M (ASTM, 2018). A Figura 3.2 mostra a geometria e as dimensões do corpo de prova ensaiados para esta finalidade.

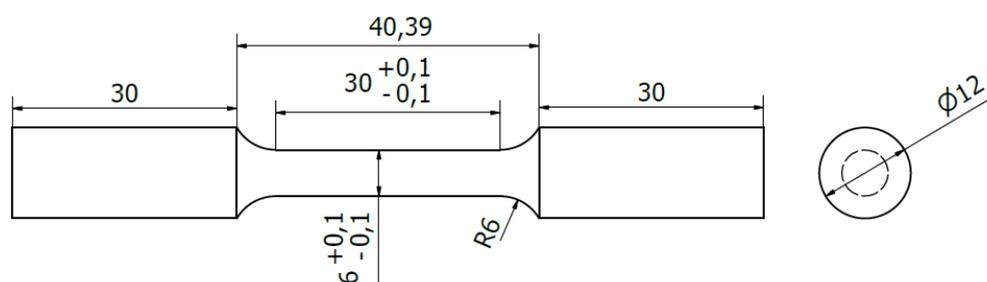


Figura 3.2 – Geometria e dimensões do corpo de prova para o ensaio de tração com dimensões em mm (ASTM E8, 2016).

Os corpos de prova do ensaio de tração foram usinados por meio do torno de controle numérico por computador (CNC) marca Romi modelo GL 240M. Após a usinagem, cada corpo de prova teve o diâmetro da seção útil medidas em três posições ao longo do seu comprimento. Foi utilizado um paquímetro digital do fabricante Mitutoyo especificado anteriormente.

Os ensaios foram realizados em máquina universal da fabricante Instron® especificada anteriormente, utilizando controle de deslocamento com velocidades de 0,48 mm/min até 4 % de deformação e 2 mm/min para o restante do ensaio. A deformação na região elástica foi medida utilizando um extensômetro eletromecânico axial da marca Instron®, modelo 2620-601, com faixa nominal de  $\pm 5$  mm e resolução de 0,01  $\mu\text{m}$ . O certificado de calibração Anexo 4 declara uma incerteza associada à calibração da célula de carga de 0,09 kN o fator de abrangência (k) é igual a 2,00 e a probabilidade de abrangência de 95 %. Em seguida, o extensômetro eletromecânico foi removido e a deformação continuou sendo medida pelo RVDT (*Rotary 30variable differential transformer*) com resolução de 0,0000001° e faixa nominal de  $\pm 45^\circ$  (certificado de calibração Anexo 5) integrado no equipamento até a ruptura do corpo de prova.

A curva J-R, bem como o valor de  $J_Q$  (valor provisório de  $J_{IC}$  a ser validado), foram obtidos diretamente do *software*  $J_{IC}$  *Fracture Toughness* da máquina universal de ensaios Instron®. O critério de qualificação de dados da ASTM E1820 (ASTM, 2020) para validar a construção da curva J-R foi verificado por meio da avaliação da posição dos pontos medidos nos gráficos.

Segundo a norma ASTM E1820 (ASTM, 2020), a espessura do corpo de prova (B) deve seguir a restrição imposta na Eq. (3.1). Esse critério é estabelecido pela ASTM E1820 (ASTM, 2020) para que  $J_Q$  possa ser considerado  $J_{IC}$  ( $J_Q = J_{IC}$ ).

$$B, (W - a_0) > 10 \frac{J_Q}{\sigma_F} \quad (3.1)$$

Na Equação (3.1),  $\sigma_F$  é o limite de resistência a tração do material. A Equação (3.2), mostra a equação do limite de resistência. Nesta equação,  $\sigma_Y$  é o limite de escoamento e  $\sigma_{UT}$  é o limite de resistência à tração.

$$\Sigma_F = \frac{\sigma_Y + \sigma_{UT}}{2} \quad (3.2)$$

Os valores de tenacidade à fratura ( $K_{JIC}$ ) em  $\text{MPa}\sqrt{m}$  para cada ensaios foram calculados a partir de  $J_{IC}$  (Eq. (3.3)).

$$K_{JIC} = \sqrt{\frac{E}{(1-\nu^2)} \cdot J_{IC}} \quad (3.3)$$

Na Equação (3.3),  $K_{JIC}$  é a tenacidade à fratura,  $E$  é o módulo de elasticidade e  $\nu$  é o coeficiente de Poisson.

Para definir o valor de  $J_{IC}$  na Eq. (3.3), foi adotado o valor de  $K_{JIC}$  de  $200,7 \text{ MPa}\sqrt{m}$  para o material ensaiado, obtido por Zhang et al. (2019a), e o módulo de elasticidade obtido pelo ensaio de tração. Assim, substituindo o valor de  $J_{IC}$  na Eq. (3.1), verifica-se que a espessura adotada pelo corpo de prova satisfaz a condição imposta pela citada norma. Para medição da abertura da trinca, foi utilizado um extensômetro da marca Instron®, modelo CP117855, com resolução de  $0,01 \mu\text{m}$  e com leitura máxima de deslocamento igual a  $4 \text{ mm}$ , o certificado de calibração é apresentado no Anexo 6 declara incerteza associada à calibração do extensômetro de  $0,0031 \text{ mm}$  o fator de abrangência (k) é igual a  $2,00$  e a probabilidade de abrangência de  $95 \%$ .

No ensaio  $J_{IC}$  foram utilizados os seguintes parâmetros:

- Força máxima:  $6,1 \text{ kN}$

- Força mínima: 1,2 kN
- Taxa de carregamento e descarregamento dos ciclos: 0,15 mm/min
- Descarregamento: 20 %
- Incremento do deslocamento da linha de carga: 0,02 mm

A partir dos ensaios foi obtida uma curva J-R, bem como o valor de  $J_{IC}$ . A partir desse valor é possível calcular a tenacidade à fratura ( $K_{JIC}$ ) do material utilizando a Eq. (3.3).

Todos os ensaios e as medições foram realizados a temperatura ambiente de  $(20,0 \pm 1,0)$  °C. A temperatura foi monitorada por meio de um termohigrômetro especificado anteriormente. Para monitorar a temperatura ambiente foi utilizado um termo-higrômetro digital da fabricante Instrutherm, com resolução de 0,1 °C e faixa nominal de -20,0 °C a 60,0 °C. O certificado de calibração do termo-higrômetro (Anexo 7) declara uma incerteza expandida de 0,3 °C para k igual a 2,00 e infinitos graus de liberdade para a medição da temperatura. Tanto os corpos de prova quanto os dispositivos de medição foram deixados doze horas à temperatura ambiente para atingirem o equilíbrio térmico.

### 3.2. Identificação dos mensurandos que interferem no cálculo da incerteza associada à tenacidade à fratura obtida via Integral J

A partir da Eq. (3.3) foi elaborado um diagrama de Ishikawa, Fig. 3.3, que mostra os principais fatores que devem ser considerados na determinação da incerteza associada à tenacidade à fratura obtida via Integral J. Observa-se que há três fatores principais, aos quais estão relacionados outros fatores que são apresentados nas Fig. 3.4 até a Fig. 3.9.

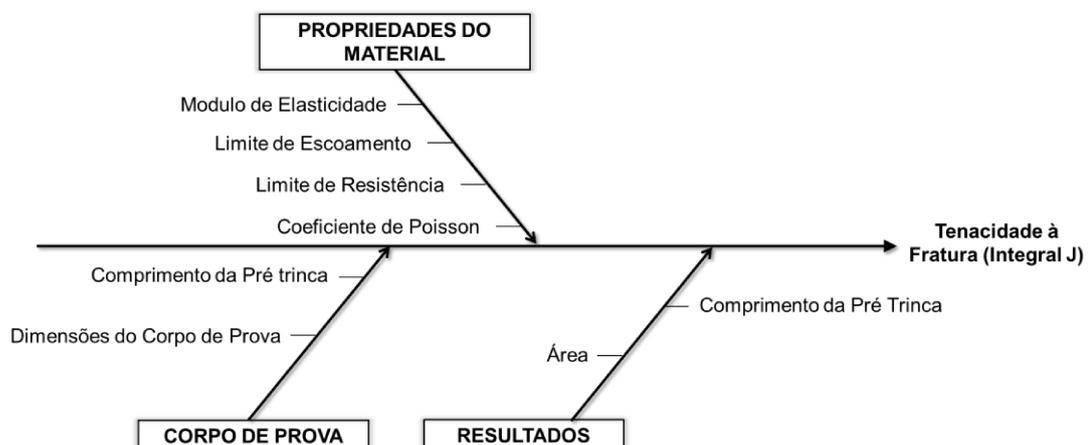


Figura 3.3 – Diagrama de Ishikawa indicando os fatores de influência na tenacidade à fratura obtida pelo método Integral J.

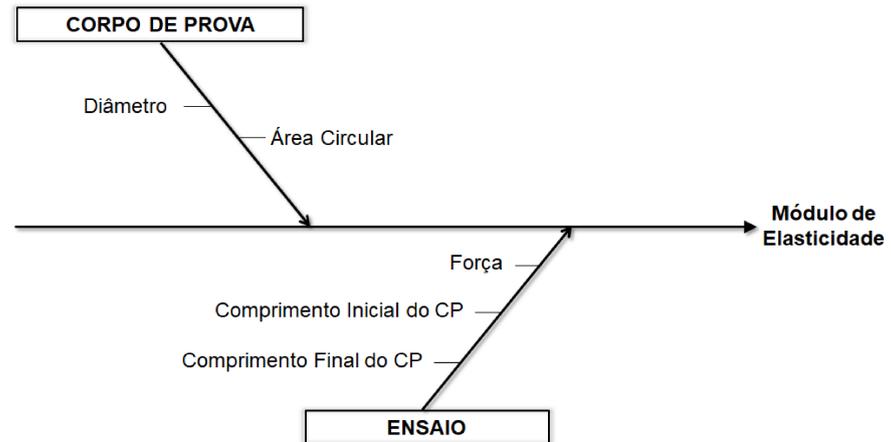


Figura 3.4 – Diagrama de Ishikawa com os fatores de influência associados ao módulo de elasticidade.

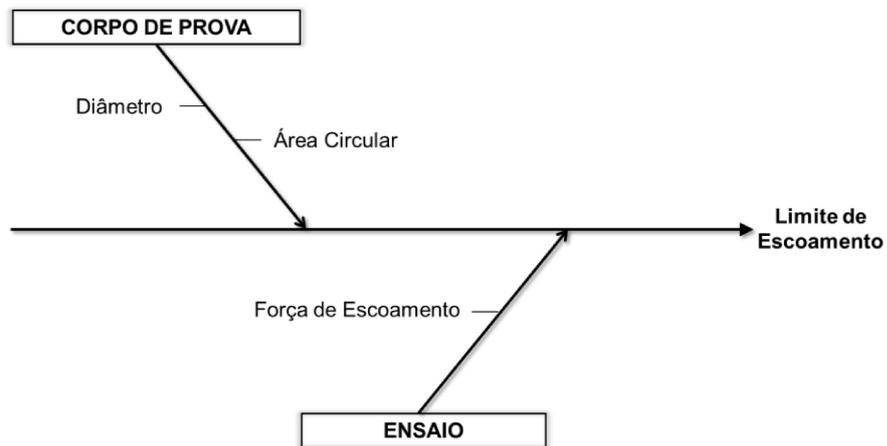


Figura 3.5 – Diagrama de Ishikawa com os fatores de influência associados ao limite de escoamento.

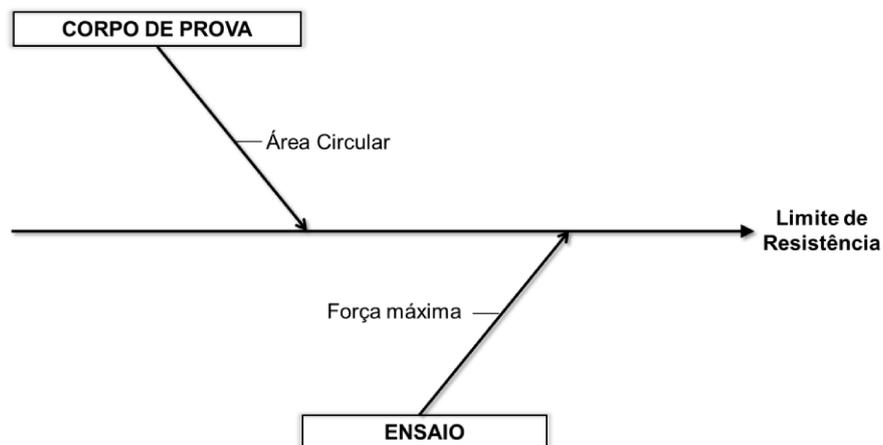


Figura 3.6 – Diagrama de Ishikawa com os fatores de influência associados ao limite de resistência.

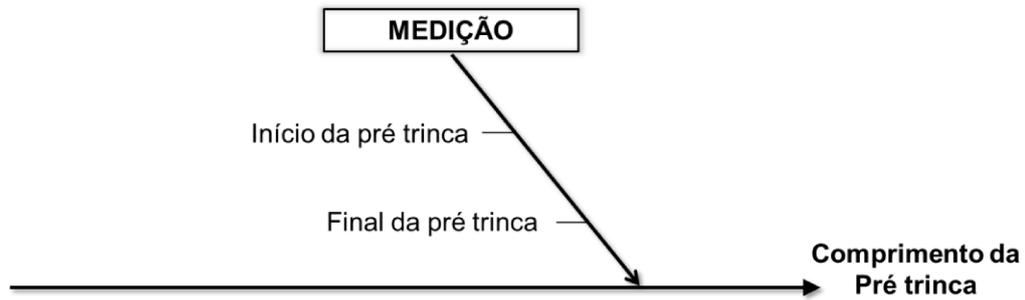


Figura 3.7 – Diagrama de Ishikawa com os fatores de influência associados ao comprimento da pré trinca.



Figura 3.8 – Diagrama de Ishikawa com os fatores de influência associados às dimensões do corpo de prova.

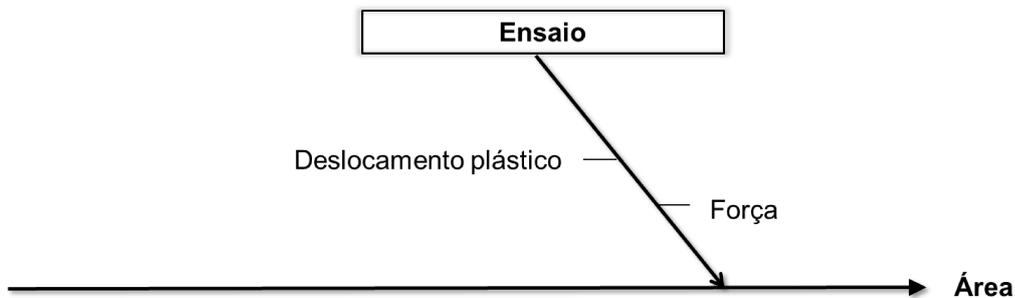


Figura 3.9 – Diagrama de Ishikawa com os fatores de influência associados à área plástica.

### 3.3. Identificação e especificação de todos os sistemas de medição utilizados

Para efeitos de cálculo da incerteza associada à tenacidade à fratura foi considerado apenas um CP. Isto porque a incerteza associada à determinação da tenacidade à fratura via Integral J dos demais CPs é calculada de forma similar. Assim sendo foi considerado um CP com seção transversal quadrada (Fig. 3.10). O controle dimensional e geométrico dos corpos

de prova C(T) foi realizado utilizando os sistemas de medição especificados nas Tab. 3.1 e 3.2.

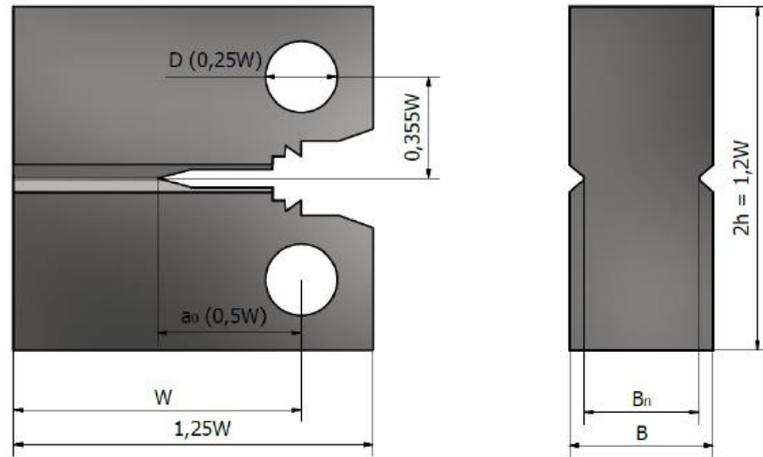


Figura 3.10 – Desenho técnico do corpo de prova C(T) da norma ASTM E1820 – 20<sup>a</sup> (ASTM,2020).

Tanto os corpos de prova quanto os sistemas e dispositivos de medição foram deixados doze horas à temperatura ambiente para atingirem o equilíbrio térmico. Para todos os mensurandos, foram realizados três ciclos de medição.

Tabela 3.1 – Sistemas de medição utilizados na verificação dimensional dos corpos de prova C(T).

CP	Mensurando	Sistema de medição
C(T)	Espessura, $B$	Paquímetro digital Resolução 0,01 mm Faixa nominal 150 mm Certificado de calibração (ANEXO 2)
	Comprimento total, $L$	
	Comprimento do entalhe, $a_{0iii}$	
	Largura, $W$	Projetor de Perfil Resolução 0,001 mm Faixa nominal 50 mm eixo x 50 mm no eixo y Certificado de calibração (ANEXO 3)
	Comprimento da linha de carga, <i>Load-Line Displacement, LLD</i>	
	Comprimento da abertura do entalhe <i>Crack Opening Displacement, COD</i>	

Tabela 3.2 - Sistemas de medição utilizados na determinação da tenacidade à fratura para os ensaios de Integral J.

CP	Mensurando	Sistema de medição
	Espessura com entalhe lateral, $Bn$	Paquímetro digital
		Resolução 0,01 mm Faixa nominal 150 mm Certificado de calibração (ANEXO 2)
C(T)	Pré trinca	Microscópio Óptico Resolução (lente 5 X) 1,37 $\mu\text{m}$
	Limite de escoamento	
	Módulo de elasticidade	Instron® Resolução 0,01 kN
	Limite de resistência	Faixa nominal $\pm 100$ kN Certificado de calibração (ANEXO 1)
	Área, $A_{pl}$	

### 3.4. Definição dos modelos matemáticos

Nesta etapa são definidos os modelos matemáticos necessários para avaliação da incerteza associada à tenacidade à fratura obtiva via integral J (Tab.3.3). Na Tabela 3.4 foi aplicada a lei de propagação de incertezas nos modelos matemáticos.

Nas equações presentes na Tab. 3.3,  $M$  representa o mensurando em questão,  $\bar{X}$  denota a média aritmética dos valores obtidos durante a medição em questão,  $\Delta R$  representa a correção devido à resolução do sistema de medição utilizado,  $\Delta C$  representa a correção devido à calibração do sistema de medição utilizado,  $\Delta I_{me}$  representa a incerteza associada ao desvio de paralelismo para medidas externas com paquímetro digital,  $\Delta A$  é a correção devido à ampliação da objetiva utilizada,  $F_e$  é a força elástica,  $A_n$  é a área do CP do ensaio de tração,  $F$  é a força do módulo de elasticidade,  $l$  é o comprimento inicial do CP,  $\Delta l$  é a diferença do comprimento inicial menos o final,  $F_{m\acute{a}x}$  é a força máxima do CP do ensaio de tração,  $A_{pl(i-1)}$  é a área plástica anterior,  $P_i$  é a força no ponto  $i$ ,  $P_{(i-1)}$  é a força no ponto  $i-1$ ,  $v_{pl(i)}$  é o deslocamento no ponto  $i$ ,  $v_{pl(i-1)}$  é o deslocamento no ponto  $i-1$ .

Tabela 3.3 – Modelos matemáticos utilizados para avaliação da incerteza associada aos mensurandos avaliados durante o controle dimensional e geométrico dos corpos de prova.

Mensurando	Sistema de medição	Modelos matemáticos
<p>Espessura, <math>B</math></p> <hr/> <p>Comprimento total, <math>L</math></p> <hr/> <p>Espessura com entalhe lateral, <math>B_n</math></p> <hr/> <p>Diâmetro, <math>D</math></p> <hr/> <p>Área, <math>A</math></p>	<p>Paquímetro digital</p>	$M = \bar{X} + \Delta R + \Delta C + \Delta Ime$ <hr/> $M = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$
<p>Comprimento do entalhe, <math>a_{0iiii}</math></p> <hr/> <p>Largura, <math>W</math></p> <hr/> <p><math>LLD</math></p> <hr/> <p><math>COD</math></p>	<p>Projetor de Perfil</p>	$M = \bar{X} + \Delta R + \Delta C + \Delta A$
<p>Pré trinca</p>	<p>Microscópio Óptico</p>	$M = \bar{X} + \Delta R + \Delta C + \Delta A$
<p>Limite de escoamento</p>	<p>Instron®</p>	$M = \frac{F_e}{A_n}$
<p>Módulo de elasticidade</p>		$M = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F \cdot l}{A_n \cdot \Delta l}$
<p>Limite de resistência</p>		$M = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A_n}$
<p>Área, <math>A_{pl}</math></p>		$M = A_{pl(i-1)} + \frac{[P_i + P_{(i-1)}] \cdot [v_{pl(i)} - v_{pl(i-1)}]}{2}$

Para determinar a incerteza padrão combinada associada à variável de saída foram aplicados, em função da necessidade, o método GUM e o método de Monte Carlo. Para aqueles casos em que o método GUM foi utilizado foi aplicada a lei de propagação de incertezas nos modelos matemáticos. Os resultados obtidos são mostrados na Tab. 3.4.

Tabela 3.4 – Aplicação da lei de propagação de incertezas nos modelos matemáticos

<b>Mensurando</b>	<b>Resultado da aplicação da lei de propagação de incertezas</b>
Espessura, $B$	
Comprimento total, $L$	$u_c^2(M) = \left(\frac{\partial M}{\partial \bar{X}}\right)^2 \cdot u^2(\bar{X}) + \left(\frac{\partial M}{\partial \Delta R}\right)^2 \cdot u^2(\Delta R) +$
Espessura com entalhe lateral, $Bn$	$\left(\frac{\partial M}{\partial \Delta C}\right)^2 \cdot u^2(\Delta C) + \left(\frac{\partial M}{\partial \Delta l_{me}}\right)^2 \cdot u^2(\Delta l_{me})$
Diâmetro, $D$	
Área, $A$	$u_c^2(M) = \left(\frac{\partial M}{\partial D}\right)^2 \cdot u^2(D)$
Comprimento do entalhe, $a_{0iii}$	
Largura, $W$	
Comprimento da linha de carga, <i>Load-Line Displacement, LLD</i>	$u_c^2(M) = \left(\frac{\partial M}{\partial \bar{X}}\right)^2 \cdot u^2(\bar{X}) + \left(\frac{\partial M}{\partial \Delta R}\right)^2 \cdot u^2(\Delta R) +$
Comprimento da abertura do entalhe <i>Crack Opening Displacement, COD</i>	$\left(\frac{\partial M}{\partial \Delta C}\right)^2 \cdot u^2(\Delta C) + \left(\frac{\partial M}{\partial \Delta A}\right)^2 \cdot u^2(\Delta A)$
Pré trinca	$u_c^2(M) = \left(\frac{\partial M}{\partial \bar{X}}\right)^2 \cdot u^2(\bar{X}) + \left(\frac{\partial M}{\partial \Delta R}\right)^2 \cdot u^2(\Delta R) +$ $\left(\frac{\partial M}{\partial \Delta C}\right)^2 \cdot u^2(\Delta C) + \left(\frac{\partial M}{\partial \Delta A}\right)^2 \cdot u^2(\Delta A)$
Limite de escoamento	$u_c^2(M) = \left(\frac{\partial M}{\partial A_n}\right)^2 \cdot u^2(A_n) + \left(\frac{\partial M}{\partial F_e}\right)^2 \cdot u^2(F_e)$
Módulo de elasticidade	$u_c^2(M) = \left(\frac{\partial M}{\partial A}\right)^2 \cdot u^2(A) + \left(\frac{\partial M}{\partial F}\right)^2 \cdot u^2(F) + \left(\frac{\partial M}{\partial l}\right)^2 \cdot$ $u^2(l) + \left(\frac{\partial M}{\partial \Delta l}\right)^2 \cdot u^2(\Delta l)$
Limite de resistência	$u_c^2(M) = \left(\frac{\partial M}{\partial A_n}\right)^2 \cdot u^2(A_n) + \left(\frac{\partial M}{\partial F_{máx}}\right)^2 \cdot u^2(F_{máx})$

Calculando as derivadas parciais, os modelos matemáticos resultantes são mostrados na Tab. 3.5.

Tabela 3.5 – Modelos matemáticos após o cálculo das derivadas parciais

Mensurando	Resultados do cálculo das derivadas parciais
Espessura, $B$	
Comprimento total, $L$	
Espessura com entalhe lateral, $Bn$	$u_c^2(M) = u^2(\bar{X}) + u^2(\Delta R) + u^2(\Delta C) + u^2(\Delta lme)$
Diâmetro, $D$	
Área, $A$	$u_c^2(M) = \left(\frac{\pi \cdot D}{2}\right)^2 \cdot u^2(D)$
Comprimento do entalhe, $a_{0iii}$	
Largura, $W$	$u_c^2(M) = u^2(\bar{X}) + u^2(\Delta R) + u^2(\Delta C) + u^2(\Delta A)$
LLD	
COD	
Pré trinca	$u_c^2(M) = u^2(\bar{X}) + u^2(\Delta R) + u^2(\Delta C) + u^2(\Delta A)$
Limite de escoamento	$u_c^2(M) = \left(\frac{F_e}{A_n}\right)^2 \cdot u^2(A_n) + \left(-\frac{F_e}{A_n^2}\right)^2 \cdot u^2(F_e)$
Módulo de elasticidade	$u_c^2(M) = \left(\frac{1}{Ac \cdot \Delta l}\right)^2 \cdot u^2(F) + \left(\frac{F}{Ac \cdot \Delta l}\right)^2 \cdot u^2(d) + \left(-\frac{F \cdot l}{Ac^2 \cdot \Delta l}\right)^2 \cdot u^2(Ac) + \left(-\frac{F \cdot l}{Ac \cdot \Delta l^2}\right)^2 \cdot u^2(\Delta l)$
Limite de resistência	$u_c^2(M) = \left(\frac{F_{máx}}{A_n}\right)^2 \cdot u^2(A_n) + \left(\frac{F_{máx}}{A_n^2}\right)^2 \cdot u^2(F_{máx})$
Área plástica	$u_c^2(M) = 1^2 + \frac{[v_{pl(i)} - v_{pl(i-1)}]^2}{2} + \frac{[v_{pl(i)} - v_{pl(i-1)}]^2}{2} + \left(\frac{[P_i + P_{(i-1)}]}{2}\right)^2 + \left(-\frac{[P_{(i-1)} + P_i]}{2}\right)^2$

Para avaliar a incerteza associada à tenacidade à fratura determinado pela máquina de ensaio Instron® especificada anteriormente, foi utilizado o método de Monte Carlo apresentado no JCGM 101 (BIPM et al., 2008). Durante a aplicação do método de Monte Carlo para estimar a incerteza associada à tenacidade à fratura foram realizadas 1 000 000 de iterações. A simulação foi conduzida por meio do Microsoft Excel® 2019. Durante a simulação foram adotadas distribuições normais de probabilidade para todas as variáveis de entrada com exceção da resolução dos sistemas de medição. Neste caso a distribuição retangular foi utilizada.

Foram utilizadas “funções” disponíveis no Microsoft Excel® 2019 (Tab. 3.6) para gerar vetores com os valores correspondentes a cada variável de entrada. Para isso foram consideradas as distribuições de probabilidade adotadas em cada caso.

Tabela 3.6 – Funções utilizada durante a simulação (Excel®, 2019)

Função	Finalidade
INV.NORM(ALEATÓRIO()); $\bar{X}$ ;s)	Geração de números aleatórios considerando uma distribuição normal

No caso específico da função ALEATÓRIO() deve-se destacar que por meio desta é possível gerar um número positivo entre zero e um, apenas. Não sendo possível a priori gerar o número no intervalo de interesse. Desta forma foi efetuada uma perturbação como indicado na Eq. (3.4).

$$valor = (ALEATORIO() \cdot u(x_1)) \cdot 2 - u(x_i) \quad (3.4)$$

Os valores de *Skewness* e *Kurtosis* dos valores simulados da tenacidade à fratura foram determinados, bem como a média e o desvio padrão. Também foi construído o histograma para verificar o formato da distribuição de probabilidades. Finalmente, considerando que a distribuição resultante é normal e simétrica determinou-se o valor da incerteza expandida associada por meio da (Eq. (3.5)).

$$U(x) = 2,00 \cdot s(x) \quad (3.5)$$

Na Equação (3.5),  $U(x)$  é a incerteza expandida associada à tenacidade à fratura,  $s(x)$  é o desvio padrão obtido a partir dos valores simulados e 2,00 é o valor do fator de abrangência recomendado pelo JCGM 101 (BIPM et al., 2008). Neste caso a probabilidade de abrangência é de 95,45 %.

### 3.5. Cálculo da incerteza padrão associada a todas as variáveis de entrada

A seguir são apresentadas as informações sobre o cálculo da incerteza padrão associada às variáveis de entrada. Os cálculos foram efetuados inicialmente por meio do Microsoft Excel® 2019 e validados os resultados de incerteza de cada mensurando.

#### 3.5.1 Cálculo da incerteza padrão associada à variabilidade das leituras ( $\bar{X}$ )

Para avaliar a incerteza padrão associada à variabilidade das leituras em todos os casos foi efetuada uma avaliação do Tipo A considerando uma distribuição *T-student* e n-1 graus de liberdade. Para tanto a Eq. (3.6) foi utilizada, onde s representa o desvio padrão e n o número de medições.

$$u(\bar{X}) = \frac{s(X)}{\sqrt{n}} \quad (3.6)$$

#### 3.5.2 Cálculo da incerteza padrão associada à resolução do sistema de medição

Considerando que todos os sistemas de medição são digitais, a incerteza padrão associada à resolução ( $\Delta R$ ) foi calculada por meio de uma avaliação do Tipo B como mostra a Eq. (3.7). Nesta equação R representa a resolução do sistema de medição em questão. Foram adotados uma distribuição retangular e infinitos graus de liberdade.

$$u(\Delta R) = \frac{R}{2\sqrt{3}} \quad (3.7)$$

#### 3.5.3 Cálculo da incerteza padrão associada à calibração do sistema de medição

Para cálculo da incerteza padrão associada à calibração dos sistemas de medição foi utilizada a Eq. (3.8). O cálculo foi efetuado por meio de uma avaliação do Tipo B considerando a distribuição, o fator de abrangência, a distribuição e o número de graus de liberdade declarados no certificado de calibração correspondente.

$$u(\Delta C) = \frac{U(C)}{kC} \quad (3.8)$$

Na Equação (3.8), U(C) é a incerteza expandida associada à calibração do sistema de medição em questão e kC o fator de abrangência correspondente.

A incerteza padrão associada ao desvio de paralelismo entre as superfícies de medição para externas do paquímetro ( $\Delta l_{me}$ ) foi calculada utilizando a (Eq. (3.9)).

$$u(\Delta l_{me}) = \frac{U(l_{me})}{k_{l_{me}}} \quad (3.9)$$

Na Equação (3.9),  $U(l_{me})$  é a incerteza expandida associada ao desvio de paralelismo para medição externa e  $k_{l_{me}}$  o fator de abrangência correspondente.

De forma similar é determinada a incerteza padrão associada à correção devido à ampliação da objetiva utilizada ( $\Delta A$ ). Para tanto é utilizada a (Eq. (3.10)).

$$u(\Delta A) = \frac{U(A)}{k_A} \quad (3.10)$$

Na Equação (3.10),  $U(A)$  é a incerteza expandida associada à correção devido à ampliação da objetiva utilizada e  $k_A$  o fator de abrangência correspondente.

Conhecidas as incertezas padrão associadas a todas as variáveis de entrada, a incerteza padrão combinada pode ser calculada.

### 3.6. Cálculo da incerteza padrão combinada e da expandida associada às variáveis de saída

De forma geral, a Eq. (3.11) foi utilizada para calcular a incerteza expandida associada à variável de saída.

$$U(y) = k(y) \cdot u_c(y) \quad (3.11)$$

O método GUM recomenda o cálculo de  $v_{ef}(med)$  através da Eq. (3.12), equação de Welch-Satterhwaite para posterior determinação do fator de abrangência da medição:

$$v_{ef}(y) = \frac{u_c(y)^4}{\left[ \sum_i^N \frac{N(u(x_i) \cdot C(x_i))^4}{v_i} \right]} \quad (3.12)$$

Na Equação (3.12),  $N$  é número de variáveis de entrada,  $v_{ef}$  é o número de graus de liberdade de cada variável de entrada,  $u_c(y)$  é a incerteza-padrão combinada da variável de saída,  $u(x_i)$  é a incerteza-padrão de cada variável de entrada,  $C(x_i)$  é o coeficiente de sensibilidade do mensurando em relação a cada variável de entrada  $y_i$ .

Por meio da Tab. G 2 do GUM determina-se o fator de abrangência  $k(y)$ . Por fim o resultado da medição (RM) é apresentado como sendo  $RM = \bar{x} \pm U$  unidade (SI), para a probabilidade de abrangência de 95 %.

Para o cálculo da contribuição de cada variável de entrada  $Cont(\bar{x})$  na incerteza final, utiliza-se a (Eq. (3.13)):

$$Cont(\bar{x}) = \frac{u^2(\bar{x}) \cdot 100 \%}{u_c^2(D)} \quad (3.13)$$

Após o cálculo da incerteza associada aos diversos mensurandos aplicando o método GUM, foi calculada a contribuição de cada uma das variáveis de entrada na incerteza final. Para esta finalidade foi utilizada a (Eq. (3.13)).

Esta análise é importante para a identificação das potenciais fontes de erros que possam comprometer a qualidade dos resultados de medição.

# CAPÍTULO IV

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos. Inicialmente são apresentados os resultados obtidos para um CP. Estes foram divididos em função dos mensurandos considerados no cálculo da incerteza associada à tenacidade à fratura via Integral J: módulo de elasticidade, limite de escoamento, limite de resistência, corpo de prova C(T) e tenacidade à fratura J. Em seguida são apresentados os resultados da análise da variabilidade entre os valores de J considerando os três CPs ensaiados.

Para os mensurandos cuja incerteza foi determinada via GUM são apresentados os valores medidos, a média e o desvio padrão. Em seguida é apresentada uma tabela resumo com as informações relacionadas ao cálculo da incerteza. Esta inclui também as contribuições das variáveis de entrada. Por sua vez, para aqueles mensurandos para os quais foi aplicado o método de Monte Carlo são apresentados o histograma dos valores simulados, os valores de *skewness* e de *kurtoses*, bem como a incerteza expandida associada.

### 4.1 Resultados do cálculo de incerteza associada ao módulo de elasticidade

No cálculo da incerteza associada ao módulo de elasticidade foram considerados quatro fatores principais (variáveis de entrada), quais sejam: diâmetro e área da secção transversal do CP do ensaio de tração, força e deslocamento. Estes fatores, por sua vez, dependem de outros fatores e, portanto, em um momento anterior foram considerados mensurandos ou variáveis de saída. Observa-se que o diâmetro e a área estão correlacionados.

#### 4.1.1 Resultados do cálculo da incerteza associada ao diâmetro do CP do ensaio de tração

A Tabela 4.1 mostra os resultados do cálculo da incerteza associada ao diâmetro do CP do ensaio de tração.

Tabela 4.1 – Valores obtidos durante a medição do diâmetro (D) do CP do ensaio de tração com paquímetro digital.

D (mm)	Média (mm)	s (mm)
6,00		
6,01	6,0200	0,2650
6,05		

A Tabela 4.2 mostra de forma resumida os dados utilizados durante o cálculo da incerteza associada ao diâmetro do CP do ensaio de tração e os principais resultados.

Tabela 4.2 – Resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada ao diâmetro do CP do ensaio de tração.

VE	Estimativa (mm)	TA	DP	GL	CS	u (mm)	Contribuição (%)
$\bar{D}$	6,0200	A	T	2	1	0,0153	63,6
$\Delta R$	0,01	B	R	$\infty$	1	0,0029	2,3
$\Delta C$	0,02	B	N	$\infty$	1	0,0100	27,3
$\Delta l_{me}$	0,01	B	N	$\infty$	1	0,0050	6,8
Incerteza padrão combinada $u_c(D)$ , mm						0,0191	
Graus de liberdade efetivos da medição $v_{ef}(D)$						5	
Fator de abrangência da medição $k(D)$						2,57	
Incerteza expandida $U(D)$ , mm						0,0492	

Na Tabela 4.2, VE representa as variáveis de entrada, TA é o tipo de avaliação da incerteza padrão, DP é a distribuição de probabilidade associada à cada variável de entrada, GL é o número de graus de liberdade, CS o coeficiente de sensibilidade (derivada parcial) e  $u$  é a incerteza padrão associada à cada variável de entrada considerada.

O valor do diâmetro resultante da medição é  $6,02 \pm 0,05$  mm para 95 % de probabilidade de abrangência e um fator de abrangência  $k(D) = 2,57$ . A partir da Tab. 4.2. se conclui que a variável que mais contribuiu para a incerteza final na medição do diâmetro foi a variabilidade das leituras, sendo responsável por 63,6 % da incerteza final. Uma maneira de reduzir esta parcela da incerteza poderia ser aumentando o número de medições do diâmetro para cinco. Vale ressaltar que esse valor de incerteza expandida representa menos de 1,0 % do valor médio do diâmetro e, portanto, pode ser considerado adequado.

#### 4.1.2 Resultados do cálculo da incerteza associada à área da secção transversal do CP do ensaio de tração

A Tabela 4.3, mostra os resultados do cálculo da incerteza associada à área da secção transversal (A) do CP do ensaio de tração.

Tabela 4.3 – Resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada à área da secção transversal do CP do ensaio de tração.

VE	Estimativa (mm <sup>2</sup> )	TA	DP	GL	CS	u (mm <sup>2</sup> )	Contribuição (%)
A	28,4631	A	T	2	89,4196 mm <sup>2</sup>	0,01914	100
Incerteza padrão combinada $u_c(A)$ , mm <sup>2</sup>						0,1806	
Graus de liberdade efetivos da medição $v_{ef}(A)$						$\infty$	
Fator de abrangência da medição $k(A)$						1,96	
Incerteza expandida $U(A)$ , mm <sup>2</sup>						0,3540	

O resultado da medição da área é de  $28,46 \pm 0,36$  mm<sup>2</sup> com 95 % de probabilidade de abrangência e um fator de abrangência de  $k(A) = 1,96$ . A incerteza expandida associada à área representa 1,7 % do valor médio desta e pode ser considerada adequada.

#### 4.1.3 Resultados do cálculo da incerteza associada à força aplicada para o CP do ensaio de tração

Foram utilizados 360 valores de força gerados durante o ensaio de tração para o cálculo do módulo de elasticidade. O valor de força utilizado para o cálculo de incerteza é de 14,2353 kN e o desvio padrão 0,1571 kN. Os resultados do cálculo da incerteza associada à força são resumidos na Tab. 4.4.

Tabela 4.4 – Resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada à força aplicada ao CP do ensaio de tração.

VE	Estimativa (kN)	TA	DP	GL	CS	u (kN)	Contribuição (%)
$\bar{F}$	14,2353	A	T	359	1	0,0083	3,3
$\Delta R$	0,01	B	R	$\infty$	1	0,00289	0,4
$\Delta C$	0,09	B	N	$\infty$	1	0,0450	96,3
Incerteza padrão combinada $u_c(F)$ , mm						0,0458	
Graus de liberdade efetivos da medição $v_{ef}(F)$						337191	
Fator de abrangência da medição $k(F)$						1,96	
Incerteza expandida $U(F)$ , mm						0,0899	

O resultado da medição da força é de  $14,24 \pm 0,09$  kN com 95 % de probabilidade de abrangência e um fator de abrangência de  $k(F) = 1,96$ . Conclui-se pela Tab. 4.4 que a calibração da célula de carga utilizado foi o fator que mais contribuiu para a incerteza final na medição da força, sendo responsável por 96,3 % da incerteza. Esta representa 0,7 % do valor da média e pode ser considerada adequada.

#### 4.1.4 Resultados do cálculo da incerteza associada à deformação para o CP do ensaio de tração

Foram utilizados 360 valores de deformação gerados durante o ensaio de tração para o cálculo do módulo de elasticidade. O valor de deformação utilizado para o cálculo de incerteza é de 0,00235 mm/mm e o desvio padrão 0,000828 mm/mm. Os resultados do cálculo da incerteza associada à força são resumidos na Tab. 4.5.

Tabela 4.5 – Tabela resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associado à deformação do CP do ensaio de tração.

VE	Estimativa (mm/mm)	TA	DP	GL	CS	u (mm/mm)	Contribuição (%)
$\bar{d}$	0,00235	A	T	359	1	0,000044	11,7
$\Delta R$	0,00001	B	R	$\infty$	1	0,000003	0,1
$\Delta C$	0,00024	B	N	$\infty$	1	0,000120	88,3
Incerteza padrão combinada $u_c(d)$ , mm/mm						0,000128	
Graus de liberdade efetivos da medição $v_{ef}(d)$						26341	
Fator de abrangência da medição $k(d)$						1,96	
Incerteza expandida $U(d)$ , mm/mm						0,000250	

O resultado da medição da variação da deformação é de  $0,00235 \pm 0,00025$  mm/mm com 95 % de probabilidade de abrangência e um fator de abrangência de  $k(d) = 1,96$ . A calibração da célula de carga foi o fator que mais contribuiu para a incerteza final do deslocamento, sendo responsável por 88,3 % da incerteza. A incerteza expandida de 0,00025 mm/mm que representa 10,7 % do valor médio pode ser considerada adequada.

#### 4.1.5 Resultados do cálculo da incerteza associada ao módulo de elasticidade

A incerteza associada à deformação  $\Delta l$  foi calculada utilizando o método de Monte Carlo. Para tanto 100 000 iterações foram realizadas. O valor de  $\Delta l$  resultante é  $0,00587 \pm 0,00002$  mm para 95,45 % de probabilidade de abrangência e um fator de abrangência  $k(\Delta l) = 2,00$ . A

incerteza expandida representa 3,4 % do valor de  $\Delta I$ , portanto, pode ser considerada adequada. O histograma dos valores simulados do mensurando  $\Delta I$  é mostrado na Fig. 4.1. Os valores de curtoses e *skewness* são 0,010816 e 0,006991, respectivamente.

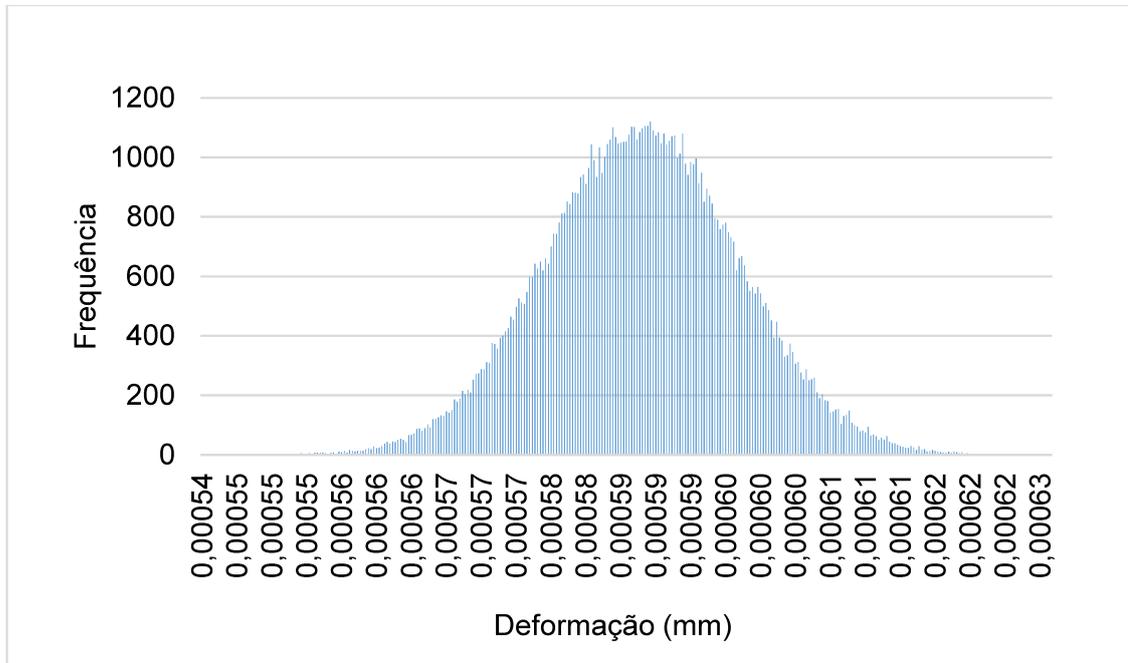


Figura 4.1 – Histograma dos valores simulados de  $\Delta I$  durante a simulação de Monte Carlo.

Por fim, a Tab. 4.6 apresenta o resumo dos resultados decorrentes do cálculo da incerteza associada ao módulo de elasticidade.

Tabela 4.6 – Resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada ao módulo de elasticidade.

VE	Estimativa	TA	DP	GL	CS	u	Contribuição (%)
A	28,4631 mm <sup>2</sup>	A	t	1	0,02580 (kN/mm <sup>4</sup> )	0,1811 mm <sup>2</sup>	20,4
F	14,2353 kN	B	R	359	0,05159 (1/mm <sup>2</sup> )	0,0458 kN	79,6
d	25,0000 mm	B	N	1	0,02938 (kN/mm <sup>3</sup> )	0,00004 mm	0,0
$\Delta I$	0,058745 mm	B	N	359	0,04314 (kN/mm <sup>3</sup> )	0,000010 mm	0,0
Incerteza padrão combinada $u_c(E)$ , GPa						0,0052	
Graus de liberdade efetivos da medição $v_{ef}(E)$						3	
Fator de abrangência da medição $k(E)$						2,00	
Incerteza expandida $U(E)$ , GPa						0,0105	

O resultado da medição do módulo de elasticidade é de  $214,66 \pm 0,01$  GPa com 95 % de probabilidade de abrangência e um fator de abrangência de  $k(E) = 2,00$ . Observa-se pela Tab. 4.6 que a parcela associada à incerteza da força é a principal contribuinte para a incerteza padrão combinada associada ao módulo de elasticidade, representando 79,6 % do valor final. O valor da incerteza expandida, 0,01 GPa, representa 0,005 % em relação à média e é menor comprando ao registrado por Kostic et al., (2021) para a incerteza associada ao módulo de elasticidade em ensaios de tração pelos métodos convencionais de *Conventional Tensile Testing Device* (CTTD) 1,97 %, *Small Laboratory Tensile Testing Device* (SLTTD), 1,56 %. Roberto Cagliero et al., (2015) também utilizaram o método GUM para o cálculo da incerteza associada ao módulo de elasticidade e obtiveram como resultado uma incerteza de 3,24 % para um nível de confiança de 95 %. Desta forma se conclui que nas condições experimentais utilizadas no presente estudo utilizando a metodologia proposta o valor da incerteza associada ao módulo de elasticidade é melhor aos encontrados na literatura.

Os baixos valores de incerteza associados ao módulo de elasticidade encontrados no presente trabalho podem ser atribuídos à excelente resolução de todos os sensores e equipamentos envolvidos na instrumentação da máquina universal da máquina de ensaio universal, da fabricante Instron® modelo 8801.

## **4.2. Resultados do cálculo da incerteza associada ao limite de escoamento**

No cálculo da incerteza associada ao limite de escoamento são considerados dois fatores principais, a área da secção transversal do CP do ensaio de tração e a força de escoamento. Os resultados do cálculo da incerteza associada à área foram apresentados anteriormente, restando o cálculo da incerteza associada à força de escoamento.

### **4.2.1. Resultados do cálculo da incerteza associada à força de escoamento**

Os valores de força de escoamento aplicados durante o ensaio e utilizados no cálculo da incerteza são apresentados na Tab. 4.7.

A Tabela 4.8 apresenta o resumo dos resultados decorrentes do cálculo da incerteza associada à força de escoamento.

Tabela 4.7 – Valores de força de escoamento ( $F_e$ ) gerados pela máquina de ensaio universal durante o ensaio de tração do CP.

Força (N)			Média (N)	s (N)
21552,93	21537,48	21556,29	21688,7619	122,6089
21562,83	21537,76	21575,29		
21547,88	21544,01	21619,28		
21666,21	21778,55	21814,94		
21708,26	21799,94	21816,99		
21738,25	21807,62	21816,44		
21819,73	21819,73	21819,73		

Tabela 4.8 – Resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada à força de escoamento.

VE	Estimativa (N)	TA	DP	GL	CS	u (N)	Contribuição (%)
$\bar{F}_e$	21688,7619	A	t	20	1	26,7555	26,0
$\Delta R$	10,00	B	R	$\infty$	1	2,8868	0,3
$\Delta C$	90,00	B	N	$\infty$	1	45,0000	73,7
Incerteza padrão combinada $u_c(F_e)$ , mm						52,4327	
Graus de liberdade efetivos da medição $v_{ef}(F_e)$						295	
Fator de abrangência da medição $k(F_e)$						1,97	
Incerteza expandida $U(F_e)$ , N						103,1910	

O resultado da medição da força de escoamento é de  $21688,76 \pm 103,19$  N com 95 % de probabilidade de abrangência e um fator de abrangência de  $k(F_e) = 1,97$ . Conclui-se pela Tab. 4.8 que a calibração da célula de carga utilizado foi o fator que mais contribuiu para a incerteza final na medição da força, sendo responsável por 73,7 % da incerteza. Esta representa 0,5 % do valor da média e pode ser considerada adequada.

#### 4.2.2 Resultados do cálculo da incerteza associada ao limite de escoamento

A Tabela 4.9 apresenta o resumo dos resultados decorrentes do cálculo da incerteza associada ao limite de escoamento.

Tabela 4.9 – Resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada ao limite de escoamento.

VE	Estimativa	TA	DP	GL	CS	u	Contribuição (%)
A	28,4631 mm <sup>2</sup>	A	t	1	26,7714 (N/mm <sup>4</sup> )	0,0191 mm <sup>2</sup>	22,9
<i>Fe</i>	216888,76 N	B	t	20	0,0351 (1/mm <sup>2</sup> )	26,7575 N	77,1
Incerteza padrão combinada $u_c(L_e)$ , MPa						1,0706	
Graus de liberdade efetivos da medição $v_{ef}(L_e)$						18	
Fator de abrangência da medição $k(L_e)$						2,10	
Incerteza expandida $U(L_e)$ , MPa						2,2482	

O resultado da medição do limite de escoamento é de  $770,47 \pm 2,25$  MPa com 95 % de probabilidade de abrangência e um fator de abrangência de  $k(L_e) = 2,10$ . Observa-se pela Tab. 4.9 que a parcela associada à incerteza da força utilizada foi o fator que mais contribuiu para a incerteza final na medição da força, sendo responsável por 77,1 % da incerteza. Esta representa 0,3 % do valor da média e pode ser considerada adequada

### 4.3. Resultados do cálculo da incerteza associada ao limite de resistência

No cálculo da incerteza associada ao limite de resistência são considerados dois fatores principais, a área da secção transversal do CP do ensaio de tração e a força de máxima. Os resultados do cálculo da incerteza associada à área foram apresentados anteriormente, restando o cálculo da incerteza padrão a força máxima.

#### 4.3.1. Resultados do cálculo da incerteza associada a força máxima

Os valores de força máxima gerados durante o ensaio e utilizados no cálculo da incerteza são apresentados na Tab. 4.10.

A Tabela 4.11 apresenta o resumo dos resultados decorrentes do cálculo da incerteza associada à força máxima.

Tabela 4.10 – Valores de força máxima ( $F_{m\acute{a}x}$ ) gerados pela máquina de ensaio universal durante o ensaio de tração do CP.

$F_{m\acute{a}x}$ (N)			Média (N)	s (N)
25742,09	25743,64	25748,89		
25743,24	25744,91	25743,46		
25742,14	25749,62	25740,38		
25741,41	25754,78	25739,71	25744,3881	4,8521
25742,21	25753,61	25740,57		
25741,03	25750,76	25738,72		
25742,04	25750,00	25738,94		

Tabela 4.11 – Resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada à força máxima.

VE	Estimativa (N)	TA	DP	GL	CS	u (N)	Contribuição (%)
$\bar{F}_{m\acute{a}x}$	25744,4	A	t	20	1	1,1	0,1
$\Delta R$	10	B	R	$\infty$	1	2,9	0,4
$\Delta C$	90	B	N	$\infty$	1	45	99,5
Incerteza padrão combinada $u_c(F_{m\acute{a}x})$ , N						45,1	
Graus de liberdade efetivos da medição $v_{ef}(F_{m\acute{a}x})$						65863937	
Fator de abrangência da medição $k(F_{m\acute{a}x})$						1,96	
Incerteza expandida $U(F_{m\acute{a}x})$ , N						88,404	

O resultado da medição da força máxima é de  $25744,4 \pm 88,4$  N com 95 % de probabilidade de abrangência e um fator de abrangência de  $k(F_{m\acute{a}x}) = 1,96$ . Conclui-se pela Tab. 4.11 que a calibração da célula de carga utilizada foi o fator que mais contribuiu para a incerteza final na medição da força, sendo responsável por 99,5 % da incerteza. Esta representa 0,4 % do valor da média e pode ser considerada adequada.

#### 4.3.2. Resultados do cálculo da incerteza associada ao limite de resistência

A Tabela 4.12 apresenta o resumo dos resultados decorrentes do cálculo da incerteza associada ao limite de resistência.

Tabela 4.12 – Resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada ao limite de resistência.

VE	Estimativa	TA	DP	GL	CS	u	Contribuição (%)
A	28,4631 mm <sup>2</sup>	A	t	1	31,8693 (N/mm <sup>4</sup> )	0,180639 mm <sup>2</sup>	99,6
$F_{m\acute{a}x}$	25818,90 N	B	t	20	0,03513 (1/mm <sup>2</sup> )	0,0451 N	0,3
Incerteza padrão combinada $u_c(LR)$ , MPa						0,6111	
Graus de liberdade efetivos da medição $v_{ef}(LR)$						2	
Fator de abrangência da medição $k(LR)$						4,3	
Incerteza expandida $U(LR)$ , MPa						2,6278	

O resultado da medição do limite de resistência é de  $906,81 \pm 2,63$  MPa com 95 % de probabilidade de abrangência e um fator de abrangência de  $k(LR) = 4,3$ . Observa-se pela Tab. 4.12 que a parcela associada à incerteza da área utilizada foi o fator que mais contribuiu para a incerteza final na medição da força, sendo responsável por 99,6 % da incerteza. Esta representa 0,3 % do valor da média e pode ser considerada adequada.

#### 4.4. Resultados do cálculo de incerteza associados ao corpo de prova C(T)

Para cada mensurando avaliado são apresentados os valores medidos, a média e o desvio padrão. Em seguida é apresentada uma tabela resumo com as informações relacionadas ao cálculo da incerteza.

##### 4.4.1. Resultados do cálculo da incerteza associada a espessura B

A Tabela 4.13 apresenta o resumo dos resultados decorrentes do cálculo da incerteza associada a espessura do CP C(T).

Tabela 4.13 – Valores obtidos durante a medição da espessura (B) do CP C(T) com paquímetro digital.

B (mm)	Média (mm)	s (mm)
13,04		
13,03	13,0333	0,0058
13,03		

A Tabela 4.14 mostra de forma resumida os dados utilizados durante o cálculo da incerteza associada a espessura do CP C(T) e os principais resultados.

Tabela 4.14 – Resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada a espessura do CP C(T).

VE	Estimativa (mm)	TA	DP	GL	CS	u (mm)	Contribuição (%)
$\bar{B}$	13,0333	A	T	2	1	0,0033	16,0
$\Delta R$	0,01	B	R	$\infty$	1	0,0029	12,0
$\Delta C$	0,02	B	N	$\infty$	1	0,0050	36,0
$\Delta l_{me}$	0,01	B	N	$\infty$	1	0,0050	36,0
Incerteza padrão combinada $u_c(B)$ , mm						0,0083	
Graus de liberdade efetivos da medição $v_{ef}(B)$						78	
Fator de abrangência da medição $k(B)$						1,99	
Incerteza expandida $U(B)$ , mm						0,0166	

O valor da espessura resultante é  $13,03 \pm 0,02$  mm para 95 % de probabilidade de abrangência e um fator de abrangência  $k(B) = 1,99$ . A partir da Tab. 4.14, se conclui que a variável que mais contribuiu para a incerteza final na medição da espessura foi a calibração do paquímetro digital e desvio de paralelismo para medidas externas do paquímetro digital, sendo responsável por 36,0 % da incerteza final. Vale ressaltar que esse valor de incerteza expandida representa menos de 0,2 % do valor médio da espessura e, portanto, pode ser considerada adequada.

#### 4.4.2. Resultados do cálculo da incerteza associada ao comprimento total L

A Tabela 4.15 apresenta o resumo dos resultados decorrentes do cálculo da incerteza associada ao comprimento total do CP C(T).

Tabela 4.15 – Valores obtidos durante a medição de L do CP C(T) com paquímetro digital.

L (mm)	Média (mm)	s (mm)
32,58		
32,56	32,5667	0,0115
32,56		

A Tabela 4.16 mostra de forma resumida os dados utilizados durante o cálculo da incerteza associada à L do CP C(T) e os principais resultados.

Tabela 4.16 – Resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada à L do CP C(T).

VE	Estimativa (mm)	TA	DP	GL	CS	u (mm)	Contribuição (%)
$\bar{L}$	32,5667	A	T	2	1	0,0067	25,0
$\Delta R$	0,01	B	R	$\infty$	1	0,0029	4,7
$\Delta C$	0,02	B	N	$\infty$	1	0,0100	56,3
$\Delta Ime$	0,01	B	N	$\infty$	1	0,0050	14,1
Incerteza padrão combinada $u_c(L)$ , mm						0,0133	
Graus de liberdade efetivos da medição $v_{ef}(L)$						32	
Fator de abrangência da medição $k(L)$						2,04	
Incerteza expandida $U(L)$ , mm						0,0272	

O valor do comprimento total L resultante é  $32,57 \pm 0,03$  mm para 95 % de probabilidade de abrangência e um fator de abrangência  $k(L) = 2,04$ . A partir da Tab. 4.16, se conclui que a variável que mais contribuiu para a incerteza final na medição do comprimento total L foi a calibração do paquímetro digital, sendo responsável por 56,3 % da incerteza final. Vale ressaltar que esse valor de incerteza expandida representa menos de 0,8 % do valor médio do comprimento total do CP C(T) e, portanto, pode ser considerada adequada.

#### 4.4.3. Resultados do cálculo da incerteza associada ao comprimento do entalhe $a_0$

A Tabela 4.17 apresenta o resumo dos resultados decorrentes do cálculo da incerteza associada ao comprimento do entalhe  $a_0$  do CP C(T).

Tabela 4.17 – Valores obtidos durante a medição do comprimento do entalhe  $a_0$  do CP C(T) com o projetor de perfil.

$a_0$ (mm)	Média (mm)	s (mm)
10,980		
10,978		
10,970	10,97600	0,00381
10,975		
10,977		

A Tabela 4.18 mostra de forma resumida os dados utilizados durante o cálculo da incerteza associada ao comprimento do entalhe  $a_0$  do CP C(T) e os principais resultados.

Tabela 4.18 – Resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada à  $a_0$  do CP C(T).

VE	Estimativa (mm)	TA	DP	GL	CS	u (mm)	Contribuição (%)
$\bar{a}_0$	10,97600	A	T	4	1	0,00170	68,2
$\Delta R$	0,001	B	R	$\infty$	1	0,00029	2,0
$\Delta C$	0,002	B	N	$\infty$	1	0,00099	22,8
$\Delta A$	0,01	B	N	$\infty$	1	0,0005	7,1
Incerteza padrão combinada $u_c(a_0)$ , mm						0,00206	
Graus de liberdade efetivos da medição $v_{ef}(a_0)$						9	
Fator de abrangência da medição $k(a_0)$						2,31	
Incerteza expandida $U(a_0)$ , mm						0,0048	

O valor do comprimento do entalhe  $a_0$  resultante é  $10,976 \pm 0,005$  mm para 95 % de probabilidade de abrangência e um fator de abrangência  $k(a_0) = 2,31$ . A partir da Tab. 4.18, se conclui que a variável que mais contribuiu para a incerteza final na medição do comprimento do entalhe  $a_0$  foi a variabilidade das leituras, sendo responsável por 68,2 % da incerteza final. Vale ressaltar que esse valor de incerteza expandida representa menos de 0,04 % do valor médio do comprimento do entalhe  $a_0$  do CP C(T) e, portanto, pode ser considerada adequada.

#### 4.4.4. Resultados do cálculo da incerteza associada à largura $W$

A Tabela 4.19 apresenta o resumo dos resultados decorrentes do cálculo da incerteza associada à  $W$  do CP C(T).

Tabela 4.19 – Valores obtidos durante a medição da largura  $W$  do CP C(T) com o projetor de perfil.

W (mm)	Média (mm)	s (mm)
26,091		
26,037		
26,052	26,05927	0,01973
26,060		
26,058		

A Tabela 4.20 mostra de forma resumida os dados utilizados durante o cálculo da incerteza associada à  $W$  do CP C(T) e os principais resultados.

Tabela 4.20 – Resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada à  $W$  do CP C(T).

VE	Estimativa (mm)	TA	DP	GL	CS	$u$ (mm)	Contribuição (%)
$\bar{w}$	26,05927	A	T	4	1	0,00882	96,6
$\Delta R$	0,001	B	R	$\infty$	1	0,00029	0,1
$\Delta C$	0,002	B	N	$\infty$	1	0,00099	1,2
$\Delta A$	0,01	B	N	$\infty$	1	0,00130	2,1
Incerteza padrão combinada $u_c(W)$ , mm						0,00898	
Graus de liberdade efetivos da medição $v_{ef}(W)$						4	
Fator de abrangência da medição $k(W)$						2,78	
Incerteza expandida $U(W)$ , mm						0,0249	

O valor da largura  $W$  resultante é  $26,059 \pm 0,025$  mm para 95 % de probabilidade de abrangência e um fator de abrangência  $k(W) = 2,78$ . A partir da Tab. 4.20, se conclui que a variável que mais contribuiu para a incerteza final na medição da largura  $W$  foi a variabilidade das leituras, sendo responsável por 96,6 % da incerteza final. Vale ressaltar que esse valor de incerteza expandida representa menos de 0,1 % do valor médio da largura  $W$  do CP C(T) e, portanto, pode ser considerada adequada.

#### 4.4.5. Resultados do cálculo da incerteza associada ao comprimento da linha de carga, LLD

A Tabela 4.21 apresenta o resumo dos resultados decorrentes do cálculo da incerteza associada ao comprimento da linha de carga, LLD do CP C(T).

Tabela 4.21 – Valores obtidos durante a medição do LLD do CP C(T) com o projetor de perfil.

LLD (mm)	Média (mm)	s (mm)
9,213		
9,194		
9,296	9,26660	0,05988
9,299		
9,332		

A Tabela 4.22 mostra de forma resumida os dados utilizados durante o cálculo da incerteza associada ao LLD do CP C(T) e os principais resultados.

Tabela 4.22 – Resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada ao LLD do CP C(T).

VE	Estimativa (mm)	TA	DP	GL	CS	u (mm)	Contribuição (%)
$\overline{LLD}$	9,26660	A	T	4	1	0,02678	99,8
$\Delta R$	0,001	B	R	$\infty$	1	0,00029	0,0
$\Delta C$	0,002	B	N	$\infty$	1	0,00099	0,1
$\Delta A$	0,01	B	N	$\infty$	1	0,00046	0,0
Incerteza padrão combinada $u_c$ (LLD), mm						0,02680	
Graus de liberdade efetivos da medição $v_{ef}$ (LLD)						4	
Fator de abrangência da medição $k$ (LLD)						2,78	
Incerteza expandida $U$ (LLD), mm						0,07442	

O valor do comprimento da linha de carga, LLD resultante é  $9,267 \pm 0,075$  mm para 95 % de probabilidade de abrangência e um fator de abrangência  $k(\text{LLD}) = 2,78$ . A partir da Tab. 4.22, se conclui que a variável que mais contribuiu para a incerteza final na medição do comprimento da linha de carga, LLD foi a variabilidade das leituras, sendo responsável por 99,8 % da incerteza final. Vale ressaltar que esse valor de incerteza expandida representa 0,8 % do valor médio do comprimento da linha de carga, LLD do CP C(T) e, portanto, pode ser considerada adequada.

#### 4.4.6. Resultados do cálculo da incerteza associada ao comprimento da abertura do entalhe, COD

A Tabela 4.23 apresenta o resumo dos resultados decorrentes do cálculo da incerteza associada ao comprimento da abertura do entalhe, COD do CP C(T).

Tabela 4.23 – Valores obtidos durante a medição do COD do CP C(T) com o projetor de perfil.

COD (mm)	Média (mm)	s (mm)
3,821		
3,815		
3,810	3,81540	0,00391
3,816		
3,815		

A Tabela 4.24 mostra de forma resumida os dados utilizados durante o cálculo da incerteza associada ao COD do CP C(T) e os principais resultados.

Tabela 4.24 – Resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada ao COD do CP C(T).

VE	Estimativa (mm)	TA	DP	GL	CS	u (mm)	Contribuição (%)
$\overline{COD}$	3,81540	A	T	4	1	0,00175	73,7
$\Delta R$	0,001	B	R	$\infty$	1	0,00029	2,0
$\Delta C$	0,002	B	N	$\infty$	1	0,00099	23,4
$\Delta A$	0,01	B	N	$\infty$	1	0,00019	0,9
Incerteza padrão combinada $u_c(COD)$ , mm						0,00204	
Graus de liberdade efetivos da medição $v_{ef}(COD)$						7	
Fator de abrangência da medição $k(COD)$						2,36	
Incerteza expandida $U(COD)$ , mm						0,00482	

O valor do comprimento da abertura do entalhe, COD resultante é  $3,815 \pm 0,005$  mm para 95 % de probabilidade de abrangência e um fator de abrangência  $k(COD) = 2,36$ . A partir da Tab. 4.24, se conclui que a variável que mais contribuiu para a incerteza final na medição do comprimento da abertura do entalhe, COD foi a variabilidade das leituras, sendo responsável por 73,7 % da incerteza final. Vale ressaltar que esse valor de incerteza expandida representa 0,13 % do valor médio do comprimento da abertura do entalhe, COD do CP C(T) e, portanto, pode ser considerada adequada.

#### 4.4.7. Resultados do cálculo da incerteza associada à espessura com entalhe lateral Bn

A Tabela 4.25 apresenta o resumo dos resultados decorrentes do cálculo da incerteza associada a espessura com entalhe lateral Bn do CP C(T).

Tabela 4.25 – Valores obtidos durante a medição da espessura com entalhe lateral (Bn) do CP C(T) com paquímetro digital.

Bn (mm)	Média (mm)	s (mm)
10,80		
10,82		
10,79	10,8040	0,0114
10,81		
10,80		

A Tabela 4.26 mostra de forma resumida os dados utilizados durante o cálculo da incerteza associada a espessura do CP C(T) e os principais resultados.

Tabela 4.26 – Resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada à espessura com entalhe lateral do CP C(T).

VE	Estimativa (mm)	TA	DP	GL	CS	u (mm)	Contribuição (%)
$\bar{B}_n$	10,8040	A	T	4	1	0,00510	16,3
$\Delta R$	0,01	B	R	$\infty$	1	0,00289	5,2
$\Delta C$	0,02	B	N	$\infty$	1	0,01000	62,8
$\Delta l_{me}$	0,01	B	N	$\infty$	1	0,00500	15,7
Incerteza padrão combinada $u_c(B_n)$ , mm						0,01262	
Graus de liberdade efetivos da medição $v_{ef}(B_n)$						150	
Fator de abrangência da medição $k(B_n)$						2,36	
Incerteza expandida $U(B_n)$ , mm						0,0298	

O valor da espessura com entalhe lateral resultante é  $10,80 \pm 0,03$  mm para 95 % de probabilidade de abrangência e um fator de abrangência  $k(B_n) = 2,36$ . A partir da Tab. 4.26, se conclui que a variável que mais contribuiu para a incerteza final na medição da espessura foi a calibração do paquímetro digital, sendo responsável por 62,8 % da incerteza final. O valor de incerteza expandida representa menos de 0,3 % do valor médio da espessura e, portanto, pode ser considerada adequada.

#### 4.4.8. Resultados do cálculo da incerteza associada ao comprimento da pré trinca

A Tabela 4.27 apresenta o resumo dos resultados decorrentes do cálculo da incerteza associada ao comprimento da pré trinca do CP C(T).

Tabela 4.27 – Valores obtidos durante a medição do comprimento da pré trinca do CP C(T) com o microscópio óptico.

Pré trinca (mm)	Média (mm)	s (mm)
13,970		
13,974	13,97423	0,00425
13,979		

A Tabela 4.28 mostra de forma resumida os dados utilizados durante o cálculo da incerteza associada da pré trinca do CP C(T) e os principais resultados.

Tabela 4.28 – Resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada à pré trinca do CP C(T).

Variáveis de entrada	Estimativa (mm)	TA	DP	GL	CS	u (mm)	Contribuição (%)
$\overline{Pr}$	13,97423	A	T	2	1	0,0024538	90,3
$\Delta R$	0,00137	B	R	$\infty$	1	0,0003955	2,3
$\Delta C$	0,00069	B	N	$\infty$	1	0,0006850	7,0
$\Delta A$	0,00001	B	N	$\infty$	1	0,0001397	0,3
Incerteza padrão combinada $u_c(\text{Pr})$ , mm						0,0025819	
Graus de liberdade efetivos da medição $v_{\text{ef}}(\text{Pr})$						2	
Fator de abrangência da medição $k(\text{Pr})$						4,3	
Incerteza expandida $U(\text{Pr})$ , mm						0,01111	

O valor da pré trinca resultante é  $13,974 \pm 0,012$  mm para 95 % de probabilidade de abrangência e um fator de abrangência  $k(\text{Pr}) = 4,3$ . A partir da Tab. 4.28, se conclui que a variável que mais contribuiu para a incerteza final na medição da pré trinca foi a variabilidade das leituras, sendo responsável por 90,3 % da incerteza final. Vale ressaltar que esse valor de incerteza expandida representa 0,1 % do valor médio da pré trinca do CP C(T) e, portanto, pode ser considerada adequada.

#### 4.5. Resultados do cálculo de incerteza associados aos resultados do ensaio Integral J

##### 4.5.1. Resultados do cálculo da incerteza associada ao comprimento da pré trinca após ensaio

A Tabela 4.29 apresenta o resumo dos resultados decorrentes do cálculo da incerteza associada ao comprimento da pré trinca após o ensaio do CP C(T).

A Tabela 4.30 mostra de forma resumida os dados utilizados durante o cálculo da incerteza associada da pré trinca após o ensaio do CP C(T) e os principais resultados.

Tabela 4.29 – Valores obtidos durante a medição do comprimento da pré trinca após o ensaio do CP C(T) com o microscópio óptico.

Pré trinca (mm)	Média (mm)	s (mm)
13,251		
13,327		
13,404		
13,426		
13,435	13,31722	0,15534
13,404		
13,380		
13,289		
12,939		

Tabela 4.30 – Resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada à pré trinca após ensaio do CP C(T).

VE	Estimativa (mm)	TA	DP	GL	CS	u (mm)	Contribuição (%)
$\overline{Pp}$	13,31722	A	T	8	1	0,0517789	100,0
$\Delta R$	0,00137	B	R	$\infty$	1	0,0003955	0,0
$\Delta C$	0,00069	B	N	$\infty$	1	0,0006850	0,0
$\Delta A$	0,00001	B	N	$\infty$	1	0,0001332	0,0
Incerteza padrão combinada $u_c(Pp)$ , mm						0,0517851	
Graus de liberdade efetivos da medição $v_{ef}(Pp)$						8	
Fator de abrangência da medição $k(Pp)$						2,31	
Incerteza expandida $U(Pp)$ , mm						0,11942	

O valor da pré trinca após o ensaio do CP C(T) resultante é  $13,317 \pm 0,120$  mm para 95 % de probabilidade de abrangência e um fator de abrangência  $k(Pp) = 2,32$ . A partir da Tab. 4.30, se conclui que a variável variabilidade das leituras foi a única que contribuiu para a incerteza final, sendo responsável por 100,0 % da incerteza final. Vale ressaltar que esse valor de incerteza expandida representa 0,9 % do valor médio da pré trinca após o ensaio do CP C(T) e, portanto, pode ser considerada adequada.

#### 4.5.2. Resultados do cálculo da incerteza associada à área plástica

A Tabela 4.31 mostra de forma resumida os dados utilizados durante o cálculo da incerteza associada à área plástica para o cálculo da curva Integral J e os principais resultados.

Tabela 4.31 – Resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada à área plástica.

VE	Estimativa	TA	DP	GL	CS	U	Contribuição (%)
$A_{pl(i-1)}$	10592,66283 Nmm	A	T	2	1	64,624252 N/mm	77,6
$P_{(i)}$	20998,508 N	A	T	2	0,027 1/mm	83,930 N	0,1
$P_{i(i-1)}$	23578,722 N	A	T	2	0,027 1/mm	83,930 N	
$v_{(i)}$	0,703764 mm	A	T	2	22288,61526 N/mm <sup>2</sup>	0,00155 mm	22,2
$v_{(i-1)}$	0,649926 mm	A	T	2	22288,61526 N/mm <sup>2</sup>	0,00155 mm	
Incerteza padrão combinada $u_c(A_{pl})$ , Nmm						73,35156	
Graus de liberdade efetivos da medição $v_{ef}(A_{pl})$						3	
Fator de abrangência da medição $k(A_{pl})$						2,57	
Incerteza expandida $U(A_{pl})$ , Nmm						188,51349	

O valor da área plástica do CP C(T) resultante é  $9797,0601 \pm 188,51$  Nmm para 95 % de probabilidade de abrangência e um fator de abrangência  $k(A_{pl}) = 2,57$ . A partir da Tab. 4.31, se conclui que a variável  $A_{pl(i-1)}$  foi a que mais contribuiu para a incerteza final, sendo responsável por 77,6 % da incerteza final. Vale ressaltar que a incerteza expandida representa 1,6 % do valor médio da área plástica, portanto, pode ser considerada adequada.

#### 4.5.3. Resultados do cálculo da incerteza associada à J

O histograma dos valores simulados de J é mostrado na Fig. (4.2). Os valores de *kurtosis* e *skewness* são -0,00012 e 0,001259 respectivamente. O teste de Kolmogorov-Smirnov foi aplicado utilizando o *software* Statistica 7.0 para um  $\alpha$  0,01 e o valor de  $p < 0,01$ . Estes resultados evidenciam o comportamento normal dos valores deste mensurando. O valor de tenacidade à fratura resultante do ensaio integral J do aço AISI 4340 é  $143,23 \pm 2,57$  kJ/m<sup>2</sup> para 95,45 % de probabilidade de abrangência e um fator de abrangência  $k(J) = 2,00$ . A incerteza expandida representa 1,6 % do valor de J, portanto, pode ser considerada adequada.

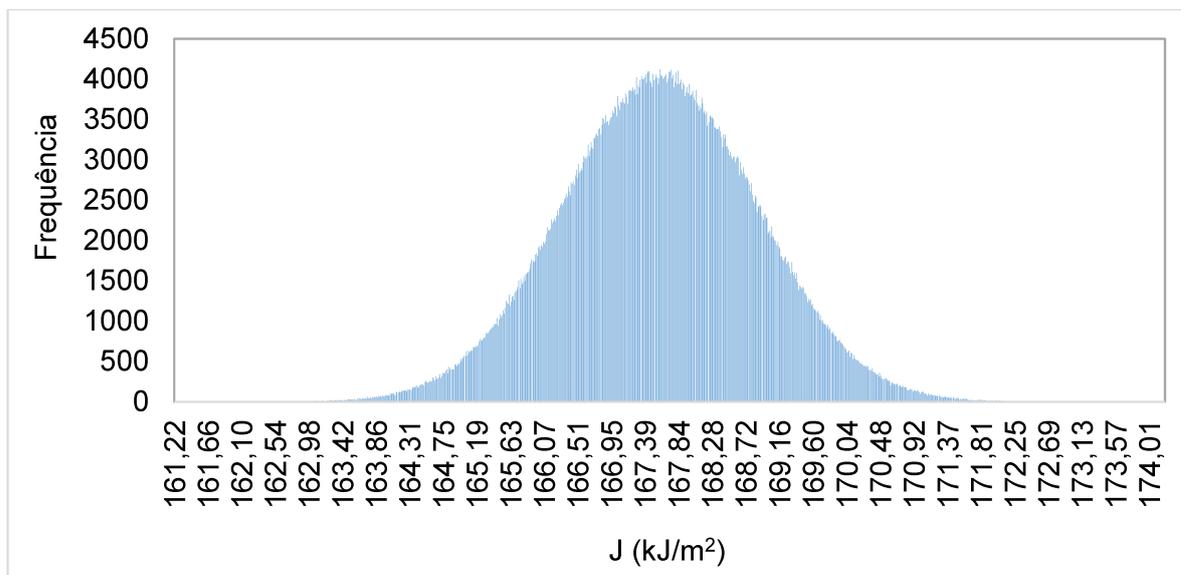


Figura 4.2 – Histograma dos valores simulados de J durante a simulação de Monte Carlo.

O valor de incerteza expandida do J representa 1,6 %. Este resultado permite inferir que tanto a metodologia quanto a instrumentação utilizada possibilitam a obtenção da tenacidade à fratura via integral J para um CP com excelente qualidade. Pode-se concluir que todos os instrumentos e sistemas de medição utilizados para medir os diversos mensurandos são adequados, ou seja, eles possuem resolução e desempenho metrológico adequados para a aplicação em questão. Não existe, por tanto, a necessidade de introduzir modificações, recomenda-se apenas manter a manutenção destes equipamentos em dia, bem como as verificações periódicas. Recomenda-se ainda, que o ensaio seja sempre realizado por pessoal devidamente capacitado e que o procedimento operacional padrão (POP) esteja sempre disponível.

#### 4.6. Resultados da avaliação da repetibilidade entre os CPs

Para uma avaliação da incerteza associada à variabilidade de J foram analisados três corpos de prova ensaios nas mesmas condições (condições de repetibilidade). A incerteza associada à tenacidade à fratura considerando a variabilidade das leituras para o aço AISI 4340 é  $152,18 \pm 6,53$  kJ/m<sup>2</sup> para 95,45 % de probabilidade de abrangência e um fator de abrangência  $k(J) = 2,00$ . A incerteza expandida representa 4,3 % do valor de J, portanto, pode ser considerada adequada. Pode-se concluir que os valores de J apresentam repetibilidade e qualidade adequadas. Conclui-se que incerteza associada à variabilidade das leituras não influencia significativamente nos resultados de J.

Combinando a incerteza associada à variabilidade dos valores de J para os três CPs e aquela decorrente da determinação do J para um CP obtém-se a incerteza total de J. O valor de tenacidade à fratura resultante do ensaio integral J do aço AISI 4340 para os três corpos de prova é  $152,18 \pm 12,91 \text{ kJ/m}^2$  para 95,45 % de probabilidade de abrangência e um fator de abrangência  $k(J) = 2,00$ . A incerteza expandida representa 8,5 % do valor de J, portanto, pode ser considerada adequada. Conclui-se que à variabilidade das leituras não influenciam significativamente nos resultados de J.

Para ter uma ideia mais abrangente da incerteza associada à variabilidade dos valores de J foram considerados os resultados de outros trabalhos desenvolvidos no LTAD e que utilizaram a mesma instrumentação. Dentre eles, o trabalho de Melo (2019) que avaliou a tenacidade à fratura de aços de alta resistência e baixa liga (aço C e aço F) ao ar via ensaios de Integral J. De acordo com o autor o aço C apresenta dureza de 32,6 HRC e o aço F de 25,0 HRC. Basílio (2022), avaliou o efeito da fragilização por hidrogênio na tenacidade à fratura do aço AISI 4340 (32 HRC) obtida via integral J. Para efeito de comparação a Fig. 4.3 mostra os valores médios obtidos por estes autores para cada condição e aqueles encontrados no presente trabalho. As barras de erro representam a incerteza expandida associada à variabilidade dos valores de J para uma probabilidade de abrangência de 95 %.

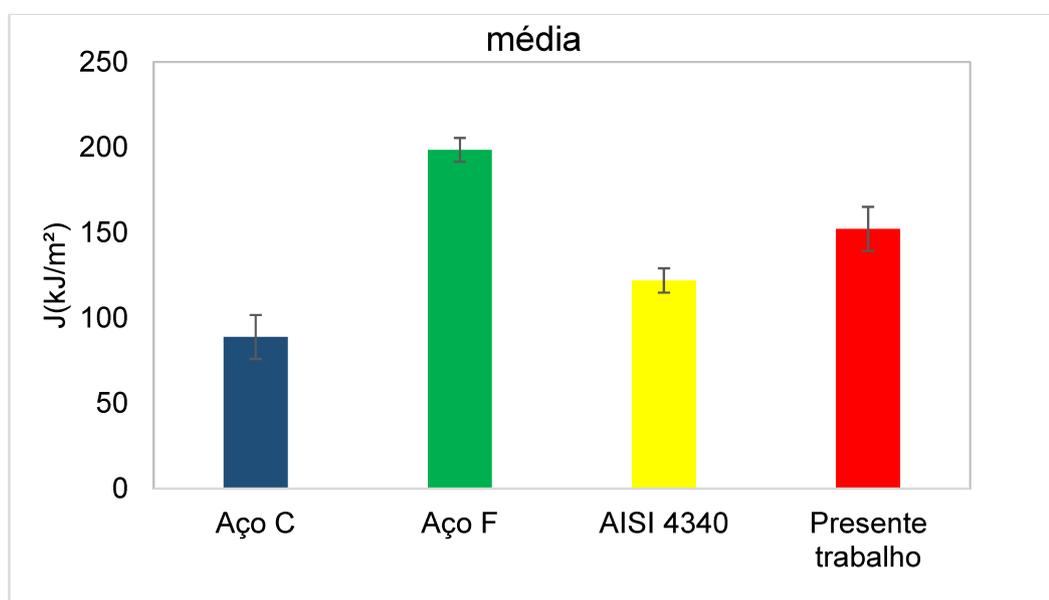


Figura 4.3 – Média dos valores de J.

Para facilitar a análise a Fig. 4.4 mostra a incerteza em % em relação ao valor médio de J encontrado em cada caso.

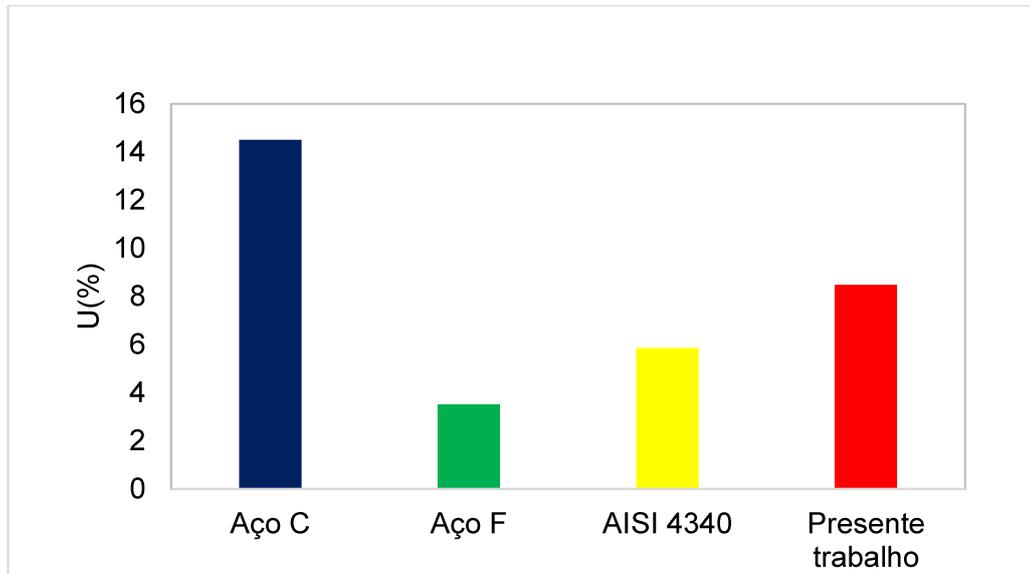


Figura 4.4 – Incerteza em % em relação ao valor médio de J.

A partir das Figs. 4.3 e 4.4 se conclui que o valor da tenacidade à fratura para o aço C, aço F e aço AISI 4340 é  $88,81 \pm 12,88$  kJ/m<sup>2</sup>,  $198,59 \pm 6,98$  kJ/m<sup>2</sup> e  $121,96 \pm 7,14$  kJ/m<sup>2</sup>, respectivamente. A incerteza expandida representa 14,5 %, 3,5 % e 5,7 % do valor de J, respectivamente. Pode-se concluir que a incerteza associada à variabilidade dos valores de J é menor ou igual a 10,0 % com exceção do aço C com 14,5 %.

Almeida (2022) realizou um estudo da microestrutura dos aços C e F. As imagens da microestrutura dos aços obtidas no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) são mostradas nas Figs. 4.5 e 4.6.

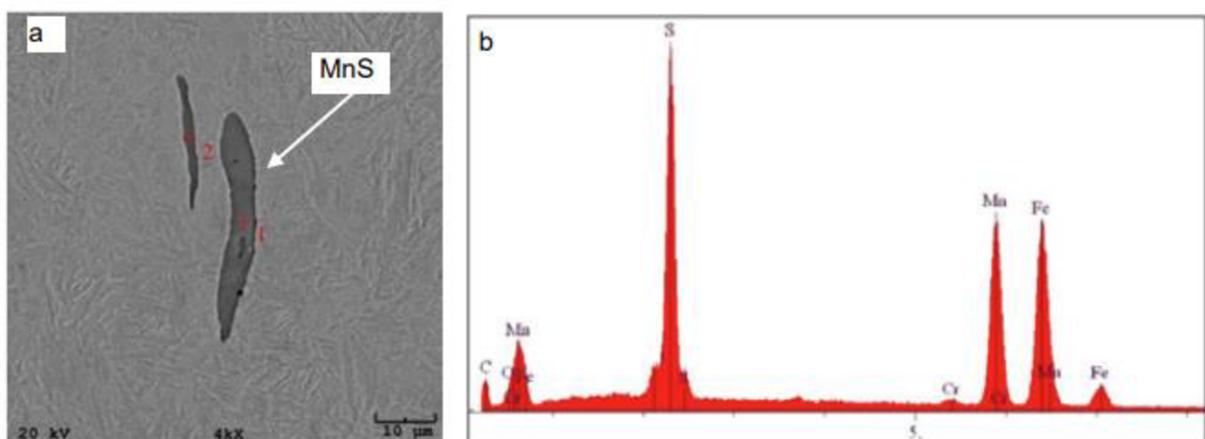


Figura 4.5 – Imagem obtida no MEV da microestrutura do aço C: (a) visão geral; (b) espectro da inclusão no ponto 1 (ALMEIDA, 2022).

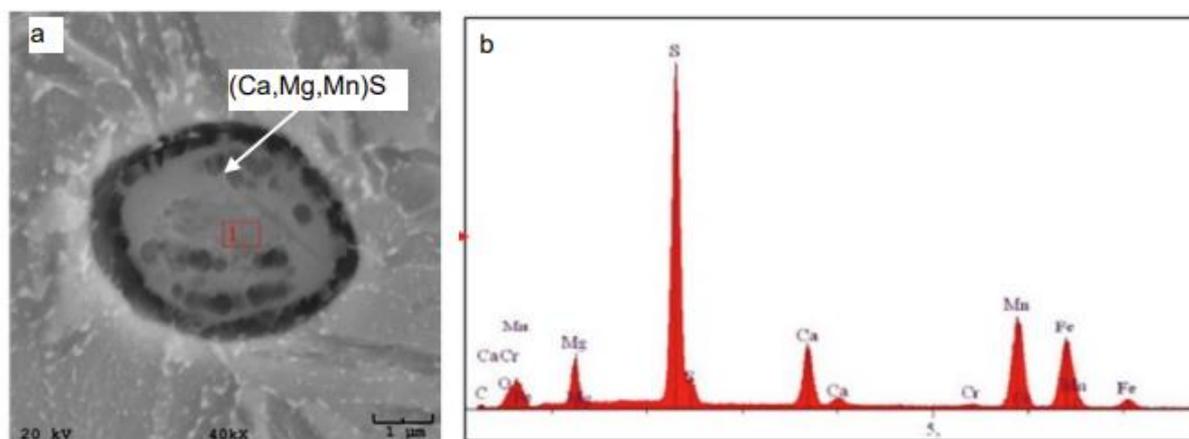


Figura 4.6 – Imagem obtida no MEV da microestrutura do aço F: (a) visão geral; (b) espectro da inclusão no ponto 1 (ALMEIDA, 2022).

Almeida (2022) concluiu que a morfologia e as dimensões das inclusões dos aços C e F são diferentes. O aço C apresenta inclusões alongadas com 36,5 µm de comprimento enquanto que o aço F apresenta inclusões esferoidais com diâmetro de 4,0 µm. As análises de *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (EDS) mostraram que as inclusões do aço C são sulfetos de manganês (MnS) e as inclusões do aço F de (Ca, Mg, Mn)S, Figs. (4.5(b) e 4.6(b)).

De acordo com Andersson e Seetharaman (2000) e Turkdogan (1996), o cálcio contribui para modificar a morfologia do MnS, assim como melhorar a distribuição das inclusões. Além disso, há uma melhoria nas propriedades do material, como ductilidade, tenacidade e usinabilidade. A presença de inclusões não metálicas afeta as propriedades mecânicas dos aços (GRAJCAR et al., 2011). Inclusões não metálicas são frequentemente motivo de queda na resistência ao trincamento, na tensão de fadiga e na resistência à corrosão de aços com alto teor de manganês (GRAJCAR et al., 2010).

Para Shen et al. (2019), menores inclusões podem levar a menores concentrações de tensão e, conseqüentemente, reduzir a possibilidade de iniciação de trinca. Conclui-se que a dispersão nos valores de J do aço C é devido à presença dessas inclusões não metálicas e, portanto, é um fator externo ao ensaio.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou a incerteza associada à tenacidade à fratura obtida via ensaio Integral J utilizando os métodos GUM e Monte Carlo. Para tanto, foi desenvolvida e documentada uma metodologia de cálculo utilizando o Microsoft Excel® 2019. Os resultados obtidos foram comparados com àqueles decorrentes das réplicas do ensaio e com os resultados da literatura. A seguir são apresentadas as principais conclusões desse trabalho:

a) A incerteza expandida associada à tenacidade à fratura via ensaio Integral J para um único CP C(T), fabricado em aço AISI 4340, foi de  $143,23 \pm 2,57$  kJ/mm<sup>2</sup>. Esta representa 1,6 % da média para 95,45 % de probabilidade de abrangência e permite concluir que a metodologia e a instrumentação utilizadas nas condições experimentais deste trabalho são adequadas.

b) A incerteza expandida associada à variabilidade dos valores de tenacidade à fratura via ensaio Integral J para três CPs C(T), fabricados em aço AISI 4340 é de 12,91 kJ/mm<sup>2</sup> ( $152,18 \pm 6,53$  kJ/mm<sup>2</sup>). Esta incerteza representa 4,3 % da média para 95,45 % de probabilidade de abrangência.

c) A incerteza expandida associada à tenacidade à fratura via ensaio Integral J considerando a variabilidade das leituras dos três ensaios em corpos de prova fabricados em aço AISI 4340 e a incerteza do valor de J para um único ensaio, é 12,91 kJ/mm<sup>2</sup> ( $152,18 \pm 6,53$  kJ/mm<sup>2</sup>) que representa 8,5 % da média para 95,45 % de probabilidade de abrangência.

d) O cálculo da incerteza associada à tenacidade à fratura via ensaio integral J é um grande desafio considerando que foi necessário avaliar 19 mensurandos para obter o valor de J.

e) Foi desenvolvida e documentada uma metodologia de cálculo da incerteza de medição associada a tenacidade à fratura utilizando o Microsoft Excel® 2019 e validada.

f) A metodologia desenvolvida permite popularizar o cálculo da incerteza associada à tenacidade à fratura obtida via integral J segundo a norma ASTM E1820 (ASTM, 2020). Permite também popularizar o cálculo da incerteza associada ao módulo de elasticidade, limite de escoamento e limite de resistência obtidos via ensaio de tração. Considerando os resultados de tenacidade à fratura via ensaio Integral J da literatura conclui-se que a incerteza associada à variabilidade dos valores de J é menor ou igual 14,5 % em condições de repetibilidade.

g) A partir dos valores de incerteza expandida obtidos conclui-se que os sistemas de medição utilizados, a fabricação dos corpos de prova fabricados e o método de cálculo proposto pela norma ASTM E1820 (ASTM, 2020) são adequados para aplicação em questão.

## CAPÍTULO VI

### PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Por meio dos estudos e conclusões obtidos nesse trabalho, são apresentadas as seguintes propostas para trabalhos futuros:

- Avaliar a incerteza associada à tenacidade à fratura nos ensaios normatizados de  $K_{IC}$  e CTOD.
- Avaliar a incerteza associada à tenacidade à fratura para corpo de prova SE(B) definidas na norma ASTM E399 (ASTM, 2019).
- Avaliar a incerteza associada à tenacidade à fratura obtida via ensaios de indentação instrumentada.
- Implementar os códigos no *software* MatLab®.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, “NBR ISSO/IEC 17025 – Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração”. Rio de Janeiro, 2017, 20p.

AMIRI, S.; LECIS, N.; MANES, A.; GIGLIO, M. “A study of a micro-indentation technique for estimating the fracture toughness of Al6061-T6”. **Mechanics Research Communications**, v. 58, p. 10-16, 2014.

ANDERSON, T. L., “**Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications**”. 3ª Ed. New York: CRC Press, 2005. <https://doi.org/10.1201/9781420058215>

ASTM E399, “Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials”. **ASTM International**, West Conshohocken, 2019.

ASTM E813-81, “Standard Test Method for  $J_{IC}$ , a measure of fracture toughness. **ASTM International**, West Conshohocken, 1982.

ASTM E1290, “Standard Test Method for Crack-Tip Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurement”. **ASTM International**, West Conshohocken, 2013.

ASTM E1820, “Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness”. **ASTM International**, West Conshohocken, 2020.

ASTM E1823, “Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing”, **ASTM International**, West Conshohocken, 2013.

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, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML. "Evaluation of measurement data - Supplement 1 to the Guide to the expression of uncertainty in measurement - Propagation of distributions using a Monte Carlo method". **JCGM 101**. 90p., 2008.

BROWN, W. F., SRAWLEY, J. E., "In: Plane Strain crack toughness testing of high strength metallic materials". **ASTM STP 410**. American Society for Testing and Materials, 1966. p. 1-65. <https://doi.org/10.1520/STP44663S>

CHEN, J. ZHOU H. LIU Z. KETKAEW, J. SHAO, L. LI, N. GONG, P. SAMELA, W. GAO, H. SCHROERS, J., "Test sample geometry for fracture toughness measurements of bulk metallic glasses". **Acta Materialia**, v. 145, n. 20, p. 203001, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.12.026>.

CHEN, Jinju. "Indentation-based methods to assess fracture toughness for thin coatings". **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 45, n. 20, p. 203001, 2012.

COUTO, P. R. G.; OLIVEIRA, J. S.; CINELLI, L. R. "Algumas Considerações sobre as Metodologias de Cálculo da Estimativa da Incerteza de Medição citadas no ISO GUM 95". 2002.

CLARKE G. A., ANDREWS, W. R., PARIS, P.C., SCHMIDT, D. W., "Single specimen tests for  $J_{IC}$  determination". In: **Mechanics crack growth. ASTM STP 590**. American Society for Testing and Materials, 1976, p. 27-42. <https://doi.org/10.1520/STP33937S>

DÉSENFANT, M., PRIEL, M., "**Reference and additional methods for measurement uncertainty evaluation**". *Measurement* 95:339–344. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.10.022>

DIAS, J. L. D. "Avaliação da incerteza de medição em métodos quantitativos de análise segundo o guia para expressão de incerteza de medição". Relatório resumido das atividades desenvolvidas pelo Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) (Graduação em Química) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 1. 2016.

FABRICIO, D. A. K. TREVISAN, L. REGULY, A. CATEN, C. S. "Measurement uncertainty of plane-strain fracture toughness  $K_{IC}$  testing by the Monte Carlo Method". *Metallurgy and materials*. 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/0370-44672017710045>

FABRICIO, D. A. K. TREVISAN, L. STROHAECKER, T. R. "Incerteza de Medicao do Ensaio de Tenacidade à Fratura  $K_{IC}$ ". **Periodico Tche Quimica**. v13, 2015.

GRIFFITH, A. A., "The phenomena of rupture and flow in solids. **Philos Trans Roy Soc Lond**, Ser A, 1920. 221:163-97. <https://doi.org/10.1098/rsta.1921.0006>

HAAG, J. "Propagação de Trincas por Fadiga em Arames de Alta Resistência Mecânica". 2012. 55p. Trabalho de Conclusão de Curso - Departamento de Metalurgia, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

HE, M.; LI, F.; CAI, J.; CHEN, B. "An indentation technique for estimating the energy density as fracture toughness with Berkovich indenter for ductile bulk materials". **Theoretical and applied fracture mechanics**, v. 56, n. 2, p. 104-111, 2011.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL (INMETRO) "Avaliação de dados de medição - Guia para a expressão de incerteza de medição – GUM 2008". **INMETRO**, 2012.

IRWIN, G.R., "Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate". **J Appl Mech**, 1957. 24:361-64.

IRWIN, G. R., KIES, J. A., SMITH, H.L., "Fracture strengths relative to onset and arrest of crack propagation". **Proc Am Soc Test Mater**, 1958. 58:640-60.

IRWIN, G. R., "Plastic zone near a crack and fracture toughness". In: **Proceedings of the 7<sup>th</sup> sagamore ordnance materials conference**, 1960. p. 463-78.

JEON, S. W.; JEON, S. W.; LEE, K. W.; KIM, J. Y.; KIM, W. J.; PARK, C. P.; KWON, D. "Estimation of fracture toughness of metallic materials using instrumented indentation: critical indentation stress and strain model", **Experimental Mechanics**, v. 57, n. 7, p. 1013-1025, 2017.

JEON, E. "Method for Estimating Uncertainty of Indentation Tensile Properties in Instrumented Indentation Test". **Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME**, 2009.

JOYCE, J. A., GUDAS, J. P., "Computer interactive  $J_{IC}$  testing of navy alloys". **Elastic-plastic fracture. ASTM STP 668**. American Society for Testing and Materials, 1979. p. 451-68. <https://doi.org/10.1520/STP35843S>

KOEPKE, L. WEEKS, T.S. SPLETT, J., "Using Monte Carlo Methods to Compute the Uncertainty of Fracture Toughness and Fracture Resistance Curves". NIST Technical Note. 2023. <https://doi.org/10.6028/NIST.TN.2212>

KOSTIC, S., MILJOJKOVIC, J., SIMUNOVIC, G., VUKELIC, D., & TADIC, B. "Uncertainty in the determination of elastic modulus by tensile testing". **Engineering Science and Technology, an International Journal**, 2021. DOI:10.1016/j.jestch.2021.05.002

LÓPEZ, J. M. M. "Modelagem do Trincamento de Misturas Asfálticas pelo Método dos Elementos Discretos". 2010. 114p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

MEDINA, J. A. H., DE CASTRO, J. T. P. "Avaliação de Previsões de Fratura Elastoplástica". 2014. 203p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

MELO, G. F. "Tenacidade à fratura e fragilização por hidrogênio de aços de alta resistência e baixa liga". 2019. 184 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

MURTY, K. L.; MATHEW, M. D.; WANG, Y.; SHAH, V. N.; HAGGAG, F. M. "Nondestructive determination of tensile properties and fracture toughness of cold worked A36 steel". **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 75, n. 11, p. 831-840, 1998.

REIS, F.S. "Avaliação da Incerteza Associada ao Módulo de Elasticidade no Ensaio de Tração". 2022. 72 f. Projeto de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG

RICE, J. R., "A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks". **J Appl Mech**, 1968. 35:379-86. <https://doi.org/10.1115/1.3601206>

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

RODRIGUES, G. B., FREITAS, M. A. F. M., HWANG, H. F., FRANCO, S. D., FILHO, W. W. B., ARENCIBIA, R. V., "Evaluation of uncertainty associated with fracture toughness of Inconel 718 using the SNTT method". **COBEM 25<sup>th</sup> International Congress of Mechanical Engineering**, 2019.  
<https://doi.org/10.26678/ABCM.COBEM2019.COB2019-0439>

SRRAWLEY, J. E., JONES, M. H., BROWN, W.F., "Determination of plane strain fracture toughness". **Materials research and standards**, vol. 7. American Society for Testing and Materials, 1967. p. 261-6.

VALDÉS, R.A.; PIRATELLI-FILHO, A.; S. LEAL, J.E.S.; DE OLIVEIRA ROSA, V.A. "Incerteza de medição - Metodologia de cálculo, conceitos e aplicações". **Editora Interciência**, ISBN: 9788571934269, 1a. Edição, 2019. 248p.

WANG, J. A.; LIU K. C. and McCABE, D. E., "A New Approach to Evaluate Fracture Toughness of Structural Materials". **ASME**, Vol. 126, 2004, pp. 534-540.  
<https://doi.org/10.1115/1.1804202>

WELLS, A. A., "Application of fracture mechanics at and beyond general yielding". **Br Weld J**, 1963. 10:563-70.

WEN, X. L.; ZHAO, Y. B.; WANG, D. X.; PAN, J. "Adaptive Monte Carlo and GUM methods for the evaluation of measurement uncertainty of cylindricity error". **Precision Engineering**, v. 37, n. 4, out. 2013. p. 856–864.  
<https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2013.05.002>

WILLIAMS, M. L., "On the stress distribution at the base of a stationary crack". **J Appl Mech**, 1957. 24:109-14.

YU, F; JAR, P.-Y. B; HENDRY, M. T. "Indentation for fracture toughness estimation of high-strength rail steels based on a stress triaxiality-dependent ductile damage model". **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v. 94, p. 10-25, 2018.

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.

ZHANG, S.; ZHOU, S. LI, M. FU, B., "Calculation and comparison on fracture toughness of specific reliability between ASTM and ISO standards". **Material Research Express**, v 7, 2020. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab6c21>

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

**ANEXO 1 - Certificado de calibração Instron (página 1/4)**

**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO**

EMITENTE: LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO INSTRON

DATA DE EMISSÃO: 24-jun-2022

NÚMERO DO CERTIFICADO: 22062402MC



**INSTRON Brasil Equipamentos Científicos Ltda**  
 Rua Quirino Zagonel, 257 - Vila Braga  
 São José dos Pinhais, PR CEP 83020-250  
 Telefone: +55 41 3035-9400  
 E-mail: servicebras@instron.com

Página 1 de 4 páginas

SIGNATÁRIO APROVADO

**SILVIO OYAMA**  
 25489838892

Digitally signed by SILVIO OYAMA, DN: cn=SILVIO OYAMA, o=INSTRON BRASIL EQUIPAMENTOS CIENTÍFICOS LTDA, ou=INSTRON, email=silvio.oyama@instron.com.br, c=BR

**Tipo de calibração:** Força  
**Padrão relevante:** ISO 7500-1:2018  
**Data da calibração:** 24-jun-2022

**\*\*\* RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO \*\*\***

**ID do sistema:** 8801MTU6168  
**Número Série Transdutor:** 2527-111/302718

**Indicador 1. - Leitura digital: Console v. 8.9.374 (kN)**  
**PASSOU Classe 1:** 100% da Faixa no modo Tração (20.1075 to 100.7163)  
**PASSOU Classe 1:** 100% da Faixa no modo Compressão (-20.1567 to -100.6263)

A Classe do Sistema para um intervalo específico é baseada na avaliação das seguintes variáveis: erro, repetibilidade, retorno a zero, resolução, classe do padrão utilizado e reversibilidade se aplicável.

Cliente		Temperatura	
Nome:	UFU - Lab. de Tecnologia em Atrito e Desgaste	Temperatura Mínima:	21.2 °C
Endereço:	Av. João Naves de Ávila, 2121 - Campus Santa Mônica Bloco 5F 38408-100 Uberlândia_MG Brasil	Temperatura Máxima:	21.3 °C
Contato:	Raphael Rezende Pires		
E-mail:	raphael.pires@ltad.com.br		
Ordem de Serviço:	18365		

Máquina		Transdutor	
Fabricante:	INSTRON	Fabricante:	INSTRON
Tipo:	Servo-Hidráulica	Capacidade:	100 kN
Ano de fabr.:	2015	Sentido:	Tração/Compressão

**Metodologia**

A avaliação da máquina de ensaio foi realizada nas instalações do cliente acima mencionada, em conformidade com a norma ISO 7500-1:2018 «Materiais metálicos - Calibração e Verificação de máquinas de ensaio estáticas uniaxiais - Parte 1: Máquinas de ensaio de tração / compressão - Calibração e Verificação do sistema de medição de força utilizando o procedimento Instron PTEC 011.

O Sistema foi calibrado na condição "Conforme Encontrado" sem que ajustes ou reparos tenham sido realizados. Esta também é a condição "Conforme Deixado".

Instron CalproCR Version 3.50

Este certificado atende aos requisitos de acreditação pela Cgcre que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida (ou ao Sistema Internacional de Unidades - SI). Os resultados indicados neste certificado e o relatório seguinte é relativo apenas aos itens calibrados. Qualquer limitação de uso em relação ao resultado desta calibração, será indicada na seção comentários. Este relatório não deverá ser reproduzido, exceto na totalidade, sem a aprovação do laboratório emissor.

## ANEXO 1 - Certificado de calibração Instron (página 2/4)

### CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

Laboratório Calibração acreditado Cgcre de acordo com ABNT NBR ISO/IEC 17025 sob número CAL 0197

NÚMERO DO CERTIFICADO:  
**22062402MC**

Página 2 de 4 páginas

Antes da calibração, uma inspeção foi realizada de acordo com as diretrizes da seção 5 e anexo A da ISO 7500-1. Durante a inspeção, a máquina de teste foi considerada estar em Boas condições.

Nenhum acessório vinculado mecanicamente foi montado ao se realizar essa calibração.

#### Classificação do Sistema

A calibração e os equipamentos utilizados estão em conformidade com um programa controlado de Garantia de Qualidade, que atende às especificações descritas na norma ISO/IEC 17025:2017.

O sistema de medição de força foi calibrado quanto às forças indicadas usando equipamento calibrado dentro dos requisitos da norma ISO 7500-1:2018.

#### Resumo de dados - Indicador 1. - Leitura digital: Console v. 8.9.374 (kN)

##### TRAÇÃO

% do intervalo	Erro Relativo (%)			Repetitividade Erro (%)	Classe de Erro	Resolução (+/- kN)	Classe Padrão
	Execução 1	Execução 2	Execução 3				
<b>100 Intervalo % (100 kN)</b>							
Retorno para 0	-0.042	-0.050	-0.035		0.5	0.001	
20	-0.535	-0.520	-0.568	0.048	1	0.001	0.5
40	-0.618	-0.632	-0.601	0.031	1	0.001	0.5
60	-0.642	-0.655	-0.662	0.020	1	0.001	0.5
80	-0.671	-0.684	-0.689	0.018	1	0.001	0.5
100	-0.702	-0.688	-0.701	0.014	1	0.001	0.5

#### Resumo de dados - Indicador 1. - Leitura digital: Console v. 8.9.374 (kN)

##### COMPRESSÃO

% do intervalo	Erro Relativo (%)			Repetitividade Erro (%)	Classe de Erro	Resolução (+/- kN)	Classe Padrão
	Execução 1	Execução 2	Execução 3				
<b>100 Intervalo % (100 kN)</b>							
Retorno para 0	-0.001	-0.002	-0.001		0.5	0.001	
20	-0.772	-0.783	-0.796	0.024	1	0.001	0.5
40	-0.679	-0.690	-0.704	0.025	1	0.001	0.5
60	-0.654	-0.646	-0.671	0.025	1	0.001	0.5
80	-0.640	-0.635	-0.651	0.016	1	0.001	0.5
100	-0.621	-0.615	-0.620	0.006	1	0.001	0.5

Classe de pior resolução: 0.5 para 100 Intervalo % (indicador 1; Tração), 0.5 para 100 Intervalo % (indicador 1; Compressão).

#### Dados - Indicador 1. - Leitura digital: Console v. 8.9.374 (kN)

##### TRAÇÃO

% do intervalo	Execução 1		Execução 2		Execução 3		Incerteza da medição* Relativa % (+/- kN)
	Indicado (kN)	Aplicado (kN)	Indicado (kN)	Aplicado (kN)	Indicado (kN)	Aplicado (kN)	
<b>100 Intervalo % (100 kN)</b>							
Retorno para 0	-0.042		-0.050		-0.035		
20	20.000	20.1075	20.009	20.1135	20.004	20.1183	0.13 0.026

## ANEXO 1 - Certificado de calibração Instron (página 3/4)

### CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

Laboratório Calibração acreditado Cgcre de acordo com ABNT NBR ISO/IEC 17025 sob número CAL 0197

NÚMERO DO CERTIFICADO:  
**22062402MC**

Página 3 de 4 páginas

**Dados - Indicador 1. - Leitura digital: Console v. 8.9.374 (kN)**

#### TRAÇÃO

% do intervalo	Execução 1		Execução 2		Execução 3		Incerteza da medição*	
	Indicado (kN)	Aplicado (kN)	Indicado (kN)	Aplicado (kN)	Indicado (kN)	Aplicado (kN)	Relativa %	( +/- kN)
<b>100 Intervalo % (100 kN)</b>								
40	40.000	40.2486	39.998	40.2522	40.015	40.257	0.13	0.053
60	60.002	60.38968	60.001	60.39689	60.004	60.4041	0.13	0.079
80	79.995	80.53559	80.007	80.55841	80.008	80.56322	0.13	0.11
100	100.003	100.7103	100.009	100.7019	100.010	100.7163	0.13	0.13

**Dados - Indicador 1. - Leitura digital: Console v. 8.9.374 (kN)**

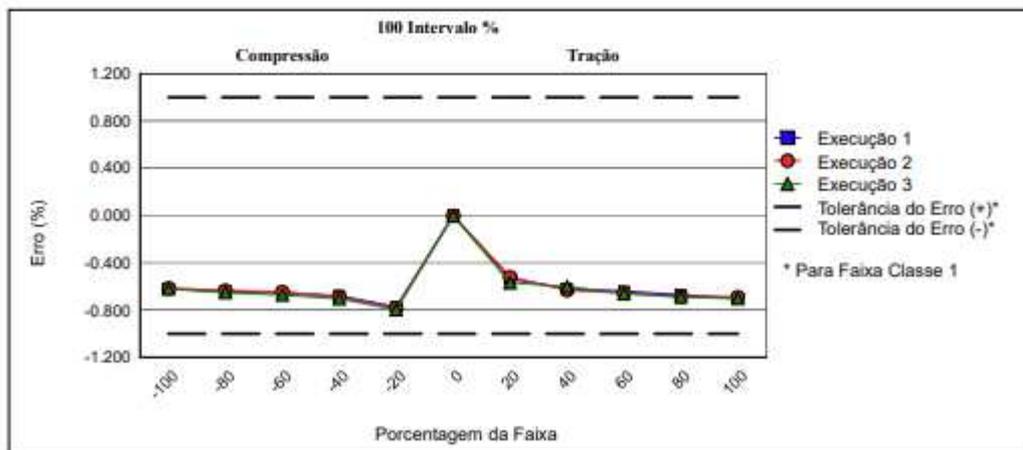
#### COMPRESSÃO

% do intervalo	Execução 1		Execução 2		Execução 3		Incerteza da medição*	
	Indicado (kN)	Aplicado (kN)	Indicado (kN)	Aplicado (kN)	Indicado (kN)	Aplicado (kN)	Relativa %	( +/- kN)
<b>100 Intervalo % (100 kN)</b>								
Retorno para 0	0.001		0.002		0.001			
20	-20.001	-20.1567	-20.000	-20.1579	-20.007	-20.1675	0.13	0.027
40	-40.004	-40.2774	-40.004	-40.282	-40.000	-40.2834	0.13	0.053
60	-60.009	-60.4041	-60.009	-60.3993	-60.005	-60.4101	0.13	0.079
80	-80.001	-80.5164	-80.004	-80.51518	-80.002	-80.52598	0.13	0.11
100	-100.001	-100.6263	-100.004	-100.6227	-100.002	-100.6263	0.13	0.13

\* A incerteza expandida relatada baseia-se em uma incerteza padrão multiplicada por um fator de abrangência  $k = 2$ , proporcionando um nível de confiança de aproximadamente 95%.

A incerteza declarada refere-se aos valores obtidos durante a calibração e não leva em consideração fatores como desvio a longo prazo, temperatura e alinhamento - a influência de tais fatores devem ser levadas em consideração.

**Dados Gráficos - Indicador 1. - Leitura digital: Console v. 8.9.374 (kN)**



## ANEXO 1 - Certificado de calibração Instron (página 4/4)

<h3 style="text-align: center; margin: 0;">CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO</h3> <p style="margin: 5px 0 0 0;">Laboratório Calibração acreditado Cgcre de acordo com ABNT NBR ISO/IEC 17025 sob número CAL 0197</p>	<p style="margin: 0;">NÚMERO DO CERTIFICADO: <b>22062402MC</b></p> <hr/> <p style="margin: 0;">Página 4 de 4 páginas</p>
--	--

#### Equipamentos de Calibração

Os resultados das medições produzidas com os Padrões utilizados pela Instron são rastreáveis ao SI (Sistema Internacional de Unidades) através de reconhecimento internacional dos Institutos de Metrologia (NIST, NPL, PTB, Immetro, etc.).

ID do equipamento	Descrição	Capacidade	Data da cal.	Validade da cal.	Ref. do certificado
975608	indicador de temp.	NA	22-nov-2021	22-nov-2023	J648838/2021
J93154	indicador de força	NA	05-out-2020	05-out-2022	181322-101
N402899	célula de carga	56202 lbf	10-jun-2022	10-jun-2024	1200533

*A Classe do Equipamento de Calibração usado era igual ou melhor que a Classe para a qual a máquina de testes foi calibrada.*

#### Equipamentos Usados na Calibração

Intervalo

Escala

completa

(%)	Modo	ID do equipamento	Percentual(is) do intervalo	Precisão (+/-)
100	Tração	N402899	20/ 40/ 60/ 80/ 100	0.08% da leitura
100	Compressão	N402899	20/ 40/ 60/ 80/ 100	0.08% da leitura
Todos	Tração-Compressão	975608	Todos	1.8 "F

*A precisão do indicador de força usado com um dispositivo elástico está incorporada na precisão informada pelo dispositivo.*

*A precisão do equipamento de calibração usado era igual ou melhor que a precisão indicada na tabela acima.*

#### Comentários

Localização do Equipamento: Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste - Bloco 5F

Verificado por: Marcio Campolina  
Service Technician

NOTA: O Artigo 9 da norma ISO 7500-1 declara: O tempo entre as calibrações depende do tipo da máquina de testes, do padrão de manutenção e da quantidade de utilizações. A não ser que seja especificado de outra forma, recomenda-se que a calibração seja realizada em intervalos de no máximo 12 meses. Em qualquer caso, a máquina deve ser calibrada se for movida para um novo local com a necessidade de desmontagem ou se sofrer reparos ou ajustes de vulto.

## ANEXO 2 - Certificado de calibração do Paquímetro Digital (página 1/2)

**Mitutoyo**  
Mitutoyo S/A Americana Ltda.

**LABORATÓRIO DE METROLOGIA**  
REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Calibração NBR ISO 10012:2003  
CAL 0031

Pag. 1 / 2

**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N.º. 07625/13**

Cliente : " UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, "   
Endereço : Avenida João Naves de Avila, 2121 - Uberlândia - MG.  
Ordem de serviço: 068.189

**1 - Objeto Calibrado**

PAQUÍMETRO DIGITAL  
Fabricante: Mitutoyo  
Código: 500-196-20B  
N.º de Série: 10901281  
Faixa nominal : 150 mm  
Resolução : 0.01 mm  
Identificação do proprietário : Não consta

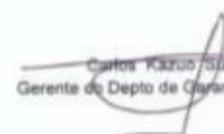
**2 - Padrões utilizados na Calibração:**

Blocos padrão Certificado N.º. 00199/13 - RBC - Mitutoyo	Número: 00112 Validade: 01/2014
Relógio apalpador Certificado N.º 00997/13 - RBC - Mitutoyo	Número: LCF233 Validade: 08/2013
Padrão escalonado para paquímetro Certificado N.º 05825/13 - RBC - Mitutoyo	Número : 010258 Validade: 12/2013

**3 - Procedimento de Medição:** PML - 0013 Versão 5

Os valores de indicação do paquímetro foram verificados comparativamente com padrão escalonado e Blocos-padrão e a leitura da indicação tomada no paquímetro.

Data da calibração: 23 de Julho de 2013  
Data da emissão: 23 de Julho de 2013

  
Carlos Kazuo Saitake  
Gerente do Depto de Garantia da Qualidade

Este certificado atende aos requisitos de acreditação pelo COCER que avalia a competência do laboratório e comprova sua confiabilidade e a precisão das medições em Sistema Internacional de Unidades - SI.  
A regulamentação deste Certificado está prevista em todo o dependente de aprovação por escrito da Mitutoyo.  
Os resultados deste Certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nos pontos especificados, não sendo extensivos a qualquer outro.

Mitutoyo Control Ar. João Carlos de Silva Borges, 1300 - Bairro Anário - CEP 04720-000 - São Paulo - SP - Telefone: (11) 5043-0000 - Fax: (11) 5041-5702  
Atendimento: Rua, João Naves, 1335 - Bairro Povo - CEP 08620-000 - Suzano - SP - Tel: (11) 4746-9858 - Fax: (11) 4746-9858 - E-mail: atendimento@mitutoyo.com.br  
Laboratório: Tel: (11) 4746-9858 - Fax: (11) 4746-9860 - E-mail: metrologia@mitutoyo.com.br  
Assistência Técnica: Tel: (11) 4746-9857 - Fax: (11) 4746-9860 - E-mail: assistencia@mitutoyo.com.br  
Assistência Técnica Direta: Tel: (11) 5043-0027 - Fax: (11) 5043-0028 - E-mail: atd@mitutoyo.com.br

## ANEXO 2 - Certificado de calibração do Paquímetro Digital (página 2/2)

**metutoyo**  
Métricos Sul Americana Ltda.

**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N°. 07625/13**  
REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Laboratório de Calibração acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT  
NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 0031

Pag.: 2 / 2

**4 - Resultado da calibração:** O resultado é a média das calibrações.

Medida Externa			Medida Interna			
Padrão (mm)	Indicação no Instrumento (mm)	Incerteza de Medição (mm)	Padrão (mm)	Indicação no Instrumento (mm)	Incerteza de Medição (mm)	
1,1	1,10	0,02	20,0	20,00	0,02	
1,5	1,50		50,0	50,00		
1,9	1,90		100,0	100,01		
4,0	4,00		150,0	150,02		
8,0	8,00		Fator de abrangência (k)			2,03
16,0	16,00		Graus de liberdade (V <sub>eff</sub> )		96	
20,0	20,00					
50,0	50,00					
75,0	75,00					
100,0	99,99					
150,0	150,00					

Fator de abrangência (k)	2,00
Graus de liberdade (V <sub>eff</sub> )	infinito

**Outros Itens**

Item	Resultado (mm)	Incerteza de Medição (mm)	Fator de abrangência (k)	Graus de liberdade (V <sub>eff</sub> )
Ponto zero	0,00	0,01	2,00	infinito
Ressalto	0,00	0,01	2,00	infinito
Profundidade	0,01	0,01	2,00	infinito
Paralelo da Orelha	0,00	0,01	2,00	infinito
Paralelo da Boca	0,00	0,01	2,00	infinito

**5 - Incerteza de Medição:**

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência k , o qual para uma distribuição t com V<sub>eff</sub> graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

**6 - Nota :** Temperatura ambiente: (20,0 ± 0,5)°C.

\*Centro Caxias de Julio Carlos de Silva Borges, 1390 - Santa Aneta - CEP 04158-002 - São Paulo - SP - Telefone Oficial: (11) 5943-0030 - Fax: (11) 5943-0702  
\*Rua do Peão, 1020 - Santa Paula - CEP: 08420-020 - Sucesso - SP - Tel.: (11) 4746-5850 - Fax: (11) 4746-5208 - E-mail: sucesso@metutoyo.com.br  
Laboratório: Tel.: (11) 4746-5850 - Fax: (11) 4746-5850 - E-mail: metrologia@metutoyo.com.br  
Assistência Técnica Sucesso: Tel.: (11) 4746-5857 - Fax: (11) 4746-5850 - E-mail: sucesso@metutoyo.com.br  
Assistência Técnica Sucesso: Tel.: (11) 5943-0027 - Fax: (11) 5943-0028 - E-mail: vta@metutoyo.com.br

## ANEXO 3 - Certificado de calibração do Projetor de Perfil (página 1/4)

**Mitutoyo**  
Mitutoyo Sul Americana Ltda.

**LABORATÓRIO DE METROLOGIA**  
REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Calibração NBR ISO/IEC 17025  
CAL 0031

**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N.º 12137/12**

Interessado : " FUNDAÇÃO DE APOIO UNIVERSITÁRIO "  
Endereço : Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1M, Campos Santa Mônica - Uberlândia - MG.  
Local da calibração : Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1M, Campos Santa Mônica - Uberlândia - MG.

Ordem de Serviço : 034.514/001

Pág. 1/4

**1 - OBJETO CALIBRADO**

**PROJETOR DE PERFIL**  
Fabricante : Mitutoyo  
Código : 302-714A  
Modelo : PJA3000  
No. de Série : D00101012  
Tambor Micrométrico  
Código : 164-164 N.º série : 000630  
Código : 164-164 N.º série : 000619  
Resolução da unidade de leitura : 0,001 mm  
Resolução do goniômetro : 0 ° 01 '  
Identificação do Proprietário : 088180

**2 - PADRÃO UTILIZADO NA CALIBRAÇÃO**

**Régua Graduada de Vidro**  
N.º de Série : 21164  
Certificado N.º : 01647/11 Validade: 30/02/2013  
N.º de Série : 24364  
Certificado N.º : 08755/11 Validade: 30/06/2013

**Padrão Angular**  
N.º de Série : RET 1  
Certificado N.º : 110381/101 Validade: 30/06/2013

**3 - PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO : PML - 0043 Versão 1/2.**

O erro de ampliação e a indicação foi verificado projetando a régua padrão sobre a tela do projetor e a medição através de comparação com a régua.

O erro de indicação do goniômetro foi verificado comparativamente com um padrão angular projetado sobre a tela e a leitura feita no goniômetro.

Data de calibração : 22 de Agosto de 2012  
Data de emissão : 05 de Setembro de 2012

Carlos Kazuo Suzuki  
Gerente do Dpto. de Garantia da Qualidade

ESTE CERTIFICADO ATENDE AOS REQUISITOS DE AUTENTICAÇÃO PARA OIGMETE QUE EXIGEM A VERIFICAÇÃO DA EXATIDÃO E A VERIFICAÇÃO DAS CIRCUNSTÂNCIAS DE MEDIÇÃO DE ACORDO COM O SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES - SI.  
A reprodução deste Certificado sem permissão por escrito da Mitutoyo é proibida.  
Os resultados deste Certificado são válidos somente em instrumentos submetidos à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer óleos.

Estados Unidos: Av. João Naves de Ávila, 2121 - Bloco 1M - Uberlândia - MG - CEP: 38600-000 - Brasil - Tel.: (11) 4746-5828 - Fax: (11) 4746-5829 - E-mail: suzane@mitutoyo.com.br  
Brasil: Rua, Irineu Ybáñez, 1555 - Bairro Pista - CEP: 05500-000 - São Paulo - SP - Tel.: (11) 4746-5828 - Fax: (11) 4746-5829 - E-mail: suzane@mitutoyo.com.br  
Laboratório: Tel.: (11) 4746-5828 - Fax: (11) 4746-5829 - E-mail: metrologia@mitutoyo.com.br  
Assistência Técnica Interna: Tel.: (11) 4746-5827 - Fax: (11) 4746-5860 - E-mail: assistec@mitutoyo.com.br  
Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 5643-0027 - Fax: (11) 5643-0028 - E-mail: ate@mitutoyo.com.br

## ANEXO 3 - Certificado de calibração do Projetor de Perfil (página 2/4)

**Mitutoyo**  
Mitutoyo Sul Americana Ltda.

**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N°. 12137/12**

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

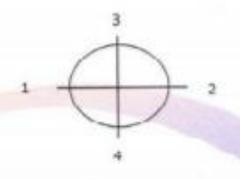
Laboratório de Calibração acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob número CAL 0031

Pág. 2/4

**4 - RESULTADO DA CALIBRAÇÃO :**

**4.1 - Resultado Ampliação**

Lente de Ampliação de 10 X      Número lente: 013012



Item	Posição				Incerteza de Medição (U)	Fator de abrangência (K)	Graus de liberdade (V <sub>eff</sub> )
	1	2	3	4			
Erro (%)	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01 %	2,00	infinito

LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO BRASIL

\*Escritório Central: Av. João Carlos da Silva Borges, 1240 - Santo Amaro - CEP: 04726-002 - São Paulo - SP - Telefone: (11) 5643-0000 - Fax: (11) 5641-3722  
 \*Fábrica: Rod. Ind. Tábua, 1555 - Santo Rafael - CEP: 08620-000 - Suzano - SP - Tel.: (11) 4746-5858 - Fax: (11) 4746-5836 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br  
 Laboratório: Tel.: (11) 4746-5900 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mail: metrologia@mitutoyo.com.br  
 Assessoria Técnica Interna: Tel.: (11) 4746-5927 - Fax: (11) 4746-5980 - E-mail: assatex@mitutoyo.com.br  
 Assessoria Técnica Externa: Tel.: (11) 5643-0027 - Fax: (11) 5643-0029 - E-mail: ate@mitutoyo.com.br

## ANEXO 3 - Certificado de calibração do Projetor de Perfil (página 3/4)

**Mitutoyo**  
Mitutoyo Sul Americana Ltda.

**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N°. 12137/12**

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Laboratório de Calibração acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob número CAL 0031

Pág. 3/4

**4 - RESULTADO DA CALIBRAÇÃO :**

**4.2 - Resultado da Indicação**

Eixo " X "			Eixo " Y "		
Indicação ( mm )	Resultado ( mm )	Incerteza de medição ( mm )	Indicação ( mm )	Resultado ( mm )	Incerteza de medição ( mm )
0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,002
2,500	2,500				
5,100	5,100				
7,700	7,700				
10,300	10,300				
12,900	12,900				
15,000	15,000				
17,600	17,600				
20,200	20,200				
22,800	22,800				
25,000	25,000				
30,000	30,000				
35,000	35,001				
40,000	40,000				
45,000	45,000				
50,000	50,001				

Fator de abrangência ( k ) = 2,03  
Graus de liberdade ( Veff ) = 99

Fator de abrangência ( k ) = 2,03  
Graus de liberdade ( Veff ) = 99

\*Campanha Control: Av. João Carlos da Silva Borges, 1240 - Bairro Amaro - CEP 04726-002 - São Paulo - SP - Torção Clássica: (11) 5043-0000 - Fax: (11) 5043-0792  
\*Técnica: Prof. Inês Tibúrcia, 1950 - Bairro Paço - CEP: 06020-000 - Suzano - SP - Tel.: (11) 4746-5958 - Fax: (11) 4746-5936 - E-mail: susana@mitutoyo.com.br  
Laboratório: Tel.: (11) 4746-5960 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mail: metrologia@mitutoyo.com.br  
Assistência Técnica Interna: Tel.: (11) 4746-5957 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mail: assistec@mitutoyo.com.br  
Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 5643-0027 - Fax: (11) 5643-0028 - E-mail: ate@mitutoyo.com.br

## ANEXO 3 - Certificado de calibração do Projetor de Perfil (página 4/4)

**Mitutoyo**  
Mitutoyo Sul Americana Ltda.

**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N°. 12137/12**  
REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Laboratório de Calibração acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob número CAL 0031

Pág.4/4

**4 - RESULTADO DA CALIBRAÇÃO :**

**4.3 - Resultado da indicação do Anteparo Goniométrico**

Indicação	Resultado	Incerteza de Medição (U)	Fator de abrangência (k)	Graus de liberdade (V <sub>ef</sub> )
0	0 ° 00 '			
30	29 ° 59 '			
60	60 ° 00 '			
90	90 ° 00 '			
120	110 ° 50 '			
150	140 ° 60 '			
180	180 ° 00 '	0 ° 01 '	2,29	11
210	210 ° 00 '			
240	240 ° 01 '			
270	270 ° 00 '			
300	300 ° 01 '			
330	330 ° 02 '			
360	360 ° 02 '			

**5 - INCERTEZA DE MEDIÇÃO :**

A incerteza expandida da medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência k , o qual para uma distribuição t com V<sub>ef</sub> graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação IEC 4/02.

**6 - Nota:** Temperatura ambiente : ( 19,6 ± 0,5 ) °C.

\*Escritório Central: Av. João Carlos da Silva Borges, 1240 - Santo Amaro - CEP 04726-003 - São Paulo - SP - Telefone Central: (11) 5043-0000 - Fax: (11) 5043-3722  
\*Fábrica: Rod. Ind. Têxtil, 1555 - Bairro Itaipá - CEP: 08620-000 - Suzano - SP - Tel.: (11) 4746-5858 - Fax: (11) 4746-5936 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br  
Laboratório: Tel.: (11) 4746-5950 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mail: metrologia@mitutoyo.com.br  
Assistência Técnica Interna: Tel.: (11) 4746-5957 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mail: assistec@mitutoyo.com.br  
Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 5043-0027 - Fax: (11) 5043-0028 - E-mail: atex@mitutoyo.com.br

## ANEXO 4 - Certificado de calibração Extensômetro (página 1/4)

<b>CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO</b>		
EMITENTE: LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO INSTRON DATA DE EMISSÃO: 24-jun-2022 NÚMERO DO CERTIFICADO: 22062401MC		
	<b>INSTRON Brasil Equipamentos Científicos Ltda</b> Rua Quirino Zagonel, 257 - Vila Braga São José dos Pinhais, PR CEP 83020-250 Telefone: +55 41 3035-9400 E-mail: servicebrasil@instron.com	
	Página 1 de 4 páginas SIGNATÁRIO APROVADO <b>SILVIO OYAMA</b> 25489838892 <small>Digitally signed by SILVIO OYAMA DN: cn=SILVIO OYAMA, o=INSTRON, ou=LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO INSTRON, email=silvio.oyama@instron.com.br, c=BR, serial=25489838892, reason=Certificação Instron, location=Rua Quirino Zagonel, 257 - Vila Braga, São José dos Pinhais - PR - Brasil, Date: 19.07.2022 10:01:02 -0300</small>	
<b>Tipo de calibração:</b>	<b>Deformação</b>	
<b>Norma relevante:</b>	<b>ASTM E83-16</b>	
<b>Data da calibração:</b>	<b>24-jun-2022</b>	

## \* \* \* RESULTADO DA CALIBRAÇÃO \* \* \*

ID do sistema: 8801MTU6168  
 Número Série Transdutor: 2620-601/301432  
 Indicador 1. - Leitura digital: Console v. 8.9.374 (% strain)  
**APROVADO Classe B-2: 100 Intervalo % no modo Tração**

**Cliente**

Nome: UFU - Lab. de Tecnologia em Atrito e Desgaste  
 Endereço: Av. João Naves de Ávila, 2121 - Campus Santa Mônica Bloco 5F  
 38408-100 Uberlândia\_MG  
 Brasil  
 Contato: Raphael Rezende Pires  
 E-mail: raphael.pires@ltad.com.br  
 Ordem de Serviço: 18365

**Máquina**

Fabricante: INSTRON  
 Número de série: 8801.MTU6168  
 Tipo de intervalo: Único

**Transdutor**

Fabricante: INSTRON  
 Tipo de extensômetro: Tipo 1  
 Deslocamento (Tração): 5 mm  
 Comprimento do gabarito: 25 mm  
 Sentido: Estática (Tração)

**Metodologia**

A avaliação da máquina de ensaio foi realizada nas instalações do cliente acima mencionada, de acordo com a norma ASTM E83-16 "Prática padrão para verificação e classificação de Sistemas Extensômetros" usando o procedimento Instron PTEC 002.

O Sistema foi calibrado na condição "Conforme Encontrado" sem que ajustes ou reparos tenham sido realizados. Esta também é a condição "Conforme Deixado".

**Classificação do Sistema****Instron Calpro Versão 3.50**

Este certificado atende aos requisitos de acreditação pela Cgcre que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida (ou ao Sistema Internacional de Unidades - SI). Os resultados indicados neste certificado e o relatório seguinte é relativo apenas aos itens calibrados. Qualquer limitação de uso com relação ao resultado desta calibração, será indicada na seção comentários. Este relatório não deverá ser reproduzido, exceto na totalidade, sem a aprovação do laboratório emissor.

## ANEXO 4 - Certificado de calibração Extensômetro (página 2/4)

### CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

Laboratório Calibração acreditado Cgcre de acordo com ABNT NBR ISO/IEC 17025 sob número CAL 0197

NÚMERO DO CERTIFICADO:  
22062401MC

Página 2 de 4 páginas

A calibração e os equipamentos utilizados estão em conformidade com um programa controlado de Garantia de Qualidade, que atende às especificações descritas na norma ISO/IEC 17025:2017.

O sistema de medição de deformação foi calibrado para as deformações indicadas usando equipamento calibrado dentro dos requisitos da norma ASTM E83-16.

#### Resumo dos resultados

Indicador 1. - Leitura digital: Console v. 8.9.374 (% strain)

Intervalo Escala completa (%)	Intervalo testado (mm)	Sentido	Sistema Classe*	Resolução (% strain)	Resolução Classe	ASTM E83 Limite inferior (mm)
100	0.20008 a 5.00006	Tração	B-2	0.001	A	0.025

\*A classe do sistema para um intervalo é a pior das seguintes classes: a classe do comprimento do gabarito, a classe de erro do ponto individual e a classe de repetitividade também se baseiam na capacidade de medição do laboratório.

#### Medição e classificação do comprimento do gabarito

Medições Comprimento do gabarito (mm)	Real Comprimento do gabarito (+/- mm)	Medição Tipo	Erro relativo de comprimento do gabarito para cada medição feita (%)			ASTM E83 Comprimento do gabarito Classe	Incerteza da Medição* (+/- mm)
25	25.033	Indireta	0.080	0.120	0.200	B-2	0.041

\*A incerteza expandida relatada baseia-se em uma incerteza padrão multiplicada por um fator de abrangência  $k = 2$ , proporcionando um nível de confiança de aproximadamente 95%.

#### Resumo de Dados

Indicador 1. - Leitura digital: Console v. 8.9.374 (% strain)

% de Intervalo	Erro na execução 1		Erro na execução 2		Erro de repetição (% strain)	Pior Classe	Incerteza da Medição* (+/- % strain)
	Fixo (% strain)	Erro Relativo (%)	Fixo (% strain)	Erro Relativo (%)			
100 Intervalo % (escala completa: 5.00006 mm)							
4	0.00168	0.210	0.00236	0.295	0.00068	B-1	0.0121
8	0.00292	0.183	0.00576	0.360	0.00284	B-1	0.0122
16	0.00884	0.277	0.01284	0.402	0.00400	B-1	0.0123
28	0.02052	0.367	0.02368	0.423	0.00316	B-1	0.014
40	0.03168	0.397	0.02920	0.365	0.00248	B-1	0.017
60	0.05528	0.461	0.05452	0.455	0.00076	B-1	0.022
80	0.07384	0.462	0.06960	0.436	0.00424	B-1	0.028
100	0.08892	0.445	0.08876	0.444	0.00016	B-1	0.035

\*A incerteza expandida relatada baseia-se em uma incerteza padrão multiplicada por um fator de abrangência  $k = 2$ , proporcionando um nível de confiança de aproximadamente 95%.

A incerteza declarada refere-se aos valores obtidos durante a calibração e não leva em consideração fatores como desvio a longo prazo, temperatura e alinhamento - a influência de tais fatores devem ser levadas em consideração.

## ANEXO 4 - Certificado de calibração Extensômetro (página 3/4)

### CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

Laboratório Calibração acreditado Cgore de acordo com ABNT NBR ISO/IEC  
17025 sob número CAL 0197

NÚMERO DO CERTIFICADO:  
22062401MC

Página 3 de 4 páginas

#### Dados

Indicador 1. - Leitura digital: Console v. 8.9.374 (% strain)

% de Intervalo	Execução 1		Execução 2	
	Indicado (% strain)	Aplicado (mm)	Indicado (% strain)	Aplicado (mm)
100 Intervalo % (escala completa: 5.00006 mm)				
Temperatura de execução: 21.3 °C			Temperatura de execução: 21.6 °C	
0	0.000	0.00000	0.000	0.00000
4	0.802	0.20008	0.803	0.20016
8	1.603	0.40002	1.606	0.40006
16	3.209	0.80004	3.213	0.80004
28	5.621	1.40012	5.624	1.40008
40	8.032	2.00008	8.030	2.00020
60	12.056	3.00018	12.055	3.00012
80	16.074	4.00004	16.070	4.00010
100	20.089	5.00002	20.089	5.00006

#### Equipamentos de Calibração

Os resultados das medições produzidas com os Padrões utilizados pela Instron são rastreáveis ao SI (Sistema Internacional de Unidades) através de reconhecimento internacional dos Institutos de Metrologia (NIST, NPL, PTB, Immetro, etc.).

Fabricante/Modelo	ID do equipamento	Descrição	Calibração Agência	Data da cal.	Validade da cal.
Exttech 445580	975608	indicador de temp.	K&L Laboratories	22-nov-2021	22-nov-2023
Epsilon 3590VHR	A5093 (ASTM)	indicador de desl.	CERTI	06-out-2021	06-out-2022
Mitutoyo 150mm Caliper (Digital)	A21006601 (ASTM)	indicador de desl.	K&L Laboratories	15-jul-2021	15-jul-2023

*A Classe do Equipamento de Calibração usado era igual ou melhor que a Classe para a qual a máquina de testes foi calibrada.*

#### Equipamentos Usados na Calibração

Medição Tipo	ID do equipamento	Intervalo (% da FS)	Modo	Percentual(is) do intervalo	Precisão (+/-)
Deslocamento	A5093 (ASTM)	100	T	4/ 8 16/ 28/ 40/ 60/ 80/ 100	0.000016 in 0.00004 in
Comprimento Base	A21006601 (ASTM)	NA		NA*	0.001 in
Temperatura	975608	Todos		All	1.8 °F

\* Consulte a seção Medição e classificação do comprimento do gabarito para ver instruções de utilização.

*A precisão do equipamento de calibração usado era igual ou melhor que a precisão indicada na tabela acima.*

#### Comentários

Localização do Equipamento: Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste - Bloco 5F

Instron Calpro Versão 3.50

**ANEXO 4 - Certificado de calibração Extensômetro (página 4/4)**

<b>CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO</b>	NÚMERO DO CERTIFICADO: 22062401MC
Laboratório Calibração acreditado Cgcre de acordo com ABNT NBR ISO/IEC 17025 sob número CAL 0197	Página 4 de 4 páginas

Verificado por: Marcio Campolina  
Service Technician

NOTA: O Artigo 9 da norma ASTM E83 declara: Recomenda-se que os sistemas de extensômetros sejam verificados anualmente ou com uma frequência maior, se necessário. Em nenhum caso o intervalo de tempo entre as verificações deverá exceder 18 meses (a não ser que o extensômetro esteja sendo usado em um teste de longo prazo além do período de 18 meses). Um sistema de extensômetros não deve ser usado após um ajuste ou reparo que possa afetar sua precisão sem primeiramente se verificar sua precisão utilizando o procedimento descrito nesta prática.

## ANEXO 5 - Certificado de calibração RVDT (página 1/4)

<b>CERTIFICATE OF CALIBRATION</b>	
ISSUED BY: INSTRON CALIBRATION LABORATORY	
DATE OF ISSUE: 24-Jun-2022	CERTIFICATE NUMBER: 22062403MC



Page 1 of 4



**INSTRON Brasil Equipamentos Científicos Ltda**  
 Rua Quirino Zagonel, 257 - Vila Braga  
 São José dos Pinhais, PR - CEP: 83020-250  
 Telefone: +55 41 3035-9400  
 Email: servicebrasil@instron.com

**SILVIO OYAMA**  
 25489838892

Digitally signed by SILVIO OYAMA (25489838892)  
 DN: cn=SILVIO OYAMA, o=INSTRON, ou=INSTRON, email=SILVIO.OYAMA@instron.com  
 Reason: Certificado Instron  
 Location: Rua Quirino Zagonel, 257 - Vila Braga  
 São José dos Pinhais, PR - Brasil  
 Date: 19.07.2022 14:51:07 -0300

APPROVED SIGNATORY

Type of Calibration: Linear Stroke  
 Relevant Standard: Linear Stroke  
 Date of Calibration: 24-Jun-2022  
 Customer Requested Due Date: 24-Jun-2023

Customer		Machine	
Name:	UFU - Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgas	Serial Number:	MTU6168
Address:	Av. João Naves de Ávila, 2121 - Campus Santa Mônica Uberlândia, MG 38408-100	Make:	INSTRON
P.O. Number:	18365	Model:	8801
Contact:	Raphael Rezende Pires	Ambient Temperature:	22.9 °C

**Readout Verified**

1. Digital Readout (mm)

**Certification Statement**

This certifies that the displacements calibrated with machine indicator 1 (listed above) were verified by Instron in accordance with Instron work instruction PTEC-003.

The acceptable field verification tolerance for certification is  $\pm 1.0\%$  full travel for Instron machines. For other machines, check the manufacturer's specifications.

**Methodology**

The calibration and equipment used conform to a controlled Quality Assurance program which meets the specifications outlined in ISO IEC 17025:2017.

The testing machine was calibrated on-site at customer location. The testing machine was calibrated in the 'As Found' condition with no adjustments or repairs carried out. This is also the 'As Left' condition.

CalproSDS version 3.21

The results indicated on this certificate and the following report relate only to the items calibrated. This report shall not be reproduced, except in full, without the approval of the issuing laboratory.

## ANEXO 5 - Certificado de calibração RVDT (página 2/4)

**CERTIFICATE OF CALIBRATION**

ISSUED BY: INSTRON CALIBRATION LABORATORY

DATE OF ISSUE:  
24-Jun-2022CERTIFICATE NUMBER:  
22062403MC

Page 2 of 4

**Summary of Results**

Tested Displacement Ranges (mm)	Max Error (% FS)	Direction	Max Repeat Error (% FS)	Max Uncertainty (mm)	Resolution (mm)
15.00 - 75.00	-0.59	Tension	0.024	0.0549	0.001
15.00 - 75.00	-0.49	Compression	0.022	0.0463	0.001

**Datapoint Summary - Indicator 1 - Digital Readout ( mm )****Tension**

Suggested Value	Run1 Error (% FS)	Run2 Error (% FS)	Run3 Error (% FS)	Repeat Error (% FS)	Uncertainty (+/- mm)*	Coverage Factor = k
15	-0.091	-0.091	-0.097	.006	.0157	3.18
30	-0.198	-0.193	-0.200	.007	.0149	2.78
45	-0.312	-0.298	-0.319	.021	.0434	3.18
60	-0.434	-0.430	-0.446	.016	.0379	3.18
75	-0.568	-0.564	-0.588	.024	.0549	3.18

**Compression**

Suggested Value	Run1 Error (% FS)	Run2 Error (% FS)	Run3 Error (% FS)	Repeat Error (% FS)	Uncertainty (+/- mm)*	Coverage Factor = k
15	-0.107	-0.100	-0.101	.007	.0152	3.18
30	-0.217	-0.206	-0.204	.013	.0291	3.18
45	-0.317	-0.302	-0.295	.022	.0457	3.18
60	-0.415	-0.412	-0.400	.015	.0355	3.18
75	-0.486	-0.470	-0.466	.020	.0463	3.18

\*The reported expanded uncertainty of measurement is based on a combined uncertainty multiplied by a coverage factor  $k$  to provide a level of confidence of approximately 95 %.

## ANEXO 5 - Certificado de calibração RVDT (página 3/4)

### CERTIFICATE OF CALIBRATION

ISSUED BY: INSTRON CALIBRATION LABORATORY

DATE OF ISSUE:  
24-Jun-2022

CERTIFICATE NUMBER:  
22062403MC

Page 3 of 4

#### Data - Indicator 1 - Digital Readout ( mm )

Temperature at start of calibration: 22.9 °C

##### Tension

Suggested Value	Run 1		Run 2		Run 3	
	Applied	Indicated	Applied	Indicated	Applied	Indicated
15	15.1358	15.000	15.1362	15.000	15.1459	15.000
30	30.2968	30.000	30.2888	30.000	30.2995	30.000
45	45.4686	45.000	45.4474	45.000	45.4786	45.000
60	60.6507	60.000	60.6445	60.000	60.6695	60.000
75	75.8513	75.000	75.8464	75.000	75.8823	75.000

##### Compression

Suggested Value	Run 1		Run 2		Run 3	
	Applied	Indicated	Applied	Indicated	Applied	Indicated
15	15.1601	15.000	15.1501	15.000	15.1512	15.000
30	30.3257	30.000	30.3097	30.000	30.3055	30.000
45	45.4760	45.000	45.4530	45.000	45.4431	45.000
60	60.6228	60.000	60.6186	60.000	60.6003	60.000
75	75.7291	75.000	75.7049	75.000	75.6994	75.000

Temperature at end of calibration: 22.1 °C

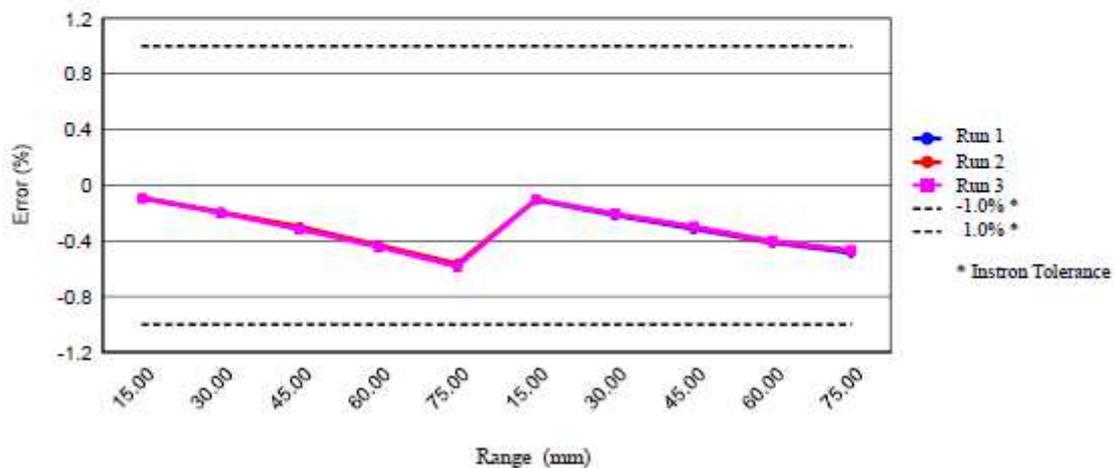
## ANEXO 5 - Certificado de calibração RVDT (página 4/4)

**CERTIFICATE OF CALIBRATION**

ISSUED BY: INSTRON CALIBRATION LABORATORY

DATE OF ISSUE:  
24-Jun-2022CERTIFICATE NUMBER:  
22062403MC

Page 4 of 4

**Graphical Data - Indicator 1 -Digital Readout (mm)****Calibration Equipment**

Make/Model	Serial No.	Description	Cal Agency	Uncertainty of Calibration	Resolution	Cal Date	Due Date
Instron LDS-10	121610F	Linear Gage	CERTI	0.000019 in	0.0001 in	26-Nov-21	26-Nov-23
Thermo-Hygro 445580	975608	Thermometer	K&L	0.9 °F	0.1 °F	22-Nov-21	22-Nov-23

*The measurement results produced with Instron standards are traceable to the SI (The International System of Units) through internationally recognized National Metrology Institutes (NIST, NPL, PTB, Inmetro, etc.).*

**Comments:**

Localização do Equipamento: Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste - Bloco 5F

Verified By: Marcio Campolina  
Service Technician



## ANEXO 6 - Certificado de calibração Extensômetro (página 2/4)

### CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

Laboratório Calibração acreditado Cgcre de acordo com ABNT NBR ISO/IEC 17025 sob número CAL 0197

NÚMERO DO CERTIFICADO:  
**22062201MC**

Página 2 de 4 páginas

A calibração e os equipamentos utilizados estão em conformidade com um programa controlado de Garantia de Qualidade, que atende às especificações descritas na norma ISO/IEC 17025:2017.

O sistema de medição de deformação foi calibrado para as deformações indicadas usando equipamento calibrado dentro dos requisitos da norma ASTM E83-16.

#### Resumo dos resultados

Indicador 1. - Leitura digital: Console v. 8;9.374 (mm)

Intervalo	Intervalo testado	Sentido	Sistema Classe*	Resolução (mm)	Resolução Classe	ASTM E83 Limite inferior (mm)
100	0.16 a 4.00006	Tração	C	0.0001	B-1	0.01

\* A classe do sistema para um intervalo é a pior das seguintes classes: a classe da resolução, a classe de erro do ponto individual e a classe de repetitividade também se baseiam na capacidade de medição do laboratório.

#### Resumo de Dados

Indicador 1. - Leitura digital: Console v. 8;9.374 (mm)

% de Intervalo	Erro na execução 1		Erro na execução 2		Erro de repetição (mm)	Pior Classe	Incerteza da Medição* (+/- mm)
	Fixo (mm)	Erro Relativo (%)	Fixo (mm)	Erro Relativo (%)			
100 Intervalo % (escala completa: 4.00006 mm)							
4	0.00052	0.325	0.00050	0.313	0.00002	C	0.0030
8	0.00022	0.069	0.00038	0.119	0.00016	B-1	0.0030
16	-0.00030	-0.047	0.00008	0.012	0.00038	B-1	0.0031
28	-0.00132	-0.118	-0.00102	-0.091	0.00030	B-1	0.0031
40	-0.00278	-0.174	-0.00218	-0.136	0.00060	B-1	0.0032
60	-0.00664	-0.277	-0.00616	-0.256	0.00048	B-1	0.0032
80	-0.01060	-0.331	-0.01014	-0.317	0.00046	B-1	0.0033
100	-0.01846	-0.461	-0.01752	-0.438	0.00094	B-1	0.0034

\* A incerteza expandida relatada baseia-se em uma incerteza padrão multiplicada por um fator de abrangência  $k = 2$ , proporcionando um nível de confiança de aproximadamente 95%.

A incerteza declarada refere-se aos valores obtidos durante a calibração e não leva em consideração fatores como desvio a longo prazo, temperatura e alinhamento - a influência de tais fatores devem ser levadas em consideração.

#### Dados

Indicador 1. - Leitura digital: Console v. 8;9.374 (mm)

% de Intervalo	Execução 1		Execução 2	
	Indicado (mm)	Aplicado (mm)	Indicado (mm)	Aplicado (mm)
100 Intervalo % (escala completa: 4.00006 mm)				
Temperatura de execução: 21.7 °C			Temperatura de execução: 21.5 °C	
0	0.0001	0.00000	0.0000	0.00000
4	0.1607	0.16008	0.1605	0.16000
8	0.3205	0.32018	0.3206	0.32022

Instron Calpro Versão 3.50

## ANEXO 6 - Certificado de calibração Extensômetro (página 3/4)

### CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

Laboratório Calibração acreditado Cgcre de acordo com ABNT NBR ISO/IEC 17025 sob número CAL 0197

NÚMERO DO CERTIFICADO:  
22062201MC

Página 3 de 4 páginas

#### Dados

##### Indicador 1. - Leitura digital: Console v. 8;9.374 (mm)

% de Intervalo	Execução 1		Execução 2	
	Indicado (mm)	Aplicado (mm)	Indicado (mm)	Aplicado (mm)
100 Intervalo % (escala completa: 4.00006 mm)				
	Temperatura de execução: 21.7 °C		Temperatura de execução: 21.5 °C	
16	0.6400	0.64020	0.6401	0.64002
28	1.1189	1.12012	1.1190	1.12002
40	1.5974	1.60008	1.5979	1.60008
60	2.3936	2.40014	2.4023	2.40846
80	3.1896	3.20010	3.1899	3.20004
100	3.9817	4.00006	3.9825	4.00002

#### Equipamentos de Calibração

Os resultados das medições produzidas com os Padrões utilizados pela Instron são rastreáveis ao SI (Sistema Internacional de Unidades) através de reconhecimento internacional dos Institutos de Metrologia (NIST, NPL, PTB, Inmetro, etc.).

Fabricante/Modelo	ID do equipamento	Descrição	Calibração Agência	Data da cal.	Validade da cal.
Extecth 445580	975608	indicador de temp.	K&L Laboratories	22-nov-2021	22-nov-2023
Epsilon 3590VHR	A5093 (ASTM)	indicador de desl.	CERTI	06-out-2021	06-out-2022

*A Classe do Equipamento de Calibração usado era igual ou melhor que a Classe para a qual a máquina de testes foi calibrada.*

#### Equipamentos Usados na Calibração

Medição Tipo	ID do equipamento	Intervalo (% da FS)	Modo	Percentual(is) do intervalo	Precisão (+/-)
Deslocamento	A5093 (ASTM)	100	T	4/ 8 16/ 28/ 40/ 60/ 80/ 100	0.000016 in 0.00004 in
Temperatura	975608	Todos		All	1.8 °F

*A precisão do equipamento de calibração usado era igual ou melhor que a precisão indicada na tabela acima.*

#### Comentários

Localização do Equipamento: Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste - Bloco 5F

Verificado por: Marcio Campolina  
Service Technician

**ANEXO 6 - Certificado de calibração Extensômetro (página 4/4)**

<b>CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO</b>	NÚMERO DO CERTIFICADO: <b>22062201MC</b>
Laboratório Calibração acreditado Cgcre de acordo com ABNT NBR ISO/IEC 17025 sob número CAL 0197	Página 4 de 4 páginas

NOTA: O Artigo 9 da norma ASTM E83 declara: Recomenda-se que os sistemas de extensômetros sejam verificados anualmente ou com uma frequência maior, se necessário. Em nenhum caso o intervalo de tempo entre as verificações deverá exceder 18 meses (a não ser que o extensômetro esteja sendo usado em um teste de longo prazo além do período de 18 meses). Um sistema de extensômetros não deve ser usado após um ajuste ou reparo que possa afetar sua precisão sem primeiramente se verificar sua precisão utilizando o procedimento descrito nesta prática.

## ANEXO 7 - Certificado de calibração do Termo-higrômetro (página 1/2)

 <p><b>PRECISAO METROLOGICA</b> <b>elUS</b> <b>INSTRUMENTAÇÃO</b></p>	<p><i>Certificado de Calibração</i></p> <p><i>Laboratório de Temperatura &amp; Umidade</i></p> <p><i>Número do Certificado</i> R4996/13 <i>Folha</i> 1 / 2</p>		 <p>CAL 0439</p>
	<p>CONTRATANTE : Universidade Federal de Uberlândia - UFU</p> <p>ENDEREÇO : Av. Joao N. de Ávila, 2121, Bl. 1M - Campus Sta. Mônica - Uberlândia - MG</p> <p>INTERESSADO : O mesmo</p> <p>ENDEREÇO : O mesmo</p>		
<p>INSTRUMENTO : <u>Termohigrômetro Digital</u></p> <p>FABRICANTE : Instrutherm</p> <p>MODELO : HT-260</p> <p>IDENTIFICAÇÃO : Não especificado</p> <p>NÚMERO DE SÉRIE : 06120362</p>			
<p>DATA DA CALIBRAÇÃO : 19/06/2013</p> <p>PRÓXIMA CALIBRAÇÃO : Determinado pelo cliente</p> <p>DATA DA EMISSÃO : 20/06/2013</p>		<p>LOCAL DA CALIBRAÇÃO: Laboratório Elus</p> <p>TEMPERATURA DO AR : 23°C ± 5°C</p> <p>UMIDADE RELATIVA AR : 45%UR a 70%UR</p>	
<p><b>PADRÕES UTILIZADOS :</b> Termohigrômetro Digital identificação EL-225 rastreado por Laboratório RBC - CAL 0439 em 28/02/2013 sob certificado R1678/13 válido até fevereiro/2014.</p>			
<p><b>PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO :</b> - A calibração foi realizada pelo método comparativo contra padrões de referência, seguindo os procedimentos internos: PCT-003 rev. 01 / PCT-012 rev. 02.</p>			
<p><b>OBSERVAÇÕES :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Este certificado atende aos requisitos de acreditação pelo CGCRE, o qual avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida.</li> <li>- A calibração foi realizada em 3 medições por ponto. O Valor Verdadeiro foi herdado pela média de 3 medições obtidas pelo padrão em cada ponto.</li> <li>- Os valores de temperatura apresentados estão em conformidade com a Escala Internacional de Temperatura de 1990.</li> <li>- <math>k</math> = fator de abrangência (fator multiplicativo adimensional) / <math>V_{eff}</math> = graus de liberdade efetivo. / I.M. = Incerteza de Medição.</li> </ul>			
<p>TÉCNICO EXECUTANTE: CAIO CESAR SILVA</p>		<p>Julio Cesar Pereira de Souza Gerente Técnico Substituto</p> <hr/> <p>RODRIGO DOMES CORDEIRO GERENTE TÉCNICO</p> 	
<p><small>A reprodução deste certificado só poderá ser total, sem nenhuma alteração. Os resultados deste certificado referem-se somente ao item calibrado ou ensaiado. Este certificado atende os requisitos estabelecidos pela norma NBR ISO/IEC 17025. A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência "k" que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-402.</small></p>			
<p>Rua Dendzeiro, 29   Jd. Matarazzo   São Paulo   SP   03813-130   Tel 11 2214-0049   Email: atendimento@elusinstrumentacao.com.br</p>			

**ANEXO 7 - Certificado de calibração do Termo-higrômetro (página 2/2)**



*Certificado de Calibração*

*Laboratório de Temperatura & Umidade*

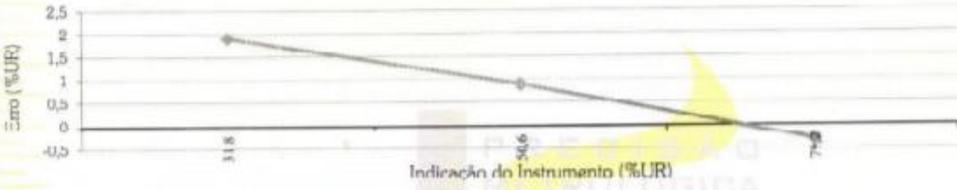
*Número do Certificado R1996/18 Folha 2/2*

Laboratório de Calibração acreditado pelo CGCRE de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 0439.

**RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO:**

**UMIDADE RELATIVA DO AR SENSOR EXTERNO: TEMPERATURA DA CALIBRAÇÃO - 20°C**  
 Sensor - Fabricante: Não especificado; Modelo: Não especificado; Id.: Não especificado; n°.s.: Não especificado  
 Faixa de medição: 0 -- 100 %UR, divisão de escala: 0,1 %UR.

Indicação do Instrum. (%UR)	Valor Verdadeiro (%UR)	Erro (%UR)	I.M. (%UR)	k	Veff
31,8	29,9	1,9	1,0	2,00	∞
50,0	49,7	0,9	1,0	2,00	∞
79,2	79,5	-0,3	1,3	2,00	∞



**TEMPERATURA SENSOR EXTERNO:**  
 Sensor - Fabricante: Não especificado; Modelo: Não especificado; Id.: Não especificado; n°.s.: Não especificado  
 Faixa de medição: -20 ~ 60 °C, divisão de escala: 0,1 °C.

Imersão (mm)	Indicação do Instrum. (°C)	Valor Verdadeiro (°C)	Erro (°C)	I.M. (°C)	k	Veff
---	20,6	20,0	0,6	0,3	2,00	∞
---	25,9	25,0	0,9	0,3	2,00	∞
---	31,3	30,0	1,3	0,3	2,00	∞





A reprodução deste certificado só poderá ser total, sem nenhuma alteração. Os Resultados deste certificado referem-se somente ao item calibrado ou ensaiado. Este certificado atende os requisitos estabelecidos pela norma NBR ISO/IEC 17025. A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência "k" que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de aproximadamente 95%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-402.

Rua Dendzeiro, 29 | Jd. Matrazzo | São Paulo | SP | 03813-130 | Tel 11 2214-0049 | Email: atendimento@elusinstrumentacao.com.br