

José Guilherme de Freitas Peres

**METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DA
INCERTEZA ASSOCIADA À CURVA DE
TRANSIÇÃO DÚCTIL-FRÁGIL**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2026

José Guilherme de Freitas Peres

**METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DA INCERTEZA
ASSOCIADA À CURVA DE TRANSIÇÃO DÚCTIL-FRÁGIL**

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

2026

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

P437 Peres, José Guilherme de Freitas, 1998-
2026 METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DA INCERTEZA ASSOCIADA À
CURVA DE TRANSIÇÃO DÚCTIL-FRÁGIL [recurso eletrônico] / José
Guilherme de Freitas Peres. - 2026.

Orientadora: Rosenda Valdés Arencibia.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Pós-graduação em Engenharia Mecânica.

Modo de acesso: Internet.

DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2026.187>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

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

CDU: 621

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



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, número 675, PPGEM				
Data:	18 de fevereiro de 2026	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	16:10
Matrícula do Discente:	12412EMC002				
Nome do Discente:	José Guilherme de Freitas Peres				
Título do Trabalho:	AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DA CURVA DE TRANSIÇÃO DÚCTIL-FRÁGIL OBTIDA VIA ENSAIOS CHARPY				
Área de concentração:	Materiais e Processos de Fabricação				
Linha de pesquisa:	Tribologia e Materiais				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Desenvolvimento de Ensaio Charpy Convencional e Miniaturizado para Arames de Dutos Flexíveis (PETROBRAS)				

Reuniu-se por videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: Waldek Wladimir Bose Filho - FEMEC/UFU, Antonio Piratelli Filho - UnB e Rosenda Valdés Arencibia - FEMEC/UFU, orientadora do candidato.

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

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

Aprovado.

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

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

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

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



Documento assinado eletronicamente por **Rosenda Valdes Arencibia, Professor(a) do Magistério Superior**, em 18/02/2026, às 16:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Waldek Wladimir Bose Filho, Usuário Externo**, em 18/02/2026, às 16:16, 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 18/02/2026, às 16:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6997808** e o código CRC **ECC964D5**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à Deus, pela vida, saúde e pela força concedida ao longo de toda essa jornada.

Agradeço aos meus pais, Claudinei e Maria Aparecida, e ao meu irmão, Murilo, pelo amor incondicional, pelos ensinamentos, apoio e incentivos durante toda a vida, em especial durante a execução desse trabalho.

À minha noiva, Luísa, pelo companheirismo, compreensão nos momentos que estive ausente e por sempre me incentivar e acreditar em mim.

Agradeço à minha orientadora, professora Dra. Rosenda Valdés Arencibia, pela paciência, acolhimento e pelas valiosas contribuições técnicas ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao professor Dr. Francisco José de Souza, pela paciência, disposição e ensinamentos durante o tempo que foi o meu orientador.

Aos professores Dra. Regina Paula Garcia e Dr.-Ing. Sinésio Domingues Franco pelos conselhos e discussões.

Aos colegas de projeto, engenheiros Raphael Pires, Dênis Freitas e Joyce Antunes.

Aos meus mentores, Dr. Luiz Fernando Maia de Almeida e Me. Rodrigo Freitas da Silva Alvarenga, pela amizade, discussões e ensinamentos no LTAD.

À toda equipe LTAD, engenheiros, técnicos, professores e alunos, sem os quais este trabalho não seria possível.

Ao engenheiro da PETROBRAS Daniel Correia Freire Ferreira, pelas contribuições e discussões técnicas.

À Universidade Federal de Uberlândia e ao programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica.

À FAPEMIG pela concessão da bolsa de estudos.

À PETROBRAS pelo apoio financeiro e material.

PERES, J. G. F. **Metodologia para avaliação da incerteza associada à curva de transição dúctil-frágil**. 2026. 112f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RESUMO

Neste trabalho foi definida e validada uma metodologia para calcular a incerteza associada à curva de transição dúctil-frágil (CTDF) obtida por meio do modelo da tangente hiperbólica simétrica (TH). Esta metodologia tem como base as diretrizes do JCGM 100 e do JCGM 101, bem como as determinações da ISO 148-1. A metodologia proposta combina o método do Guia para a Expressão da Incerteza de Medição (GUM) e o método *bootstrap* paramétrico. Corpos de prova Charpy com entalhe em V, na configuração 5 mm x 10 mm x 55 mm, foram fabricados em seis aços carbono com baixo teor de elementos de liga, utilizados na fabricação de arames de tração de dutos flexíveis. Os ensaios Charpy foram realizados na faixa de temperatura de -196 °C a 200 °C de acordo com as normas ISO 148-1 e ASTM E23. A metodologia considera a variabilidade experimental, a incerteza do processo de ajuste do modelo da TH e a incerteza de calibração da máquina de impacto Charpy. Foram discutidos aspectos estatísticos relevantes à análise, como a distribuição dos parâmetros, a normalidade do mensurando e a homoscedasticidade dos resíduos, bem como o custo computacional associado a cada método. Os resultados obtidos mostraram que foi possível estimar e representar uma faixa de incerteza em torno da CTDF dos materiais avaliados, facilitando a comparabilidade entre eles. Foi realizada uma comparação sistemática entre os métodos GUM, Monte Carlo e a metodologia proposta baseada no *bootstrap* paramétrico, na qual se observou o elevado custo computacional do método de Monte Carlo, bem como a melhor representatividade estatística e eficiência computacional apresentado pelo método *bootstrap*. A metodologia foi validada experimentalmente por meio de ensaios em temperaturas discretas, nos quais se observou que as barras de incerteza associadas aos ensaios de validação se sobrepuseram às faixas de incerteza da CTDF obtidas pelo método *bootstrap*. A máxima diferença observada entre as incertezas expandidas associadas aos ensaios de validação e aquelas estimadas para a CTDF foi de -0,93 J.

Palavras-Chave: Incerteza de Medição. Método de Monte Carlo. Ensaio de Impacto Charpy, Método Bootstrap

PERES, J. G. F. **Methodology for the evaluation of the uncertainty associated with the ductile–brittle transition curve.** 2026. 112f. M. Sc. Dissertation, Federal University of Uberlândia, Uberlândia.

ABSTRACT

In this work, a methodology was defined and validated to calculate the uncertainty associated with the ductile–brittle transition curve (DBTC) obtained using the symmetric hyperbolic tangent (HT) model. The methodology is based on the guidelines of JCGM 100 and JCGM 101, as well as on the requirements of ISO 148-1. It combines the approaches of the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) and the parametric bootstrap method. Charpy V-notched specimens with dimensions of 5 mm × 10 mm × 55 mm were manufactured from six low-alloy carbon steels used in the production of tensile wires for flexible pipes. Charpy impact tests were performed over a temperature range from –196 °C to 200 °C in accordance with ISO 148-1 and ASTM E23. The proposed methodology accounts for the variability of absorbed energy values, the uncertainty associated with the HT model fitting process, and the calibration uncertainty of the Charpy impact machine. Relevant statistical aspects were discussed, including parameter distributions, measurand normality, and residual homoscedasticity, as well as the computational cost associated with each method. The results demonstrated that it was possible to estimate and represent uncertainty bands around the DBTC of the evaluated materials, facilitating their comparison. A systematic comparison between the GUM, Monte Carlo, and parametric bootstrap methods showed the high computational cost of the Monte Carlo approach and the superior statistical representativeness and computational efficiency of the bootstrap method. The methodology was experimentally validated using tests at discrete temperatures, for which the uncertainty bars of the validation tests overlapped with the DBTC uncertainty bands obtained by the bootstrap method. The maximum difference observed between the expanded uncertainties associated with the validation tests and those estimated for the DBTC was –0.93 J.

Keywords: Measurement Uncertainty. Monte Carlo Method. Charpy Impact Test. Bootstrap Method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Ilustração do equipamento de ensaio de impacto Charpy (CALLISTER, 2016)..	6
Figura 2.2 – CPs normatizados pela ASTM E2248 (ASTM, 2018) e ISO 14556 (ISO, 2023). Dimensões da seção transversal dos CPs entalhados em V Charpy padrão, <i>sub-zise</i> e miniaturizados. Fonte: Autor (2026).	7
Figura 2.3 – Representação esquemática de uma CTDF. Fonte: Autor (2026).	9
Figura 2.4 – Fluxograma do método de MC. Fonte: (FERNANDES, 2014)	16
Figura 2.5 – Representação gráfica da incerteza associada à diferentes regiões da CTDF. Fonte: PACHECO et al. (2026)	21
Figura 3.1 – Microscopia ótica do aço A. (a) Vista geral, (b) ampliação. Fonte: Autor (2026).	24
Figura 3.2 – Microscopia ótica aço B. (a) Vista geral, (b) ampliação. Fonte: Autor (2026). ..	25
Figura 3.3 – Microscopia ótica aço C. (a) Vista geral, (b) ampliação. Fonte: Autor (2026). ..	25
Figura 3.4 – Microscopia ótica aço D. (a) Vista geral, (b) ampliação. Fonte: Autor (2026). ..	26
Figura 3.5 – Microscopia ótica aço E. (a) Vista geral, (b) ampliação. Fonte: Autor (2026). ..	26
Figura 3.6 – Microscopia ótica aço F. (a) Vista geral, (b) ampliação. Fonte: Autor (2026)....	27
Figura 3.7 – Microestrutura observada em MEV/FEG dos aços (a) A, (b) B, (c) C, (d), D, (e) E e (f) F. Fonte: Autor (2026)	28
Figura 3.8 – Mapa de microdureza Vickers (HV0,1) dos arames de A a F. Fonte: Autor (2026)	30
Figura 3.9 – Geometria e dimensões do CP de ensaio de tração (dimensões em mm). Fonte: Adaptado de ASTM E8/E8M (ASTM, 2025).	31
Figura 3.10 – (a) Arame na condição como recebido; (b) Procedimento de prensagem dos arames; (c) Deformação plástica de 1 % na Instron. Fonte: Autor (2026).	33
Figura 3.11 – Corpo de prova de impacto CVN. Fonte: (ISO 148-1, 2016).	34
Figura 3.12 – Curva de temperatura em função do tempo após imersão em nitrogênio líquido. Fonte: Autor (2026).	36
Figura 3.13 – Diagrama de blocos para determinar a curva de transição dúctil-frágil. Fonte: Autor (2026).	39

Figura 4.1 – Resultados dos ensaios SCVN, CTDF, incerteza associada à CTDF, parâmetros do ajuste e resultados dos ensaios de validação para o Material A. Fonte: Autor (2026).	48
Figura 4.2 – Resultados dos ensaios SCVN, CTDF, incerteza associada à CTDF, parâmetros do ajuste e resultados dos ensaios de validação para o Material B. Fonte: Autor (2026).	48
Figura 4.3 – Resultados dos ensaios SCVN, CTDF, incerteza associada à CTDF, parâmetros do ajuste e resultados dos ensaios de validação para o Material C. Fonte: Autor (2026).	49
Figura 4.4 – Resultados dos ensaios SCVN, CTDF, incerteza associada à CTDF, parâmetros do ajuste e resultados dos ensaios de validação para o Material D. Fonte: Autor (2026).	49
Figura 4.5 – Resultados dos ensaios SCVN, CTDF, incerteza associada à CTDF, parâmetros do ajuste e resultados dos ensaios de validação para o Material E. Fonte: Autor (2026).	50
Figura 4.6 – Resultados dos ensaios SCVN, CTDF, incerteza associada à CTDF, parâmetros do ajuste e resultados dos ensaios de validação para o Material F. Fonte: Autor (2026).	50
Figura 4.7 – Fractografia de CPs ensaiados em temperatura ambiente para os materiais avaliados. Fonte: Autor (2026).	51
Figura 4.8 – <i>Boxplot</i> dos resíduos do ajuste da CTDF para os materiais avaliados. Fonte: Autor (2026).	56
Figura 4.9 – Histograma dos valores simulados para KV_{DBTT} do método MC. Fonte: Autor (2026).	57
Figura 4.10 – Histograma dos valores simulados para KV_{DBTT} do método bootstrap. Fonte: Autor (2026).	59
Figura 4.11 – Incerteza expandida da CTDF para os métodos GUM, MC e <i>Bootstrap</i> . Fonte: Autor (2026).	61
Figura 4.12 – Tempo de execução dos métodos GUM, MC e <i>Bootstrap</i> . Fonte: Autor (2026).	62
Figura 4.13 – (a) Valores de KV e incerteza expandida, (b) Valores de incerteza expandida obtidos pelos métodos ISO e <i>bootstrap</i> , (c) contribuição das variáveis do método ISO e (d) contribuição das variáveis do método <i>bootstrap</i> para o material A. Fonte: Autor (2026).	63
Figura 4.14 – (a) Valores de KV e incerteza expandida, (b) Valores de incerteza expandida obtidos pelos métodos ISO e <i>bootstrap</i> , (c) contribuição das variáveis do método ISO e (d) contribuição das variáveis do método <i>bootstrap</i> para o material B. Fonte: Autor (2026).	64
Figura 4.15 – (a) Valores de KV e incerteza expandida, (b) Valores de incerteza expandida obtidos pelos métodos ISO e <i>bootstrap</i> , (c) contribuição das variáveis do método ISO e (d) contribuição das variáveis do método <i>bootstrap</i> para o material C. Fonte: Autor (2026).	65
Figura 4.16 – (a) Valores de KV e incerteza expandida, (b) Valores de incerteza expandida obtidos pelos métodos ISO e <i>bootstrap</i> , (c) contribuição das variáveis do método ISO e (d) contribuição das variáveis do método <i>bootstrap</i> para o material D. Fonte: Autor (2026).	66

Figura 4.17 – (a) Valores de KV e incerteza expandida, (b) Valores de incerteza expandida obtidos pelos métodos ISO e <i>bootstrap</i> , (c) contribuição das variáveis do método ISO e (d) contribuição das variáveis do método <i>bootstrap</i> para o material E. Fonte: Autor (2026).	67
Figura 4.18 – (a) Valores de KV e incerteza expandida, (b) Valores de incerteza expandida obtidos pelos métodos ISO e <i>bootstrap</i> , (c) contribuição das variáveis do método ISO e (d) contribuição das variáveis do método <i>bootstrap</i> para o material F. Fonte: Autor (2026).	68
Figura 4.19 – Diferença entre a incerteza expandida do método <i>bootstrap</i> e a do método ISO. Fonte: Autor (2026).	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Dimensões dos CPs Charpy (espessura, largura e comprimento).....	8
Tabela 2.2 – Trabalhos da literatura que utilizam modelos de ajuste para determinar a CTDF.	11
Tabela 3.1 – Valores médios da análise de composição química dos materiais (% em peso). Fonte: Autor (2026).....	23
Tabela 3.2 – Valores médios das propriedades mecânicas dos materiais avaliados. Fonte: Autor (2026).....	31
Tabela 3.3 – Dimensões e tolerâncias do CP Charpy <i>half-size</i> . Fonte: (ISO 148-1, 2016)...	34
Tabela 3.4 – Número de ensaios Charpy para cada material. Fonte: Autor (2026).	40
Tabela 3.5 – Temperaturas dos ensaios de validação da metodologia. Fonte: Autor (2026).	45
Tabela 4.1 – Resultados do NRMSE dos ajustes das CTDF dos materiais avaliados. Fonte: Autor (2026).....	52
Tabela 4.2 – Resumo das propriedades e comportamento dos materiais avaliados. Fonte: Autor (2026).....	53
Tabela 4.3 – Comportamento da média dos valores de KV da validação em relação à faixa de incerteza estimada pelo método <i>bootstrap</i> . Fonte: Autor (2026).	54
Tabela 4.4 – Região da CTDF na qual cada temperatura de validação está para os materiais avaliados. Fonte: Autor (2026).....	Erro! Indicador não definido.
Tabela 4.5 – Resultados do Teste de Levene. Fonte: Autor (2026).	55
Tabela 4.6 – Resultados de <i>skewness</i> , curtose e do teste de KS para o método de MC. Fonte: Autor (2026).....	58
Tabela 4.7 – Resultados de <i>skewness</i> , curtose e do teste de KS para o método de MC. Fonte: Autor (2026).....	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Símbolos latinos:

a	Estimativa da variável
B	Número de simulações do método <i>bootstrap</i>
C	Parâmetro que define a meia-largura da transição dúctil-frágil
C_{θ}	Matriz de covariância dos parâmetros
h	Altura
$J_{i,j}$	Matriz Jacobiana
k	Fator de abrangência
l	Largura
M	Número de simulações do método Monte Carlo
n	Tamanho amostral
$\mathcal{N}$	Distribuição Normal
p	Número de parâmetros do modelo de ajuste
$r(x_i, x_j)$	Coefficiente de correlação entre as variáveis
s	Desvio-padrão amostral
s^2	Variância populacional
T	Temperatura
u	Incerteza padrão
u_c	Incerteza-padrão combinada
U	Incerteza expandida
ν_i	Graus de liberdade da grandeza de influência
ν_{eff}	Graus de liberdade efetivos
w	Espessura
x	grandeza de influência

Símbolos gregos:

$\epsilon_{i,j}$	Erro aleatório associado ao j-ésimo resultado de medição de x_i
μ	Valor médio
σ	Desvio-padrão populacional

σ^2	Variância populacional
θ	Vetor de parâmetros de ajuste
$\hat{\theta}$	Vetor de parâmetros estimados

Siglas e abreviaturas:

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BURR	Modelo de Burr
CCC	Cúbica de Corpo Centrado
CTDF	Curva de Transição Dúctil-Frágil
CVN	Charpy com entalhe em V
DBTT	Temperatura de Transição Dúctil-Frágil
EL	Expansão Lateral
FDP	Função Densidade de Probabilidade
GDS	Espectrometria de Emissão Óptica por Descarga Luminescente
GUM	Guia para a Expressão da Incerteza de Medição
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
KHT	Modelo de Kahout
KV	Energia absorvida
KV_{DBTT}	Energia absorvida correspondente à temperatura da DBTT
KV_{LS}	Energia absorvida do patamar inferior
KV_{US}	Energia absorvida do patamar superior
LS	Patamar inferior
MCVN	Charpy miniaturizado com entalhe em V
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MMQN	Método dos mínimos quadrados não linear
NIST	Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia
NRMSE	Raiz quadrada do erro quadrático médio normalizado
RMSE	Raiz quadrada do erro quadrático médio
SCVN	Charpy de dimensões reduzidas com entalhe em V
SFA	<i>Shear Fracture Apperance</i>
T_{9J}	Temperatura correspondente à energia absorvida de 9 J
$T_{13,5J}$	Temperatura correspondente à energia absorvida de 13,5 J
T_{27J}	Temperatura correspondente à energia absorvida de 27 J
T_{40J}	Temperatura correspondente à energia absorvida de 40 J
TDF	Transição Dúctil-Frágil
TH	Tangente Hiperbólica

THA	Tangente Hiperbólica Assimétrica
US	Patamar superior

SUMÁRIO

1	CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivo principal	2
1.2	Objetivos secundários	2
1.3	Contribuição científica alcançada com o desenvolvimento do trabalho.	3
1.4	Estrutura do trabalho	3
2	CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	Tipos de Fratura e Transição Dúctil-Frágil em Metais	4
2.2	Ensaio Charpy	5
2.3	Curva de Transição Dúctil-Frágil	8
2.3.1	Modelo de ajuste da CTDF	10
2.4	Incerteza de Medição – Método GUM	11
2.4.1	Avaliação do Tipo A da incerteza-padrão	12
2.4.2	Avaliação do Tipo B da incerteza-padrão	13
2.4.3	Incerteza-padrão combinada	13
2.4.4	Incerteza Expandida	14
2.5	Incerteza de Medição – Método de Monte Carlo	15
2.6	Incerteza de medição – Método <i>bootstrap</i>	17
2.6.1	<i>Bootstrap</i> paramétrico	17
2.7	Incerteza de Medição em Ensaios Charpy	19
3	CAPÍTULO III - METODOLOGIA	22
3.1	Caracterização dos Materiais	22
3.1.1	Análise de Composição Química	22

3.1.2	Análise Metalográfica	24
3.1.3	Propriedades Mecânicas	29
3.2	Endireitamento dos Arames e Fabricação dos Corpos de Prova de Ensaio de Impacto Charpy	31
3.2.1	Procedimento de Endireitamento dos Arames	31
3.2.2	Fabricação dos Corpos de Prova de Ensaio de Impacto Charpy	34
3.3	Ensaio de impacto Charpy	35
3.3.1	Determinação da curva de transição dúctil-frágil	37
3.4	Ajuste da curva de transição dúctil-frágil	40
3.5	Avaliação da Incerteza da Curva de Transição Dúctil-Frágil	41
3.5.1	Método GUM	41
3.5.2	Método de MC	43
3.5.3	Método <i>Bootstrap</i>	44
3.5.4	Incerteza-padrão combinada e incerteza expandida	45
3.5.5	Validação	45
3.5.6	Desempenho computacional dos métodos	46
4	CAPÍTULO IV – RESULTADOS	47
4.1	Resultados dos Ensaio SCVN, CTDF e Incerteza Associada.	47
4.2	Avaliação da Homoscedasticidade dos Resíduos	54
4.3	Histograma dos valores simulados	57
4.4	Comparação Entre os Métodos GUM, MC e <i>Bootstrap</i>	60
4.5	Resultados da Validação da Metodologia Proposta para Determinar a Incerteza da CTDF	62
4.6	Discussão com a Literatura	70
5	CAPÍTULO V – CONCLUSÃO	72
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	73
6	CAPÍTULO VI – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
	ANEXO A – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DA MÁQUINA DE TRAÇÃO	82
	ANEXO B – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO PAQUÍMETRO DIGITAL	86

ANEXO C – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DA MÁQUINA DE IMPACTO CHARPY	88
ANEXO D – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO BANHO TERMOSTÁTICO	91

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Os ensaios mecânicos desempenham papel fundamental na avaliação da integridade dos materiais, principalmente em aplicações nas quais a falha de um componente mecânico pode causar acidentes com riscos ao meio ambiente e à vida humana. Nesse contexto, os ensaios de impacto são utilizados há mais de um século na caracterização mecânica de materiais como aços, polímeros e madeira (RUSSEL, 1898). Esses ensaios medem a energia absorvida (KV) de um corpo de prova (CP) quando este é fraturado pelo impacto de um pêndulo de massa e velocidade conhecidas (TÓTH; ROSSMANITH; SIEWERT, 2002). Vale notar que a padronização dos CPs de impacto foi proposta por Charpy (CHARPY, 1901) em 1901 e o ensaio de impacto Charpy é o mais utilizado na atualidade.

A energia absorvida é o principal mensurando do ensaio Charpy, embora outros mensurandos também possam ser avaliados, como a expansão lateral (EL) e a *Shear Fracture Apperance* (SFA). Ao longo do tempo, os resultados dos ensaios de impacto, principalmente KV, se tornaram mais confiáveis, uma vez que inovações importantes foram introduzidas quanto à instrumentação do pendulo e o uso de sensores com melhor resolução e menor incerteza de medição. Um avanço importante está na normatização deste ensaio por meio de um conjunto de normas da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) e da *International Organization for Standardization* (ISO). Estas normas determinam a geometria e dimensões das diferentes configurações dos CPs, o procedimento de ensaio, os procedimentos para avaliação direta e indireta das máquinas de impacto, diretrizes para avaliar a incerteza associada aos resultados da verificação, bem como valores limites de erro e de repetibilidade que devem ser atendidos. Desta forma, o ensaio de impacto Charpy é um método simples, rápido e confiável para avaliar as propriedades de tenacidade ao impacto dos materiais (PACHECO; FERREIRA; ARENCIBIA, 2026).

Quando o ensaio Charpy é realizado em uma ampla faixa de temperatura (T) (-200 °C a 200 °C, por exemplo) e os valores de KV e de T são medidos e armazenados, é possível construir a curva de transição dúctil frágil (CTDF) do material. Diferentes modelos

matemáticos podem ser utilizados para ajustar a CTDF, entretanto o da Tangente Hiperbólica tem sido o mais utilizado pela comunidade científica. A partir desta curva são determinados parâmetros importantes como a energia nos patamares inferior (KV_{LS}) e superior (KV_{US}), respectivamente, a temperatura de transição dúctil-frágil (DBTT), bem como entender o comportamento do material em uma temperatura dada, especialmente para metais com estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC) (CALLISTER, 2016).

Além de caracterizar o comportamento mecânico, a CTDF permite a comparação entre diferentes materiais ou entre fornecedores distintos de um mesmo material. Para que decisões técnicas baseadas nessas curvas e em seus parâmetros sejam adequadas, é essencial que os resultados de medição sejam metrologicamente confiáveis. Essa confiabilidade é assegurada pelo atendimento aos requisitos da ISO/IEC 17025 (ISO, 2017), segundo a qual todo resultado de medição deve ser acompanhado de sua respectiva incerteza de medição, garantindo rastreabilidade, comparabilidade e credibilidade aos dados obtidos.

1.1 Objetivo principal

O objetivo da dissertação de mestrado é propor e validar uma metodologia para avaliar a incerteza associada à curva de transição dúctil-frágil obtida via ensaios Charpy, especificamente para aquela obtida pelo método HT simétrico.

1.2 Objetivos secundários

- Calcular a incerteza associada ao ajuste da CTDF via método *bootstrap*;
- Testar a homoscedasticidade dos dados;
- Implementar em Python a metodologia proposta para avaliar a incerteza da CTDF especificamente para o modelo da TH utilizando patamares variáveis;
- Avaliar a incerteza associada à energia absorvida seguindo as determinações da ISO 148-2 (ISO, 2016);
- Comparar os resultados decorrentes obtidos por meio da aplicação da metodologia proposta com aqueles decorrentes dos métodos GUM e Monte Carlo;
- Validar a metodologia proposta comparando a incerteza obtida a partir de ensaios de validação realizados em temperaturas discretas;
- Contribuir para a rastreabilidade dos resultados dos ensaios Charpy;

- Contribuir para a definição de um critério para avaliar a produção dos lotes de arame utilizados em dutos flexíveis.

1.3 Contribuição científica alcançada com o desenvolvimento do trabalho.

Esta dissertação de mestrado faz parte do projeto Desenvolvimento de Ensaio Charpy Convencional e Miniaturizado para Arames de Dutos Flexíveis financiado pela PETROBRAS e pela Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (EMBRAPII) desenvolvido em parceria com o LTAD/UFU. Este projeto tem como objetivo avaliar a tenacidade ao impacto e a integridade estrutural de arames de armaduras de tração de dutos flexíveis por meio de ensaios de impacto Charpy em corpos de prova tipo sub-size e miniaturizados.

As principais contribuições técnico-científicas deste trabalho concentraram-se no avanço da avaliação metrológica da CTDF obtida por ensaios Charpy. Foi proposta e implementada uma metodologia para a determinação da incerteza associada ao ajuste da CTDF como um todo, superando abordagens que se restringem à avaliação da incerteza em valores discretos de energia ou temperatura. A metodologia incorpora explicitamente a variabilidade experimental dos ensaios Charpy e a incerteza decorrente do ajuste do modelo da tangente hiperbólica, preservando a correlação entre os parâmetros ajustados e permitindo a obtenção de faixas de incerteza contínuas ao longo da curva.

1.4 Estrutura do trabalho

Esta dissertação está estruturada em seis capítulos, com o conteúdo dividido da seguinte maneira:

O capítulo II apresenta a revisão bibliográfica pertinente ao tema do trabalho.

No capítulo III é descrita a metodologia adota, incluindo os procedimentos experimentais e os métodos utilizados para a avaliação da incerteza da CTDF.

Os resultados são apresentados no capítulo IV, com suas respectivas análises e discussões.

No capítulo V são apresentadas as conclusões finais, bem como as sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, o capítulo VI apresenta a lista de referências bibliográficas utilizadas neste trabalho.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica que fundamenta este trabalho. Inicialmente são abordados os tipos de fratura em metais, bem como os conceitos de transição dúctil-frágil relacionados. Em seguida, são apresentados os fundamentos dos ensaios de impacto Charpy e os modelos matemáticos utilizados para determinar a CTDF. Na sequência, são discutidos os métodos para avaliação da incerteza de medição. Por fim, são revisados os principais estudos relacionados à avaliação da incerteza de medição dos resultados dos ensaios Charpy.

2.1 Tipos de Fratura e Transição Dúctil-Frágil em Metais

A fratura em materiais metálicos corresponde ao processo de falha estrutural associado à nucleação e propagação de trincas até a ruptura do material. Esse fenômeno pode ocorrer de maneira dúctil, frágil ou por mecanismos mistos, dependendo das condições de carregamento, temperatura, microestrutura e estado de tensões (DOWLING, 2013).

A fratura dúctil é caracterizada por deformação plástica significativa antes da ruptura, elevada absorção de energia e superfície de fratura com aspecto de micro cavidades. O processo envolve a nucleação de microvazios, crescimento e coalescência desses microvazios até a fratura final. Esse tipo de fratura é favorecido por temperaturas elevadas, baixas taxas de deformação e estados de tensão com menor triaxialidade (CALLISTER, 2016).

Já a fratura frágil, ocorre com mínima ou nenhuma deformação plástica e baixa absorção de energia. O mecanismo dominante neste caso é a clivagem cristalográfica, na qual a trinca se propaga rapidamente ao longo de planos cristalográficos específicos, como $\{100\}$ e $\{110\}$ para materiais com estrutura cúbica de corpo centrado (CCC) (KRASOVSKII e

VAINSHTOK, 1977). A fratura frágil é favorecida por baixas temperaturas, altas taxas de deformação, presença de entalhes e elevado estado triaxial de tensões (CALLISTER, 2016).

A dependência do comportamento à fratura com a temperatura resulta no fenômeno da transição dúctil-frágil (TDF). Esse fenômeno é devido à dependência térmica da mobilidade das discordâncias. Em baixas temperaturas, o movimento das discordâncias é reduzido, dificultando a deformação plástica e favorecendo a falha por clivagem. Com o aumento da temperatura, o material se torna mais plástico, facilitando a fratura dúctil (NITZSCHE e HSIA, 1994).

A literatura destaca que a microestrutura influencia fortemente os mecanismos de fratura. Fatores como tamanho de grão, morfologia e distribuição de fases, presença de inclusões não metálicas e grau de encruamento alteram tanto a resistência à nucleação de trincas quanto sua propagação (ANDERSON, 2005; DOWLING, 2013). De modo geral, a redução das dimensões do grão aumenta a resistência à fratura frágil, elevando a tenacidade e reduzindo a temperatura de transição dúctil-frágil (DBTT) (LONSDALE e FLEWITT, 1978; JIN, HWANG e MORRIS, 1975). O efeito dos diversos elementos de liga e de processamento são fortemente interligados, e é difícil mudar uma variável sem afetar outra. Entretanto, o efeito do teor de carbono é o mais conhecido. Desta forma, se o teor do carbono é alterado, mantendo constantes os outros elementos de liga, se observa que quanto maior é o teor de carbono, maior é a DBTT e menor é a resistência à propagação de trincas (DOWLING, 2013).

2.2 Ensaio Charpy

O ensaio Charpy foi desenvolvido pelo cientista G. Charpy no início do século XX com o objetivo de compreender o comportamento frágil dos materiais sob impacto. Devido à simplicidade, rapidez de execução e baixo custo experimental, este ensaio se consolidou como o principal método para avaliar a tenacidade ao impacto dos materiais.

A Figura 2.1 apresenta a ilustração do equipamento de ensaio Charpy. O equipamento é constituído por um pêndulo com um martelo em sua extremidade, um suporte no qual o CP é posicionado e uma escala de medição. No ensaio, o pêndulo é elevado a uma altura (h) conhecida, e ao ser liberado, atinge o CP. Após a fratura do CP, o pêndulo atinge uma altura final (h') menor do que a altura inicial, sendo a diferença entre as energias potenciais inicial e final correspondente à energia absorvida durante a fratura. A energia absorvida do ensaio Charpy é usualmente nomeada como KV (do alemão *Kerbschlagarbeit Versuch*) e expressa em joules.

A energia absorvida (KV) não é uma propriedade do material, mas um parâmetro dependente da configuração do CP e das condições de ensaio. Dessa forma, ela não pode ser utilizada diretamente para cálculos de projeto da mesma forma que a tenacidade à fratura. Apesar dessa limitação, o ensaio Charpy é utilizado de forma qualitativa na comparação de materiais, no controle de qualidade e na verificação da adequação ao serviço.

Além disso, o ensaio Charpy é o principal ensaio utilizado para determinar CTDF dos materiais (CALLISTER, 2016). A partir desta curva são determinados importantes parâmetros como a DBTT, que permite avaliar o comportamento do material a uma determinada temperatura de operação. Desta forma, o ensaio Charpy têm sido amplamente utilizados para esta finalidade devido a geometria simples do CP aliada a pequenas dimensões quando comparado com outras técnicas de ensaio (CAO, WU e FLEWITT, 2012).

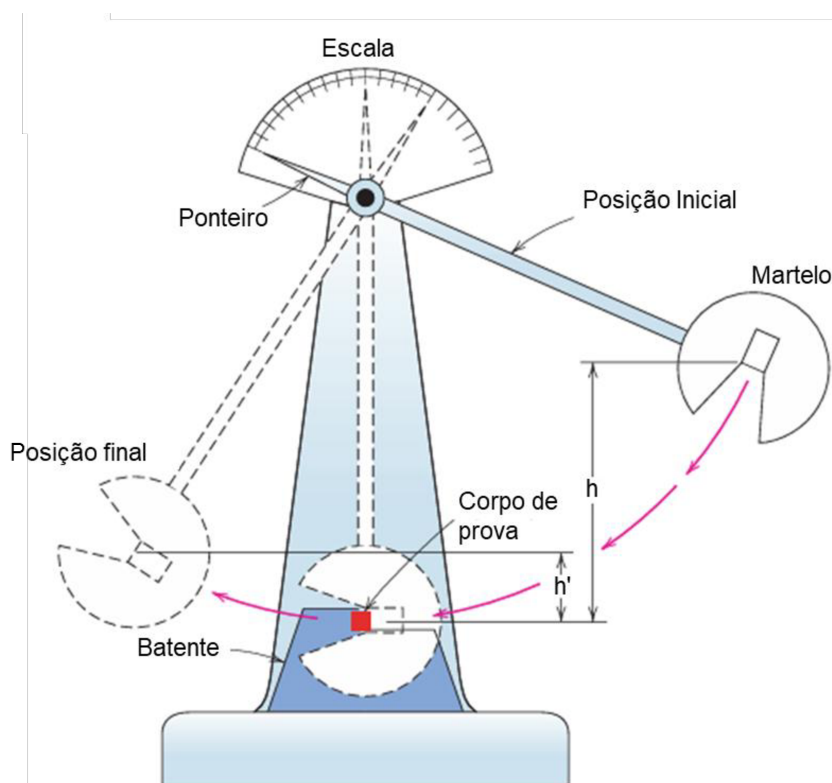


Figura 2.1 – Ilustração do equipamento de ensaio de impacto Charpy (CALLISTER, 2016).

As normas ASTM E23 (ASTM, 2024) e ISO 148-1 (ISO, 2016) descrevem os métodos de ensaio de impacto Charpy. Essas normas estabelecem os requisitos dos CPs, os procedimentos de ensaio e de avaliação dos resultados, além de critérios para verificação e calibração das máquinas de ensaio. A ISO 148-1 (ISO, 2016) apresenta também diretrizes para avaliar a incerteza associada à verificação das máquinas de impacto Charpy.

O ensaio Charpy permite a utilização de diferentes configurações de CPs como mostrado na Fig. 2.2, dependendo da quantidade de material disponível para ensaio. Na Tabela 2.1 são mostradas as diferentes configurações de CPs Charpy, bem como as dimensões da seção transversal.

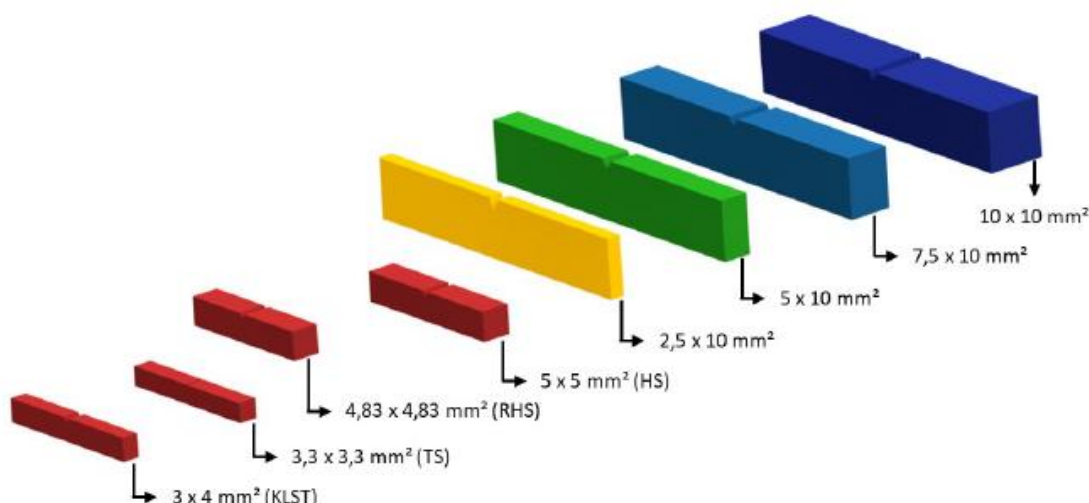


Figura 2.2 – CPs normatizados pela ASTM E2248 (ASTM, 2018) e ISO 14556 (ISO, 2023). Dimensões da seção transversal dos CPs entalhados em V Charpy padrão, *sub-zise* e miniaturizados. Fonte: Autor (2026).

Esta versatilidade em termos de dimensões é uma vantagem do ensaio de impacto Charpy, uma vez que, em muitos casos, a extração de uma pequena amostra do componente não compromete a sua funcionalidade. Podem ser referidas outras vantagens dos ensaios Charpy, tais como: ser uma técnica de ensaio consolidada com mais de um século de estudos e desenvolvimentos incorporados; o procedimento de ensaio é normatizado por normas técnicas, permitindo a comparabilidade dos resultados; robustez das máquinas de impacto; disponibilidade de CPs de referência que permitem a verificação indireta da máquina e contribuem para obtenção de resultados rastreáveis; e a existência de orientações para a avaliação da incerteza dos valores de KV (ISO, 2008). Além disso, é importante salientar que a Divisão de Produtos Químicos e Materiais Aplicados do Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (NIST) coordena uma comparação interlaboratorial internacional (round-robin) para o ensaio Charpy (PACHECO et al. 2026).

Tabela 2.1 – Dimensões dos CPs Charpy (espessura, largura e comprimento).

Configuração	International Organization for Standardization (ISO)	American Society for Testing and Materials (ASTM)
Convencional (CVN)	10 mm x 10 mm x 55 mm (148-1:2016)	10 mm x 10 mm x 55 mm (E23:2024)
Sub-size (SCVN)	7,5 mm x 10 mm x 55 mm (148-1:2016)	7,5 mm x 10 mm x 55 mm (E23:2024)
	5 mm x 10 mm x 55 mm (148-1:2016)	5 mm x 10 mm x 55 mm (E23:2024)
	2,5 mm x 10 mm x 55 mm (148-1:2016)	2,5 mm x 10 mm x 5mm (E23:2024)
Miniaturizado (MCVN)	4,83 mm x 4,83 mm x 24,13 mm (14556:2023)	4,83 mm x 4,83 mm x 24,13 mm (2248:2018)
	5 mm x 5 mm x 27,5 mm (14556:2023)	
	3,3 mm x 3,3 mm x 25,4 mm (14556:2023)	
	3 mm x 4 mm x 27 mm (14556:2023)	

2.3 Curva de Transição Dúctil-Frágil

A curva de transição dúctil–frágil representa a variação do comportamento à fratura de um material em função da temperatura. Para os ensaios Charpy, a CTDF é obtida, por exemplo, usando a relação entre KV e T. Também podem ser obtidas CTDF considerando a SFA ou a EL em função de T. A Figura 2.3 apresenta uma representação esquemática da CTDF.

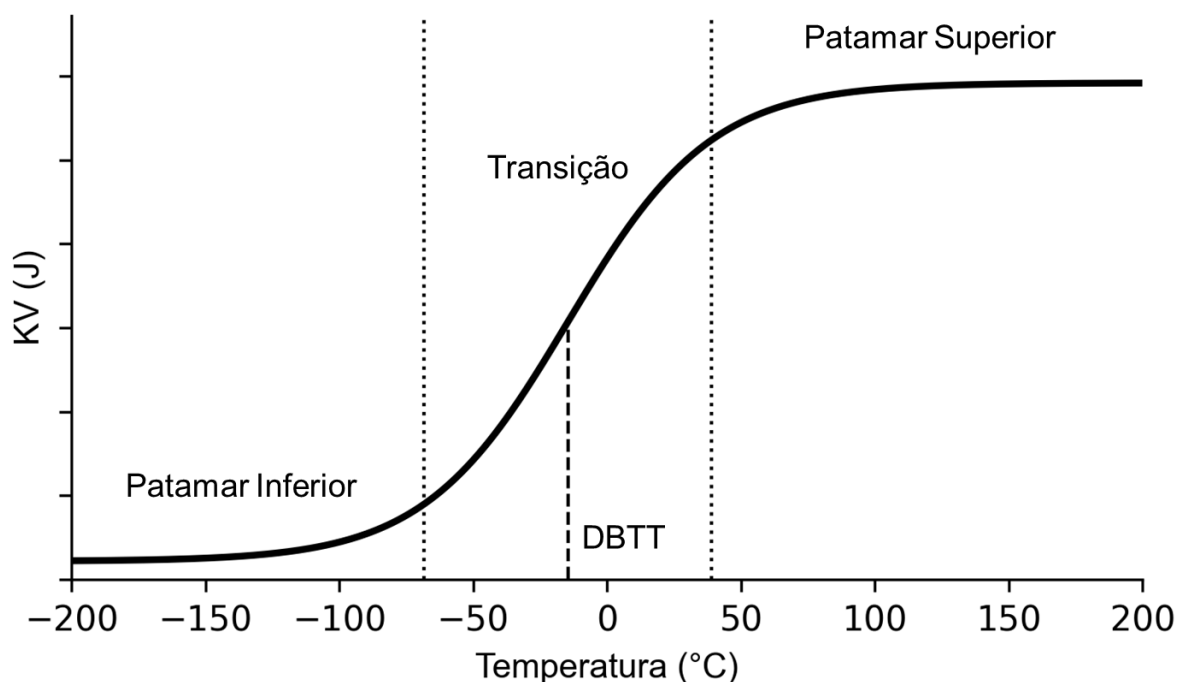


Figura 2.3 – Representação esquemática de uma CTDF. Fonte: Autor (2026).

A CTDF apresenta três regiões bem definidas: o patamar inferior (LS), correspondente a baixas temperaturas, no qual a energia absorvida é reduzida e a fratura ocorre predominantemente por clivagem; o patamar superior (US), associado a temperaturas maiores, e caracterizado por elevada absorção de energia e fratura dúctil com significativa deformação plástica; e a região de transição, na qual coexistem mecanismos dúcteis e frágeis e observa-se elevada dispersão dos resultados experimentais.

A determinação de uma temperatura de transição a partir da curva não é única e depende do critério adotado. Entre os critérios mais utilizados na literatura e em normas técnicas destacam-se: a temperatura correspondente a um valor fixo de energia absorvida, como o T_{27J} (PISARSKI *et al.*, 2002); a temperatura associada à energia média entre os patamares inferior e superior; e a temperatura na qual se observa uma fração específica de fratura frágil, frequentemente 50%. Cada critério fornece valores distintos de temperatura de transição e apresenta sensibilidades diferentes à dispersão dos dados e ao método de ajuste da curva, sendo a escolha do critério adotado dependente da aplicação (ISO, 2016).

A caracterização da CTDF requer o ajuste de um modelo matemático aos dados experimentais, de modo a representar a dependência de KV com a temperatura e permitir a determinação dos parâmetros de interesse, como os patamares superior e inferior de energia absorvida (KV_{US}) e (KV_{LS}), respectivamente, a DBTT e KV na temperatura da DBTT (KV_{DBTT}).

2.3.1 Modelo de ajuste da CTDF

As normas ISO 148-1 (ISO, 2016) e ASTM E23 (ASTM, 2024) não especificam um modelo matemático que deve ser utilizado para determinar a CTDF. Diversos modelos matemáticos têm sido propostos para descrever a relação entre KV e T. Esses modelos diferem quanto à capacidade de representar assimetrias da CTDF, facilidade de interpretação física dos parâmetros e complexidade matemática.

O modelo mais utilizado na literatura é o da tangente hiperbólica simétrica (TH) proposto por Oldfield (1975), que descreve a CTDF por meio de uma função *sigmoidal* conforme a Eq. (2.1).

$$KV(T) = \frac{KV_{LS} + KV_{US}}{2} + \frac{KV_{US} - KV_{LS}}{2} \cdot \tanh\left(\frac{T - DBTT}{C}\right) \quad (2.1)$$

Na Equação (2.1), KV_{LS} e KV_{US} são, respectivamente, os patamares inferior e superior de KV, e C é o parâmetro que corresponde à metade da largura da CTDF é expresso em °C.

As principais vantagens do modelo da TH são o menor número de graus de liberdade (quatro parâmetros) em relação aos demais métodos, a facilidade na interpretação física dos parâmetros e a boa aderência ao comportamento experimental observado em ensaios Charpy.

A Tabela 2.2 mostra de forma resumida um levantamento dos trabalhos desenvolvidos nas últimas três décadas que abordam o ajuste da curva de transição dúctil-frágil a partir de resultados de ensaios Charpy, destacando os diferentes modelos matemáticos utilizados e os materiais avaliados.

Para representar assimetrias na curva sigmoidal da CTDF, outros modelos como o da tangente hiperbólica assimétrica (THA), modelo de Burr e modelo de Kahout (KHT) foram propostos (LUCON et al., 2021). Embora isso permita uma maior flexibilidade do ajuste, a aplicação desses métodos é menos frequente e restrita a casos em que a assimetria da transição é significativa. Esses métodos têm cinco parâmetros de ajuste, ao invés de quatro, apresentando menos graus de liberdade, o que aumenta a incerteza do ajuste (FOX, 2016).

Wallin e Baer (2023) desenvolveram um método estatístico não paramétrico, baseado em probabilidades binomiais e análise por ordenação, para avaliar os modelos da TH, Burr e KHT. Os autores concluem que conjuntos de dados com menos de 30 resultados não devem ser ajustados por equações com muitos parâmetros, pois leva ao sobreajuste dos dados e resulta em maior incerteza para estimar as temperaturas características T_{27J} e T_{40J} .

Tabela 2.2 – Trabalhos da literatura que utilizam modelos de ajuste para determinar a CTDF.

Autor	Ano	Método	Material
Sakai et al.	1989	HT	A533B cl. 1 e A508 cl. 3
Windle et al.	1996	BURR	Aço baixo carbono
Tanguy et al.	2003	TH	A508 C13
Lee et al.	2011	TH	SA508 Gr.4N Ni-Cr-Mo
Noh et al.	2011	TH	Aço ferrítico alto Cr
Cao et al.	2012	BURR, Weibull e TH	Aço de reator nuclear
Orynyak et al.	2013	TH	Aço de reator nuclear
Chatterjee et al.	2014	TH	P91
Sun e Packer	2014	TH	Aço estrutural baixo carbono
Chatterjee et al.	2015	TH	Aço 9Cr-1Mo
Pillot e Pacqueau	2015	TH	Aços ferríticos com limite de escoamento de 290 a 1180 MPa (286 curvas de transição)
Lucon et al.	2016	TH	X52, X65, X70, X100, LL141, HH143, SH38
Iwata et al.	2018	TH	AM-4Al, AM-0Al, PM-4Al, PM-0Al
Kolluri et al.	2021	TH	Aço irradiado de vaso de pressão de reatores
Mandal et al.	2021	TH	Aço de ultra alta resistência (UHSS)
Duan et al.	2022	TH	Aço ferrítico baixo carbono
Wallin e Baer	2023	TH, BURR e KHT	Aços 15Ch2MFA
Acuna et al.	2024	TH	Aço inox hiper duplex (HDSS)
Sakonder et al.	2024	TH	X65
Jeong et al.	2024	TH	SA508 Gr.3
Shi et al.	2024	TH	CLF-1
Bhandari et al.	2025	TH	Aço baixo carbono
Bhandari et al.	2025	TH	Aço baixo carbono
Miura et al.	2025	TH	Aço de reator nuclear
Lin et al.	2025	TH	Liga de W-Re
Chaouadi et al.	2025	TH	SA 508
Niknejad et al.	2025	TH	X65
Kotrechko	2025	TH	A 302-B, A 533-B, SA 302 BM, Eurofer-97
Pacheco et al.	2026	THA	AISI 4340

2.4 Incerteza de Medição – Método GUM

A avaliação da incerteza de medição é um dos pilares da metrologia moderna, pois fornece uma medida quantitativa da qualidade e da confiabilidade do resultado de medição. Conforme determina o Guia para a Expressão da Incerteza de Medição - GUM (INMETRO, 2012), a incerteza é o parâmetro que representa uma distribuição de probabilidade para descrever os possíveis valores atribuídos a um mensurando. Dessa forma, a incerteza é um

parâmetro que caracteriza a dispersão dos resultados de medição. A correta avaliação e declaração da incerteza são essenciais para a comparabilidade de resultados, a rastreabilidade metrológica e o atendimento a requisitos normativos, como os estabelecidos na ABNT ISO/IEC 17025 (ISO, 2017).

O método mais amplamente aceito para a avaliação da incerteza de medição é o descrito no GUM. Esse método requer a definição de um modelo matemático que represente o mensurando como uma função das grandezas de entrada que influenciam o resultado da medição. De acordo com Arencibia et al. (2019), a etapa de identificação dos fatores de influência é a etapa mais crítica na aplicação do método GUM. A incerteza associada a cada grandeza de influência é denominada incerteza-padrão, a qual pode ser determinada por meio de dois tipos de avaliação: Tipo A e Tipo B.

2.4.1 Avaliação do Tipo A da incerteza-padrão

A avaliação do tipo A da incerteza-padrão é baseada na análise estatística de observações repetidas obtidas sob condições de medição controladas e aparentemente idênticas. Nessa abordagem, a melhor estimativa da grandeza de influência é, na maioria dos casos, a média aritmética das observações realizadas. A variabilidade observada nos dados experimentais é caracterizada pelo desvio-padrão experimental, enquanto a incerteza (u) associada à grandeza de influência (x) é calculada pelo desvio-padrão experimental da média, conforme a Eq. (2.2).

$$u(x) = \sqrt{\frac{s^2}{n}} \quad (2.2)$$

Na Equação (2.2), s é o desvio-padrão experimental e n é o tamanho amostral.

Essa forma de avaliação pressupõe que a variabilidade observada seja de natureza aleatória, e que o número de observações seja suficiente para fornecer uma estimativa estatisticamente confiável da dispersão associada. Quando essas condições são atendidas, a incerteza-padrão do Tipo A fornece uma medida objetiva da repetibilidade do processo de medição e da confiabilidade estatística da estimativa da grandeza de entrada.

O GUM determina que uma distribuição de probabilidades seja adotada para calcular a incerteza padrão de uma dada variável de entrada, tais como a normal, retangular, triangular ou trapezoidal, sendo a escolha dependente do grau de conhecimento sobre a variável em questão. No caso particular da avaliação do Tipo A se assume uma distribuição normal

quando o tamanho amostral, número de leituras, por exemplo, for maior que 30, caso contrário a distribuição *T-student* é a mais indicada.

2.4.2 Avaliação do Tipo B da incerteza-padrão

A avaliação do Tipo B da incerteza-padrão é aplicada quando a estimativa da grandeza de influência não é obtida por meio de observações repetidas. Nesse caso, a incerteza-padrão é avaliada a partir de informações disponíveis em certificados de calibração, especificações de fabricantes, normas técnicas ou com base no julgamento científico fundamentado.

Dependendo da quantidade de informação e da forma como ela se encontra disponível podem ser utilizadas diferentes equações para o cálculo da incerteza-padrão do Tipo B. Para uma distribuição retangular, utilizada quando se dispõe de pouca informação sobre a variável, a incerteza padrão pode ser determinada por meio da Eq. (2.3). Por sua vez, a Eq. (2.4) deve ser aplicada quando a distribuição adotada é a triangular.

$$u(x) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (2.3)$$

$$u(x) = \frac{a}{\sqrt{6}} \quad (2.4)$$

Nas Equações (2.3) e Eq. (2.4), “a” é a estimativa da variável.

Quando a incerteza associada a uma grandeza de entrada (x) é declarada em um certificado de calibração como uma incerteza expandida $U(x)$, acompanhada do fator de abrangência $k(x)$, a Eq. (2.5) deve ser adotada para estimar a incerteza padrão.

$$u(x) = \frac{U(x)}{k(x)} \quad (2.5)$$

Neste caso, a distribuição de probabilidades adotada deve ser aquela declarada no certificado de calibração.

2.4.3 Incerteza-padrão combinada

Em geral, o valor de um mensurando é afetado por diversas grandezas de influência, cada uma com sua respectiva incerteza-padrão associada. A incerteza-padrão combinada representa o efeito conjunto dessas incertezas sobre o resultado de medição, quantificando a dispersão dos valores que podem ser atribuídos ao mensurando. Dessa forma, a avaliação da incerteza-padrão combinada associada ao mensurando é realizada por meio da aplicação

da lei de propagação de incertezas no modelo matemático de medição. baseada na aproximação de primeira ordem da expansão em série de Taylor em torno das variáveis de influência. Assim, a incerteza padrão combinada associada ao mensurando é calculada conforme a Eq. (2.6).

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i) \cdot u(x_j) \cdot r(x_i, x_j) \quad (2.6)$$

Na Equação (2.6), y é a estimativa do mensurando Y , enquanto x_i corresponde à estimativa da variável de influência X_i . A variância associada a cada estimativa x_i é denotada por $u^2(x_i)$, e $u(x_i)$ representa a incerteza-padrão associada à grandeza de influência X_i , para todo i variando de 1 até N , sendo N o número total de variáveis que influenciam o mensurando. O termo $r(x_i, x_j)$ é o coeficiente de correlação entre as estimativas x_i e x_j , o qual quantifica o grau de dependência estatística entre essas variáveis de influência. Os termos $\frac{\partial f}{\partial x_i}$, denominados coeficientes de sensibilidade, são as derivadas parciais do modelo matemático da medição em relação às estimativas das variáveis x_i .

No caso particular em que as grandezas de influência podem ser consideradas não correlacionadas, as covariâncias são nulas e a expressão geral da lei de propagação de incertezas se reduz à Eq. (2.7).

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (2.7)$$

2.4.4 Incerteza Expandida

Embora a incerteza-padrão combinada seja apropriada para expressar a incerteza de um resultado de medição, a probabilidade de abrangência associada é de 68,27 %. Muitas vezes se faz necessário a definição de um intervalo de abrangência associado a um dado nível de probabilidade. Para tanto, o GUM apresenta o conceito de incerteza expandida, a qual fornece uma forma padronizada de expressar a incerteza associada ao resultado de medição.

A incerteza expandida U é definida como o produto da incerteza-padrão combinada $u_c(y)$ pelo fator de abrangência k correspondente, conforme a Eq. (2.8).

$$U(y) = k(y) \cdot u_c(y) \quad (2.8)$$

Para determinar o valor do fator de abrangência k da medição em questão a tabela de distribuição *t-Student* deve ser consultada. Para tanto devem ser previamente calculados os graus de liberdade efetivos (v_{eff}) da medição por meio da aplicação da equação de Welch-Satterthwaite, na qual v_i representa os graus de liberdade da variável x_i , conforme a Eq. (2.8).

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \quad (2.8)$$

Por fim, o resultado de uma medição deve ser expresso pelo valor estimado do mensurando acompanhado do valor da incerteza expandida e do nível de abrangência correspondente. A aplicação sistemática do método GUM permite avaliar e expressar a incerteza de medição de forma consistente e padronizada, assegurando maior confiabilidade técnica e comparabilidade entre resultados.

2.5 Incerteza de Medição – Método de Monte Carlo

O método de Monte Carlo (MC), proposto no JCGM 101 (BIPM et al., 2008), é uma abordagem numérica para a avaliação da incerteza de medição baseada na propagação das distribuições de probabilidade associadas às variáveis de influência por meio do modelo matemático da medição. O método de MC é conceitualmente compatível com o GUM, uma vez que também parte da definição explícita do mensurando, da identificação das grandezas de entrada relevantes e da estimativa das incertezas-padrão dessas grandezas por meio de avaliações do Tipo A ou do Tipo B.

A principal distinção entre o método de MC e o método GUM está na forma de calcular a incerteza-padrão combinada. Enquanto o GUM se baseia na linearização do modelo matemático em torno do valor nominal e na aplicação da lei de propagação de incertezas, o método de Monte Carlo realiza essa propagação de forma direta e numérica. Para isso, cada variável de entrada é representada por sua Função Densidade de Probabilidade (FDP), que pode assumir diferentes formas, como normal, retangular ou triangular, conforme o conhecimento disponível sobre a grandeza considerada.

A Figura 2.4 apresenta o fluxograma da avaliação da incerteza de medição utilizando o método de MC. A aplicação do método de Monte Carlo possui três etapas principais: formulação, propagação e resumo (INMETRO, 2008). Na etapa de formulação, define-se o mensurando, o modelo matemático que o descreve e as FDPs associadas às variáveis de

entrada. Na etapa de propagação, são gerados valores aleatórios para cada variável de entrada, de acordo com suas respectivas distribuições de probabilidade, e esses valores são propagados repetidamente pelo modelo matemático. Esse procedimento é realizado um grande número de vezes, produzindo uma amostra numérica do mensurando. Por fim, na etapa de resumo, a distribuição empírica dos valores simulados do mensurando é analisada para a obtenção de estimativas como valor esperado, incerteza-padrão combinada e intervalos de abrangência.

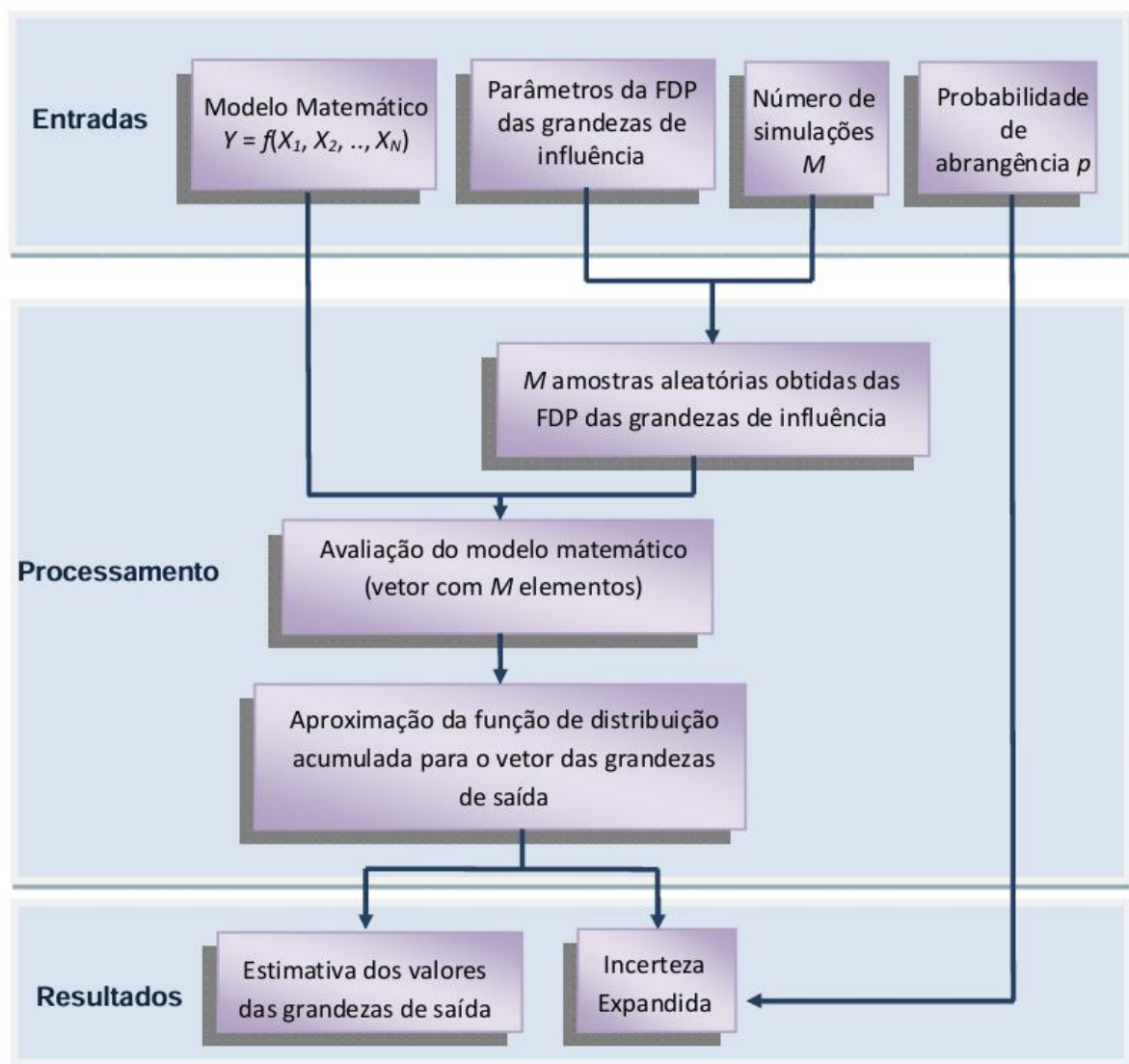


Figura 2.4 – Fluxograma do método de MC. Fonte: (FERNANDES, 2014)

Uma das principais vantagens do método de Monte Carlo é a sua aplicabilidade a modelos não lineares, distribuições não normais e situações em que a aproximação linear do GUM não é válida ou suficiente. Além disso, o método fornece uma descrição mais completa

do comportamento probabilístico do mensurando. Por outro lado, o método MC apresenta como desvantagem a dependência do número de iterações realizadas. O GUM S1 recomenda que o número de iterações inicial seja de 1.000.000, o que implica em elevado custo computacional e a necessidade de critérios adequados para assegurar a qualidade e a convergência dos resultados.

2.6 Incerteza de medição – Método *bootstrap*

O método *bootstrap* é uma técnica estatística de reamostragem introduzida por Bradley Efron em 1979, cujo objetivo é aproximar a distribuição de probabilidade de estimadores estatísticos a partir de um conjunto finito de resultados de medição, sem recorrer a expressões analíticas explícitas para a distribuição amostral (RATICK e SCHWARZ, 2009).

A ideia do método é simples: a partir do conjunto de dados experimentais, são geradas M amostras e para cada amostra gerada, os parâmetros de interesse, como média, mediana, coeficiente de correlação ou parâmetros de um modelo de regressão são calculados e armazenados. O conjunto desses valores calculados forma uma distribuição empírica que se aproxima à distribuição real do parâmetro estimado. Essa distribuição simulada permite quantificar o erro-padrão e intervalos de confiança sem exigir conhecimento prévio da forma exata da distribuição dos erros ou dos dados experimentais (NELSON, 2008).

Existem duas abordagens principais de *bootstrap*:

1. *Bootstrap* não paramétrico: O método não assume forma específica de distribuição. As novas amostras são obtidas diretamente dos dados observados, preservando a estrutura empírica da variabilidade.
2. *Bootstrap* paramétrico: Utilizado quando se conhece ou se assume que os dados seguem uma distribuição específica. Nesse caso, em vez de reamostrar diretamente dos dados observados, simulam-se novos conjuntos de dados a partir do modelo ajustado, usando os parâmetros estimados inicialmente.

No contexto metrológico, o *bootstrap* paramétrico apresenta maior afinidade conceitual com a abordagem probabilística recomendada pelo GUM. Dessa forma, apenas o *bootstrap* paramétrico é apresentado nesta seção.

2.6.1 *Bootstrap* paramétrico

No *bootstrap* paramétrico, as amostras *bootstrap* são geradas por simulação a partir da distribuição probabilística observada no processo de medição. Seja $x_{i,j}$ o j -ésimo resultado de

medição associado à grandeza de entrada X_i , cada resultado de medição pode ser descrito pela Eq. (2.8).

$$x_{i,j} = \mu_i + \epsilon_{i,j} \quad (2.8)$$

Na Equação (2.8) μ_i é o valor esperado (média) associado à grandeza de entrada X_i e $\epsilon_{i,j}$ é o erro aleatório associado ao j-ésimo resultado de medição de X_i . O erro aleatório $\epsilon_{i,j}$ é modelado seguindo uma FDP com média zero e distribuição igual à variância da grandeza de entrada. A escolha mais comum é a distribuição normal, logo a estimativa dos erros aleatórios é descrita conforme a Eq. (2.9).

$$\epsilon_{i,j} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_i^2) \quad (2.9)$$

Utilizando as Equações (2.8) e (2.9) simula-se B conjuntos de dados denominados de *bootstrap*. Para cada conjunto *bootstrap*, o modelo de medição é aplicado, obtendo-se um valor simulado do mensurando. Cada valor *bootstrap* do mensurando pode ser uma possível materialização do mensurando, coerente com o modelo de medição e com as hipóteses do modelo estatístico considerado.

O conjunto dos valores *bootstrap* é uma aproximação numérica da distribuição de probabilidade do mensurando. Assim, a incerteza-padrão associada ao mensurando é estimada como o desvio-padrão da distribuição *bootstrap*. Essa estimativa é classificada como uma incerteza-padrão do tipo A, pois é obtida por meio da análise estatística da variabilidade dos valores simulados.

O método *bootstrap* e o MC são semelhantes, pois ambos são baseados em simulações em que as distribuições estatísticas são propagadas por um modelo matemático para avaliar a incerteza de um mensurando. A diferença entre os métodos está em como a incerteza é modelada e introduzida na análise. No método de MC, a distribuição de probabilidade é aplicada diretamente aos parâmetros de ajuste do modelo matemático, enquanto no método *bootstrap* a incerteza é avaliada por reamostragem dos dados experimentais, com reajuste dos parâmetros do modelo a cada iteração.

2.7 Incerteza de Medição em Ensaio Charpy

A norma ISO 148-1 (ISO, 2016) estabelece uma metodologia robusta e simples para avaliar a incerteza de medição associada ao valor médio de KV em ensaios Charpy para uma temperatura discreta, seguindo as determinações do GUM (INMETRO, 2012b). As principais fontes de incerteza consideradas são a variabilidade dos resultados experimentais, a incerteza associada à calibração da máquina de impacto Charpy, a resolução desta e a tendência relacionada à temperatura do ensaio. A norma declara que a incerteza associada à resolução da máquina de impacto é insignificante e pode ser desprezada na maioria dos casos. Além disso, a influência da temperatura sobre KV é altamente dependente do material, especialmente na região da TDF. Por esse motivo, a norma não recomenda a incorporação da incerteza associada à temperatura de ensaio no cálculo da incerteza combinada de KV.

Apesar do ensaio Charpy ter sido utilizado amplamente na literatura, poucos trabalhos foram encontrados sobre a avaliação da incerteza dos mensurandos relacionados, bem como dos parâmetros decorrentes da CTDF.

Todinov (2002) desenvolveu um modelo probabilístico para avaliar a incerteza associada à energia absorvida em ensaios Charpy e à localização da região de transição dúctil-frágil em soldas multi-passe de aço C-Mn, considerando explicitamente a heterogeneidade microestrutural (zonas central, intermediária e reaquelada). A incerteza foi avaliada por meio da modelagem de KV como uma mistura de distribuições, na qual a variância global depende tanto da variabilidade intrínseca de cada zona de soldagem quanto das probabilidades desconhecidas de amostragem, sendo determinado um limite superior conservador da variância. Esse limite foi então propagado, via simulação de Monte Carlo, para estimar a incerteza na temperatura de transição definida por T_{40J} . Os resultados mostraram que, para dados obtidos em oito temperaturas de ensaio, existe uma probabilidade de 6,4 % de o valor estimado de T_{40J} diferir mais de ± 20 K do valor verdadeiro, enquanto para apenas quatro temperaturas essa probabilidade sobe para 24 %. Por outro lado, com 16 temperaturas, a probabilidade de erro superior a ± 10 K é reduzida para cerca de 9,6 %. O estudo mostra que o aumento do número de temperaturas de ensaio e a redução da variabilidade da energia Charpy diminuem significativamente a incerteza na determinação da DBTT.

Marini (2020) propôs uma abordagem empírica para a estimativa da incerteza de medição das temperaturas de transição dúctil-frágil (DBTT) em ensaios Charpy, considerando que essa incerteza depende exclusivamente da matriz de ensaio, definida pelas temperaturas de ensaio e pelo número de corpos de prova testados. O estudo baseou-se em 142 ensaios realizados em um aço para vaso de pressão de reator, em uma faixa de temperaturas entre -196 °C e $+300$ °C, com ajuste da curva de transição por uma função do tipo tangente

hiperbólica e avaliação das incertezas pelo método de Monte Carlo, a partir da geração de 10 000 conjuntos sintéticos de dados. Foram analisadas quatro definições de temperatura de transição associadas a níveis de energia de 28 J, 41 J, 56 J e 68 J, resultando em valores médios de DBTT próximos de $-49\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-38\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$, com incertezas expandidas correspondentes da ordem de $4,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, $3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $3,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Destaca-se que a maior incerteza relativa ocorre para a definição em 56 J, alcançando aproximadamente 17 % do valor médio, enquanto a incerteza associada ao patamar superior da curva foi estimada em cerca de 4,5 J, o que corresponde a aproximadamente 2,7 % da energia média desse patamar, evidenciando a dependência da incerteza com a posição da matriz de ensaio em relação à região de transição.

Lucon et al. (2021) propuseram que o erro padrão dos parâmetros de ajuste e da CTDF podem ser calculados utilizando o *bootstrap* paramétrico. Os parâmetros do modelo foram estimados pelo método dos mínimos quadrados não lineares (MMQL) e os conjuntos de dados simulados foram gerados considerando distribuição normal, com desvio-padrão igual ao raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE), com tamanho amostral de 1.000 conjuntos de dados. O erro padrão das grandezas de interesse foi calculado como o desvio-padrão das distribuições obtidas a partir das repetições *bootstrap*.

Switzner et al. (2023) desenvolveram três algoritmos para estimar a incerteza da DBTT definida pela temperatura com SFA igual a 85% (T85%) e KV_{US} por simulação de Monte Carlo. O estudo utilizou um aço ferrítico para dutos API-5L X52, e a CTDF foi determinada tanto para KV quanto para SFA, utilizando 12 ensaios Charpy realizados em seis temperaturas. A incerteza foi avaliada considerando erros experimentais descritos na ASTM E23, assumindo desvio-padrão de 5 % para a SFA e $0,6\text{ J} + 2,6\text{ \%}$ do valor medido para KV, a partir dos quais foram geradas distribuições empíricas dos parâmetros ajustados. Segundo os autores, o algoritmo de quatro parâmetros ajusta de forma independente todos os parâmetros do modelo da TH, o que resulta em maior flexibilidade, porém em maior incerteza associada aos parâmetros estimados. Já o algoritmo de dois parâmetros impõe restrições ao modelo, fixando os patamares inferior e superior da SFA em 0% e 100%, respectivamente. O algoritmo de um parâmetro é igual ao de dois parâmetros, mas considerando que a largura da CTDF é conhecida previamente e é dependente exclusivamente da espessura do CP. Para o conjunto de dados analisado, o algoritmo de quatro parâmetros resultou em T85% de $-46\text{ }^{\circ}\text{C}$, com incerteza de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, enquanto o algoritmo de dois parâmetros reduziu a incerteza para $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ e o algoritmo de um parâmetro apresentou incerteza na faixa de $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $-31\text{ }^{\circ}\text{C}$. O KV_{US} obtido foi de 46 J, com incerteza de 8 J (quatro parâmetros) e 5 J (dois parâmetros), enquanto para o modelo de um parâmetro KV_{US} foi de $47 \pm 5\text{ J}$.

Pacheco et al. (2026) propuseram uma metodologia detalhada para a avaliação da incerteza associada à DBTT obtida por ensaios Charpy, combinando o modelo da tangente hiperbólica assimétrica (AHT) com os métodos do GUM e de Monte Carlo. O estudo utilizou um aço AISI 4340 temperado e revenido (38 HRC), ensaiado em uma ampla faixa de temperaturas ($-190\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $200\text{ }^{\circ}\text{C}$). As incertezas associadas à energia absorvida e à temperatura de ensaio foram avaliadas pelo GUM, considerando fontes do tipo A e B (variabilidade dos ensaios, calibração da máquina e do sistema de medição de temperatura), enquanto a incerteza da DBTT foi propagada por simulação de Monte Carlo. O valor obtido para a DBTT foi $-30,66\text{ }^{\circ}\text{C}$, com incerteza expandida de $\pm 0,35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($k = 2,00$), correspondente a cerca de 1,1 % do valor medido. A Figura 9 do artigo ilustra graficamente a contribuição relativa das incertezas de energia e temperatura em diferentes regiões da curva de transição, evidenciando que a incerteza associada à energia Charpy domina amplamente o balanço de incerteza, sobretudo na região de transição, onde a contribuição de $U(KV)$ chega a ser mais de uma ordem de grandeza superior à de $U(T)$, reforçando que a dispersão da energia absorvida é o fator crítico na determinação da incerteza da DBTT.

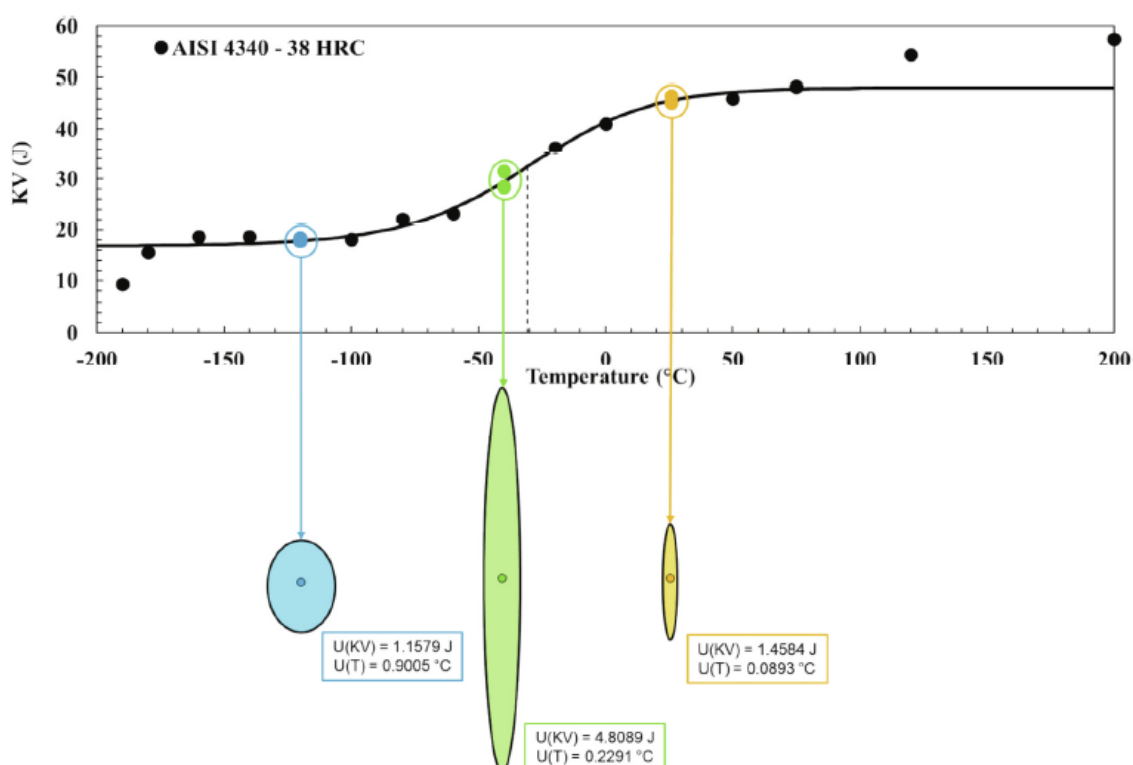


Figura 2.5 – Representação gráfica da incerteza associada à diferentes regiões da CTDF.
Fonte: PACHECO et al. (2026).

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia adotada no desenvolvimento do trabalho, estruturada em cinco etapas principais. A primeira etapa corresponde à caracterização dos materiais, abrangendo a análise de composição química, a análise metalográfica e a determinação das propriedades mecânicas. Em seguida, se descreve a metodologia de fabricação e controle dimensional dos CPs. A terceira etapa descreve a metodologia de execução dos ensaios experimentais. A quarta etapa apresenta a metodologia de análise dos resultados, utilizada para realizar o ajuste da curva de transição dúctil-frágil. Por fim, descreve-se a metodologia adotado para a avaliação da incerteza associada à CTDF, bem como o procedimento para sua validação.

3.1 Caracterização dos Materiais

No presente trabalho, seis aços carbono com baixo teor de elementos de liga utilizados na fabricação de arames de tração de dutos flexíveis, foram selecionados para inicialmente se obter as CTDF obtidas via ensaios Charpy. Em seguida a incerteza associada às curvas é determinada. Os aços foram denominados de A, B, C, D, E e F para preservar acordos de sigilo sem comprometer a análise científica.

3.1.1 Análise de Composição Química

A análise de composição química dos materiais foi realizada utilizando a espectrometria por descarga luminescente (GDS) usando o equipamento da fabricante LECO, modelo GDS500A, com resolução de 0,001 % em peso. Os elementos carbono (C) e enxofre (S) foram quantificados utilizando o método de combustão descrito na norma ASTM E1019 (ASTM, 2024) para maior confiabilidade dos resultados. Para tanto, foi utilizado o analisador automático simultâneo de Carbono e Enxofre da marca Quimitrom, modelo QCS 1232 e

número de série SNI. 041. Três medições foram realizadas por material. Os valores médios de composição química e o valor do desvio padrão amostral para um nível de confiança de 95 % são apresentados na Tab. 3.1.

Tabela 3.1 – Valores médios da análise de composição química dos materiais (% em peso).

Fonte: Autor (2026)

Elemento	Material					
	A	B	C	D	E	F
C	0,347 ±	0,589 ±	0,666 ±	0,692 ±	0,722 ±	0,766 ±
	0,003	0,002	0,005	0,007	0,009	0,004
Mn	0,724 ±	0,664 ±	0,608 ±	0,522 ±	0,784 ±	0,644 ±
	0,001	0,001	0,002	0,003	0,003	0,004
Si	0,244 ±	0,302 ±	0,242 ±	0,196 ±	0,241 ±	0,297 ±
	0,002	0,003	0,003	0,003	0,002	0,004
P	0,016 ±	0,011 ±	0,015 ±	0,009 ±	0,021 ±	0,014 ±
	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000
S	0,008 ±	0,001 ±	0,010 ±	0,006 ±	0,002 ±	0,002 ±
	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000
Cr	0,034 ±	0,023 ±	0,015 ±	0,022 ±	0,054 ±	0,015 ±
	0,001	0,000	0,000	0,002	0,001	0,004
Ni	0,035 ±	0,023 ±	0,019 ±	0,016 ±	0,021 ±	0,014 ±
	0,003	0,001	0,001	0,008	0,003	0,002
Mo	0,007 ±	0,008 ±	0,005 ±	0,007 ±	0,010 ±	0,008 ±
	0,002	0,002	0,001	0,002	0,001	0,001
Al	0,030 ±	0,038 ±	0,000 ±	0,000 ±	0,028 ±	0,040 ±
	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
Cu	0,012 ±	0,009 ±	0,014 ±	0,009 ±	0,014 ±	0,015 ±
	0,003	0,001	0,000	0,000	0,002	0,001
Ti	0,002 ±	0,005 ±	0,003 ±	0,004 ±	0,004 ±	0,004 ±
	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,002
V	0,002 ±	0,001 ±	0,003 ±	0,001 ±	0,003 ±	0,049 ±
	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001

Observa-se que os aços A e B possuem médio teor de carbono (<0,6 %) enquanto os demais aços apresentam alto carbono. Além disso, destaca-se que o aço F é o único que

possui teor de vanádio com efeito metalúrgico apreciável, aumentando a resistência mecânica e a tenacidade do material por meio do refino dos grãos.

3.1.2 Análise Metalográfica

As amostras de metalografia foram embutidos em baquelite, retificados e lixados progressivamente com lixas abrasivas de SiC de 400, 600 e 1200 mesh, utilizando uma lixadora Arotec, e polidos utilizando pastas de diamante com granulometrias médias de 9, 6, 3 e 1 μm em uma polidora Arotec VV. Logo em seguida do polimento, com a superfície do material ativa, foi realizado o ataque químico utilizando o reagente Nital 6 % (6 % de ácido nítrico e 94 % de etanol) para revelar a microestrutura.

A análise metalográfica foi realizada em um microscópio óptico da marca Olympus, modelo BX51M, equipado com câmera digital Zeiss, modelo AxioCam ICc5 para aquisição de imagens. Para as análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (*Field Emission Gun MEV/FEG*) foi utilizado um microscópio de alta resolução da fabricante Zeiss, modelo SUPRA 40, equipado com *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS)* XFlash 630M da fabricante Bruker.

As microestruturas dos arames de A a F são apresentadas nas Figs. 3.1 a 3.6, respectivamente. Para todos os materiais, se nota uma microestrutura refinada. Na Figura 3.2 se observa que o aço B apresenta bandas de deformação no formato de “X”. Essas bandas de deformação são decorrentes do processo de deformação na trefilação do arame.

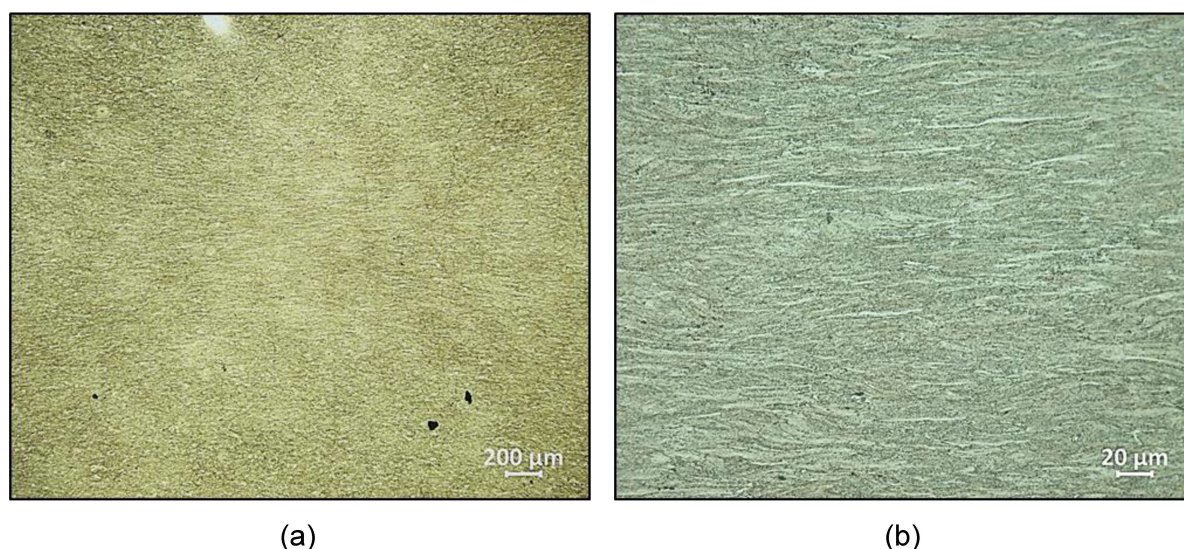


Figura 3.1 – Microscopia óptica do aço A. (a) Vista geral, (b) ampliação. Fonte: Autor (2026).

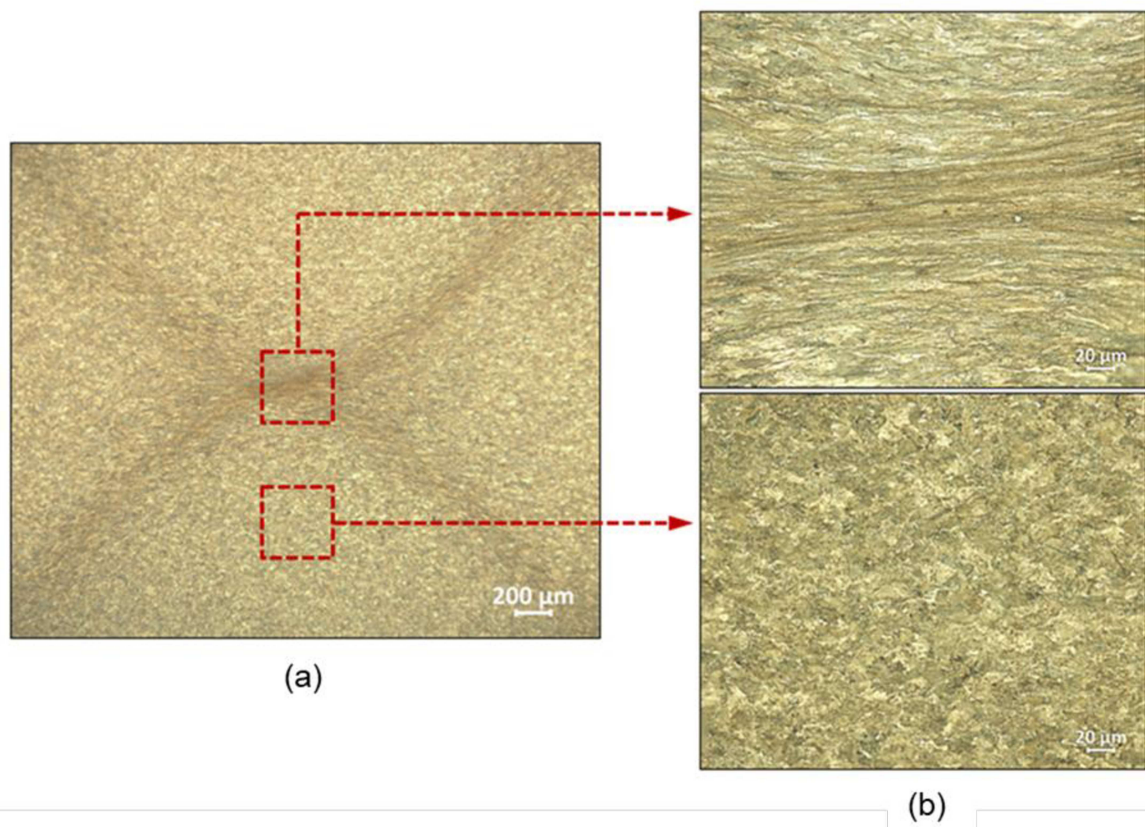


Figura 3.2 – Microscopia ótica aço B. (a) Vista geral, (b) ampliação. Fonte: Autor (2026).

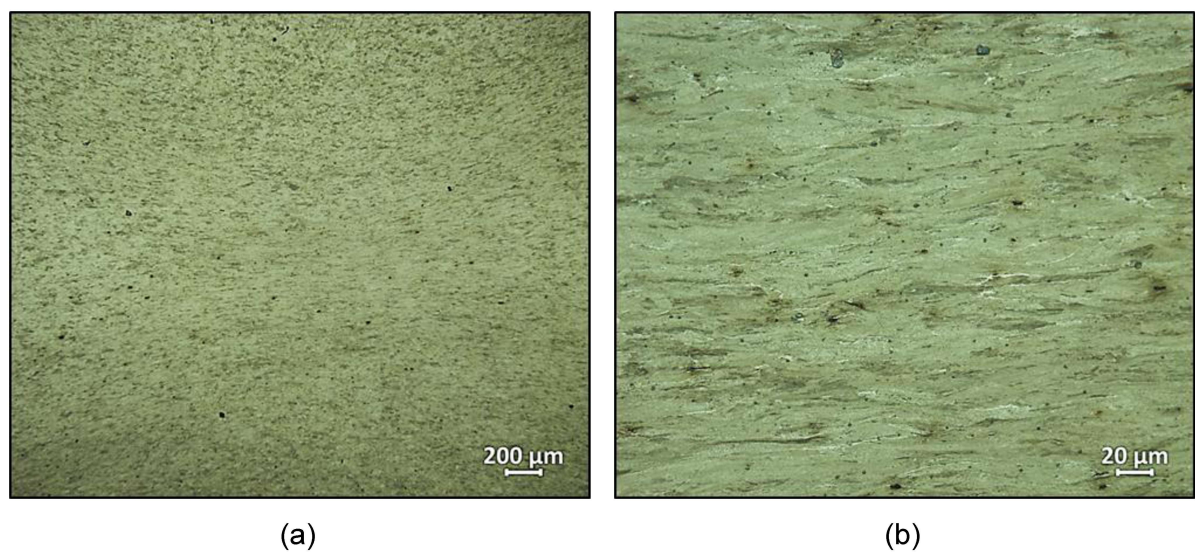


Figura 3.3 – Microscopia ótica aço C. (a) Vista geral, (b) ampliação. Fonte: Autor (2026).

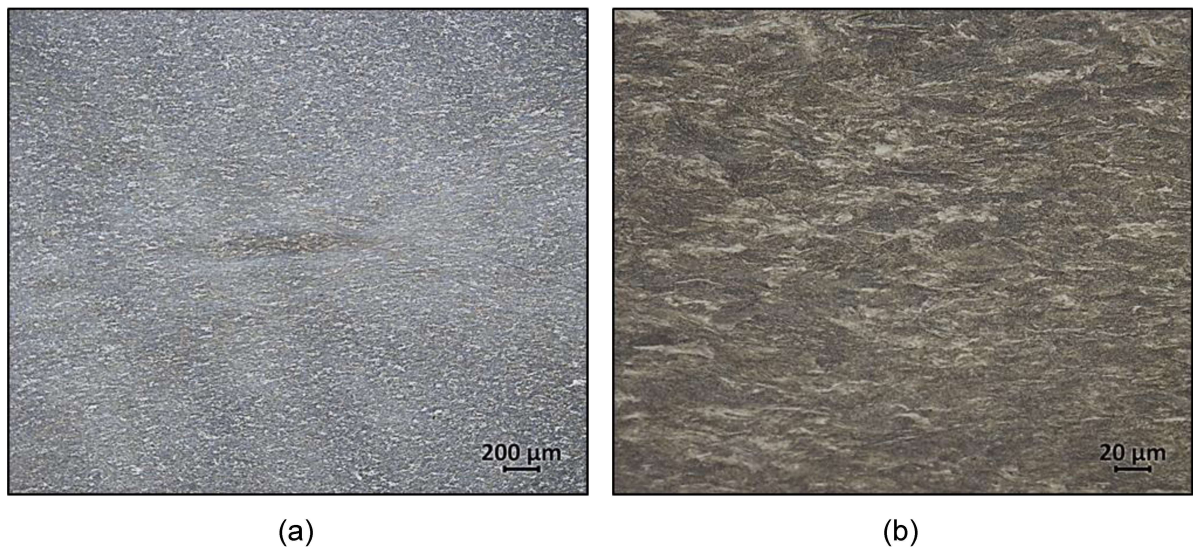


Figura 3.4 – Microscopia ótica aço D. (a) Vista geral, (b) ampliação. Fonte: Autor (2026).

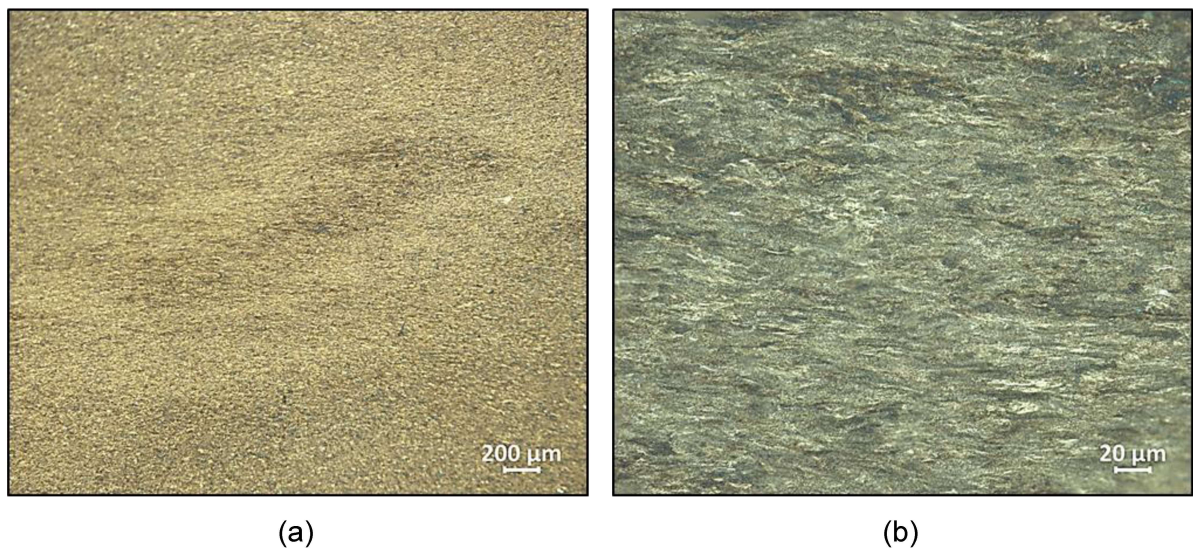


Figura 3.5 – Microscopia ótica aço E. (a) Vista geral, (b) ampliação. Fonte: Autor (2026).

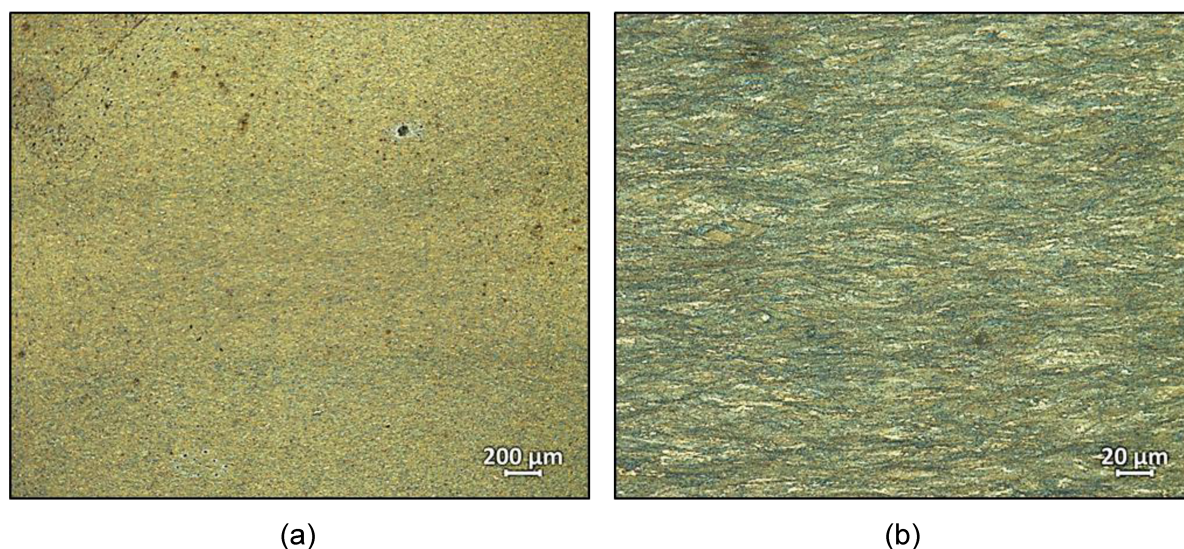
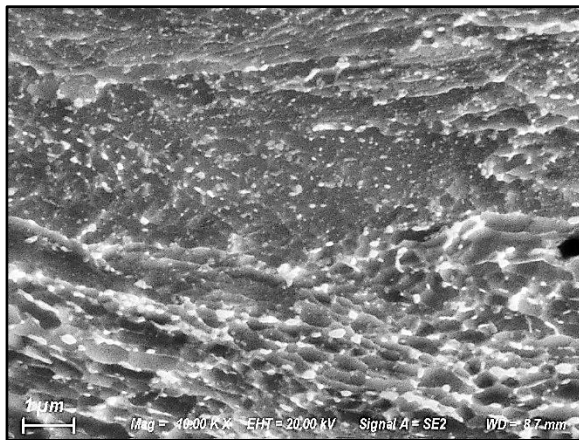


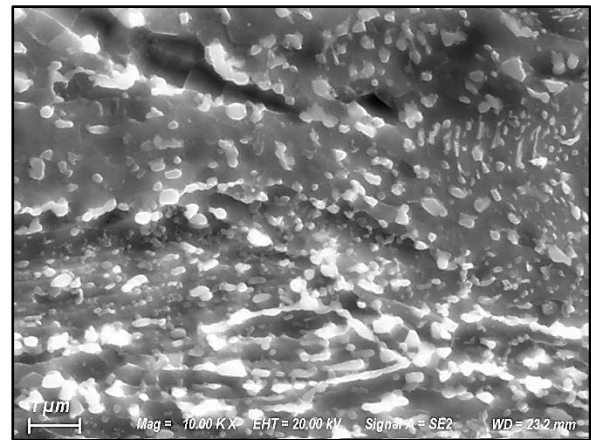
Figura 3.6 – Microscopia ótica aço F. (a) Vista geral, (b) ampliação. Fonte: Autor (2026).

A microestrutura dos aços obtidas por meio do MEV/FEG estão apresentadas na Fig. 3.7. De modo geral, tem-se uma microestrutura refinada de ferrita e cementita. O aço A é hipoeutetóide, com microestrutura de ferrita mais perlita granular. Para os aços C e F se observa a microestrutura de perlita lamelar, para o aço E se observa a presença de perlita lamelar parcialmente transformada em perlita granular e para os aços B e D se observa perlita granular.

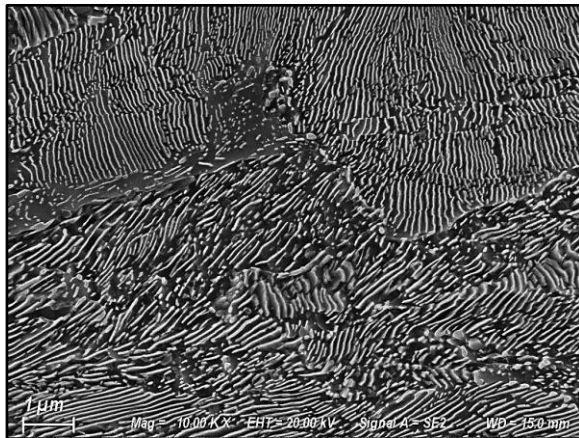
A transformação da perlita lamelar em perlita granular ocorre por mecanismos difusionais durante tratamentos térmicos longos, como o recozimento. As lamelas de cementita são menos estáveis que a cementita esferoidizada. Com o aquecimento e resfriamento lento do material, as lamelas de cementita se fragmentam e coalescem em partículas globulares, pois essa morfologia apresenta menor energia superficial (SUN *et al.*, 2014; CALLISTER, 2016).



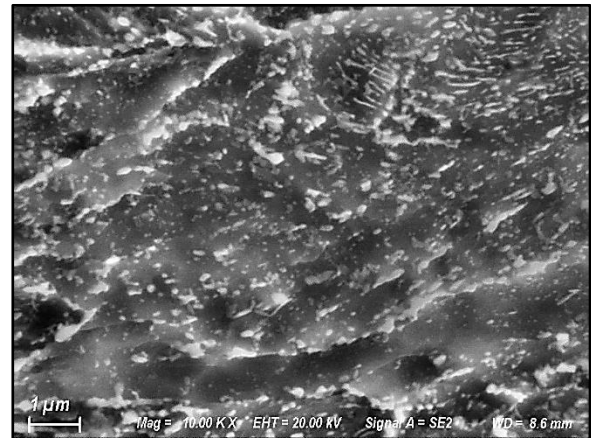
(a)



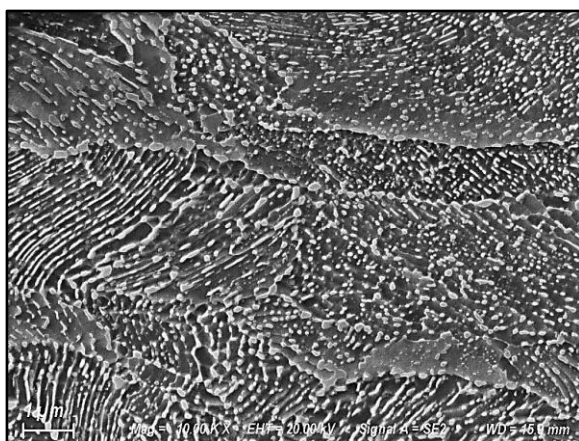
(b)



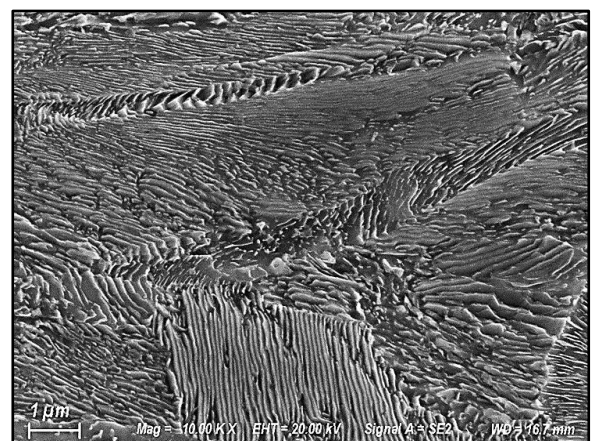
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 3.7 – Microestrutura observada em MEV/FEG dos aços (a) A, (b) B, (c) C, (d) D, (e) E e (f) F. Fonte: Autor (2026)

3.1.3 Propriedades Mecânicas

Para caracterização mecânica dos aços avaliados, foram realizados mapas de dureza, perfis de dureza e ensaio de tração. O mapa de dureza dos materiais foi obtido utilizando o microdurômetro Duramin, modelo 40, da fabricante Struers. O procedimento experimental adotado seguiu as determinações da norma ASTM E92-23 (ASTM, 2023). As medições de dureza foram realizadas na escala Vickers, com aplicação de força de 0,1 kgf e resolução de 0,001 kgf. O espaçamento entre indentações foi de 0,2 mm ao longo da espessura e de 0,4 mm na largura da amostra, mantendo uma distância mínima de 0,1 mm em relação à borda. Os mapas de dureza foram realizados em toda a seção transversal do arame.

A Figura 3.8 apresenta os mapas de dureza dos arames de A a F. Observa-se que os arames A e F apresentam menor dureza no centro e maior nas bordas, enquanto os arames B, C, D e E apresentam dureza maior no centro. Para o arame C que apresenta banda de deformação nítida na microestrutura, nota-se que a dureza é maior nas bandas de deformação.

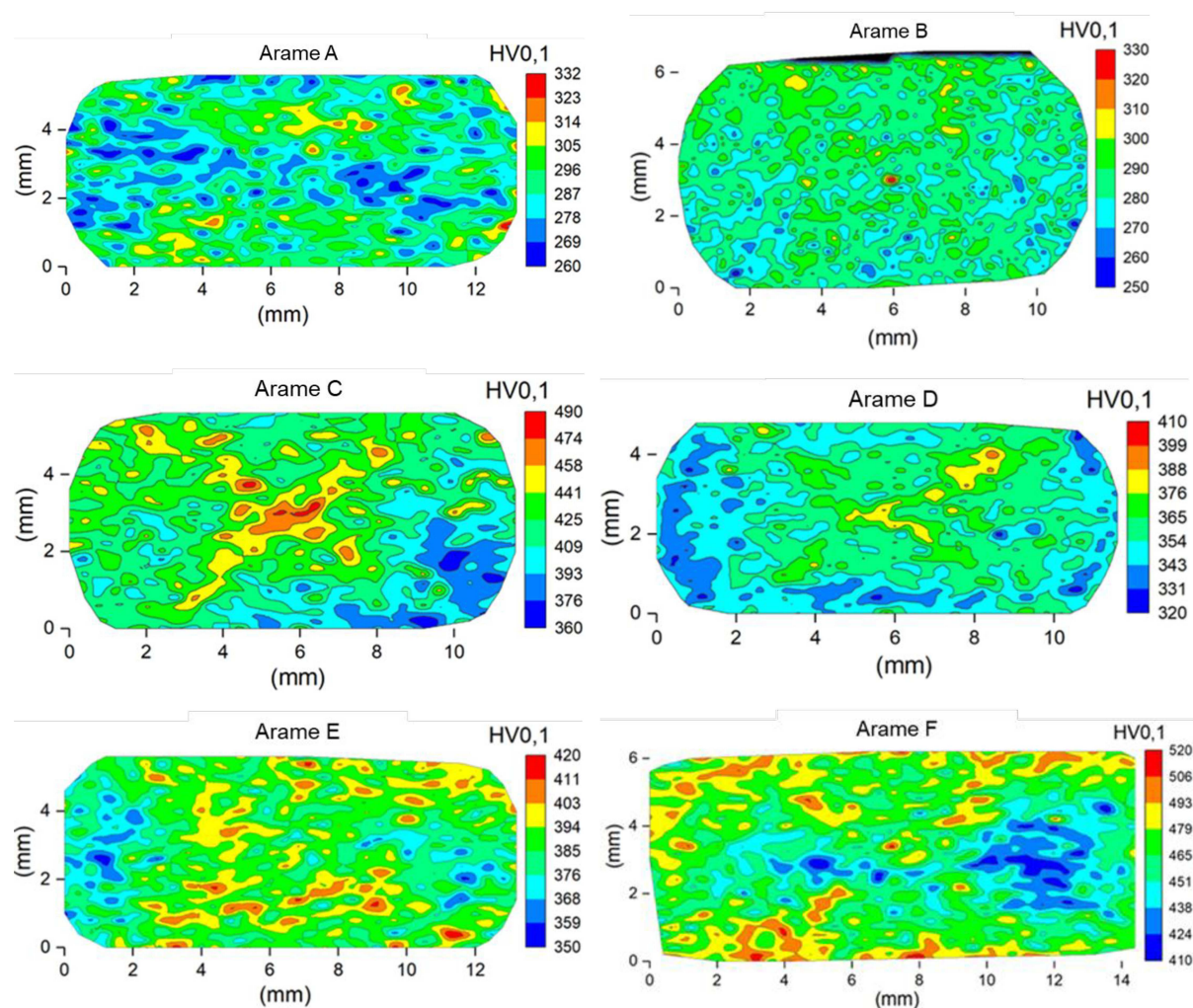


Figura 3.8 – Mapa de microdureza Vickers (HV0,1) dos arames de A a F. Fonte: Autor (2026)

Foram obtidos perfis de dureza Vickers nas direções vertical e horizontal ao longo da espessura da seção transversal das amostras, utilizando-se um durômetro Stiefelmayer-Reicherter, modelo KL-4, com resolução de 1 HV10. As medições foram efetuadas com espaçamento de 0,7 mm entre identações, utilizando força de 5 kgf e tempo de aplicação de 15 s, conforme as determinações da norma ASTM E92 (ASTM, 2023).

As propriedades mecânicas de tração dos aços avaliados foram obtidas conforme determina a norma ASTM E8/E8M (ASTM, 2025). A geometria e as dimensões do CP de ensaio de tração são apresentadas na Figura 3.9. Três ensaios para cada material foram realizados em uma máquina de tração servohidráulica, da fabricante Instron®, modelo 8801. O certificado de calibração da máquina de tração Instron® é apresentado no ANEXO A.

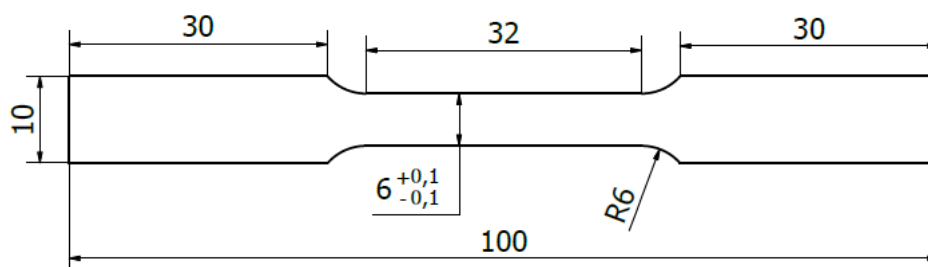


Figura 3.9 – Geometria e dimensões do CP de ensaio de tração (dimensões em mm). Fonte: Adaptado de ASTM E8/E8M (ASTM, 2025).

A Tabela 3.2 apresenta os valores médios das propriedades mecânicas de tração, os valores médios dos perfis de dureza HV10 dos materiais avaliados, bem como o desvio padrão associado para um fator de abrangência de 68,27 %. Quanto à suas propriedades mecânicas, os aços A e B são classificados como aços de alta resistência mecânica, e os aços C, D, E e F são aços de altíssima resistência mecânica.

Tabela 3.2 – Valores médios das propriedades mecânicas dos materiais avaliados. Fonte: Autor (2026).

Material	Límite de Escoamento σ_y (MPa)	Límite de Resistência à Tração σ_{ut} (MPa)	Dureza (HV10)
A	861,5 ± 11,7	911,0 ± 6,3	287 ± 9
B	794,3 ± 1,5	896,6 ± 0,3	272 ± 6
C	1366,6 ± 25,4	1428,0 ± 15,1	411 ± 21
D	1095,0 ± 68,6	1185,7 ± 77,0	348 ± 9
E	1075,0 ± 65,4	1260,4 ± 3,7	373 ± 9
F	1517,3 ± 38,8	1623,8 ± 45,2	445 ± 18

3.2 Endireitamento dos Arames e Fabricação dos Corpos de Prova de Ensaios de Impacto Charpy

3.2.1 Procedimento de Endireitamento dos Arames

Os materiais analisados são arames provenientes da dissecação de dutos flexíveis, que é um processo de desmanche controlado do duto com o objetivo de extrair seus componentes e realizar análises de integridade estrutural. Os arames utilizados nesse trabalho foram

retirados da camada de tração do duto. Na condição como recebido, os arames apresentam comprimento aproximado de 1 m e geometria helicoidal, o que inviabiliza a usinagem dos CPs dentro das tolerâncias impostas pelas normas técnicas relacionadas. A Figura 3.10a mostra os arames na condição como recebido.

Dessa forma, os arames precisam passar por um procedimento de endireitamento para que seja possível usar os CPs. Primeiramente, cada arame com aproximadamente 1 m de comprimento foi cortado em três seções com cerca de 330 mm. Em seguida, as seções foram prensadas com 20 toneladas por 40 minutos, conforme ilustrado na Fig. 3.10b, utilizando uma prensa de 40 toneladas e curso do pistão de 150 mm da fabricante Ribeiro. Após a prensagem, as seções foram deformadas plasticamente em 1 %. A deformação foi aplicada utilizando uma máquina de ensaio universal Instron, modelo 8801, como apresentado na Fig. 3.10c. A deformação plástica de 1 % possui duas funções: contribuir para o endireitamento final dos arames e aliviar as tensões introduzidas durante a etapa de prensagem, reduzindo o efeito de recuperação elástica do material.

A Figura 3.10d mostra como os arames ficaram após o processo de endireitamento. Observa-se que a seção do arame ainda apresenta uma pequena curvatura. Apesar disso, como os arames endireitados são cortados em seções ainda menores, esse raio de curvatura é minimizado e nesta condição é possível fabricar os CPs.



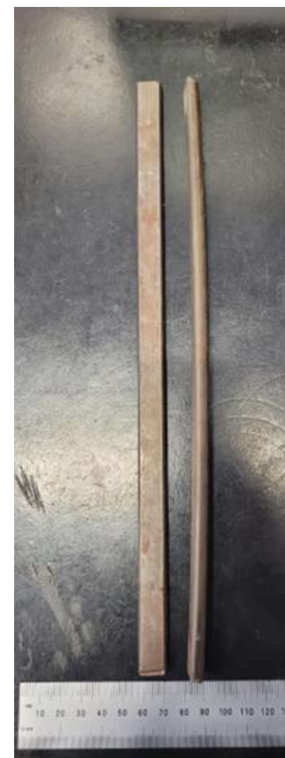
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.10 – (a) Arame na condição como recebido; (b) Procedimento de prensagem dos arames; (c) Deformação plástica de 1 % na Instron. Fonte: Autor (2026).

3.2.2 Fabricação dos Corpos de Prova de Ensaio de Impacto Charpy

Como os arames não possuem dimensão suficiente na seção transversal para a fabricação de CPs convencional (CVN) de dimensões 10 x 10 x 55 mm³, foram fabricados CPs *sub-size* Charpy V-notch (SCVN) com espessura de 5 mm, denominados de *half-size*, pois possuem metade da espessura do CP convencional. As dimensões e tolerâncias dos CPs SCVN seguiram as determinações da pela norma ISO 148-1 (ISO, 2016). A Figura 3.11 apresenta o desenho e a Tab. 3.3 apresenta as dimensões e tolerâncias do CP *half-size*.

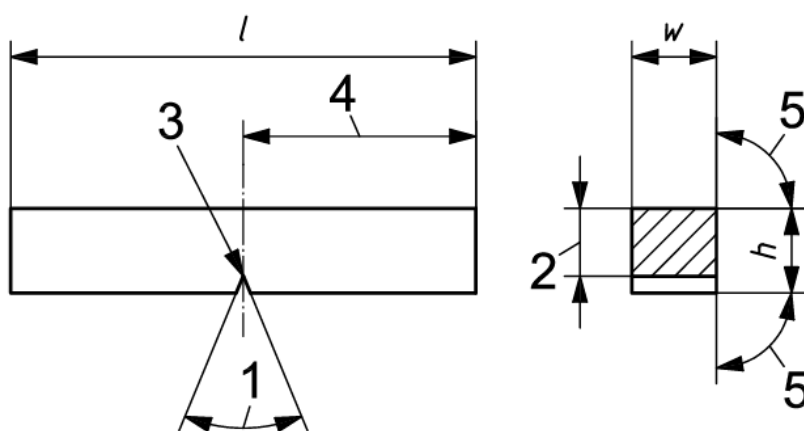


Figura 3.11 – Corpo de prova de impacto CVN. Fonte: (ISO 148-1, 2016).

Tabela 3.3 – Dimensões e tolerâncias do CP Charpy *half-size*. Fonte: (ISO 148-1, 2016).

	Identificação	Unidade	Dimensão Nominal	Tolerância
Comprimento	l	mm	55	± 0,6
Altura	h	mm	10	± 0,075
Espessura	w	mm	5	± 0,050
Ângulo do entalhe	1	°	45	± 1
Ligamento remanescente	2	mm	8	± 0,075
Raio do entalhe	3	mm	0,25	± 0,025
Centralização do entalhe	4	mm	90	± 2
Ângulo entre as faces longitudinais adjacentes	5	°	90	± 2
Rugosidade das superfícies (Ra)	-	µm	5	≤

O procedimento de fabricação dos CPs consistiu em três etapas. Os equipamentos utilizados foram uma máquina de eletroerosão a fio, modelo FW2U da fabricante AgieCharmilles e uma retífica tipo Blanchard modelo RG-280 da fabricante S. A. Yadoya. Primeiramente, trechos de 70 mm são cortados dos arames por eletroerosão a fio. Em seguida, esses trechos são retificados para que atendam a espessura (w) de $5 \pm 0,075$ mm. Por fim, a usinagem do entalhe e corte final dos CPs são realizados na eletroerosão a fio.

A verificação dimensional do comprimento foi realizada com um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm e faixa nominal de 150 mm, da fabricante Digimess. O certificado de calibração do paquímetro se encontra no ANEXO B. A verificação dimensional da espessura e da altura foi feita com um micrômetro externo digital com resolução de 0,001 mm e faixa nominal de 25 mm, da fabricante Mitutoyo. A profundidade, ângulo e raio do entalhe foram medidos utilizando um microscópio da marca Olympus, modelo BX51M, equipado com câmera Carl Zeiss AxioCam ICc5. Para cada mensurando foram realizadas cinco medições à temperatura ambiente de 20 ± 1 °C.

3.3 Ensaios de impacto Charpy

Os ensaios Charpy foram conduzidos conforme as determinações das normas ASTM E23a (ASTM, 2024) e ISO 148-1 (ISO, 2016), em uma máquina de impacto Charpy da fabricante Zwick Roell, modelo HIT450P, com capacidade máxima nominal de 450 J e resolução 0,01 J. O martelo do equipamento possui um cutelo instrumentado com raio de 8 mm e faixa nominal para aquisição de força de 50 kN. O certificado de verificação da máquina é apresentado no ANEXO C.

Os ensaios Charpy foram realizados em uma faixa de temperatura de -196 °C a 200 °C. Para materializar as temperaturas diferente da temperatura ambiente, foram utilizados três meios de condicionamento térmico:

- Banho em nitrogênio líquido
- Banho em álcool
- Banho em óleo aquecido

O banho em nitrogênio líquido foi utilizado para temperaturas de -196 °C a -80 °C, conforme descrito por Pacheco et al. (2024). Os CPs são imersos em nitrogênio líquido por 5 minutos, em seguida são transferidos para o batente do equipamento, onde se aguardou o tempo necessário para que CP atingisse a temperatura desejada. Para definir os intervalos de tempo correspondente para cada temperatura, um CP *sub-size* 5 x 10 x 55 mm³ em aço AISI 4340 foi instrumentado com dois termopares do tipo K, posicionados na superfície e no

centro do CP, próximo à raiz do entalhe. A Figura 3.12 apresenta a evolução térmica do CP para dois ensaios conduzidos à temperatura ambiente de 22 ± 1 °C. Observa-se que a temperatura no centro e na superfície do CP são semelhantes e a repetibilidade é aceitável. O intervalo de tempo adotado para definir a temperatura do ensaio foi determinado com base nos valores médios de temperatura obtidos no centro do CP instrumentado.

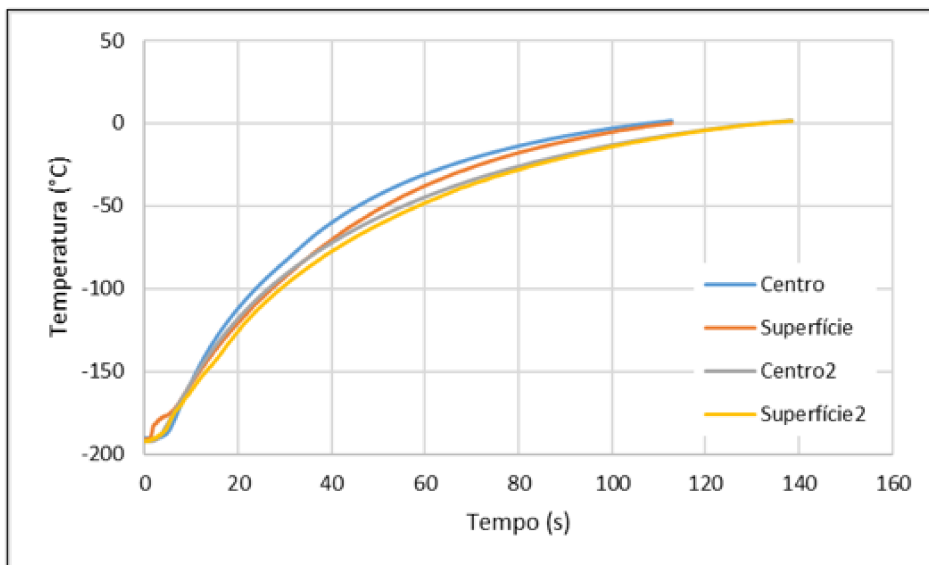


Figura 3.12 – Curva de temperatura em função do tempo após imersão em nitrogênio líquido. Fonte: Autor (2026).

Para temperaturas abaixo da temperatura ambiente e acima de -80 °C foi utilizado banho em álcool. A refrigeração do álcool é conduzida em um banho termostático, modelo DWY-80A, classe 0.5, da fabricante Time Group Inc. O equipamento possui sensor de temperatura integrado com resolução de 0,1 °C. Vale notar que o banho foi calibrado por Pacheco (2024). O certificado de calibração é mostrado no ANEXO D.

Para temperaturas acima da temperatura ambiente e até 200 °C, utilizou-se óleo vegetal aquecido em uma chapa de aquecimento de 1600 W, modelo SP-167, da fabricante SP-Labor. A chapa possui agitador magnético para homogeneização da temperatura do óleo. A temperatura é monitorada com um sensor de temperatura modelo TM-210, com faixa nominal de -200 °C a 1760 °C e resolução de 0,1 °C.

Para todos os meios de condicionamento, a pinça de posicionamento do CP também foi condicionada. Além disso, os CPs foram retirados do meio de condicionamento, posicionados no batente de ensaio e ensaiados dentro do tempo máximo de 5 segundos, como determina a norma ASTM E23a (ASTM, 2024).

3.3.1 Determinação da curva de transição dúctil-frágil

A seguir é apresentado o procedimento metodológico adotado para determinar a curva de transição dúctil-frágil. Para esse fim, se recomenda a realização de aproximadamente 20 ensaios de impacto Charpy, de modo a assegurar representatividade estatística dos resultados. Inicialmente, três CPs foram ensaiados à temperatura ambiente (24 ± 2 °C), com o objetivo de obter uma estimativa preliminar do comportamento do material e da fração de fratura dúctil (SFA), avaliada por meio da análise visual da superfície de fratura.

Com base nos valores de SFA obtidos visualmente nos ensaios à temperatura ambiente, foram selecionados ensaios em temperaturas distintas, com o objetivo de identificar a faixa aproximada de transição dúctil-frágil e orientar a distribuição das temperaturas e ensaios subsequentes. A escolha dessas temperaturas preliminares segue os critérios descritos a seguir:

a) $SFA < 20$ %:

Esse resultado indica comportamento predominantemente frágil à temperatura ambiente, e a DBTT se encontra acima de 24 °C. Assim, deve-se realizar ensaios nas temperaturas: -40 °C para verificar se o CP fraturado apresenta $SFA < 5$ % ou confirmar o patamar inferior; 85 °C e 120 °C a fim de verificar se a DBTT está entre 25 °C e 85 °C ou 85 °C e 120 °C ou acima de 120 °C.

b) $20\% < SFA < 80$ %:

Esse resultado indica que o material está na região de transição dúctil-frágil. Assim, é indicado realizar ensaios a -20 °C, 0 °C, 50 °C e 85 °C. Dessa forma, determina se a DBTT está entre 0 °C e 24 °C ou se está entre 24 °C e 50 °C. Também é verificado se a -20 °C o material está no patamar inferior e se a 85 °C está no patamar superior.

c) $SFA > 80$ %:

Esse resultado indica comportamento predominantemente dúctil à temperatura ambiente, e a DBTT está abaixo de 24 °C. Assim, recomenda-se realizar ensaios a 85 °C para confirmar o patamar superior, a -40 °C e a -80 °C para verificar se a DBTT está entre 24 °C e -40 °C, entre -40 °C e -80 °C ou abaixo de -80 °C.

A partir dos resultados obtidos nas temperaturas preliminares, se identifica a faixa de temperatura em que ocorreu a maior variação de KV e SFA. Esta é a faixa de temperatura mais provável que a DBTT esteja. Dessa forma, se prossegue subdividindo essa faixa de temperatura na metade e se realiza um novo ensaio. De forma progressiva, se reavalia os resultados obtidos e a faixa de temperatura mais provável para a DBTT é subdividida até que

se tenha confiança de que a DBTT está dentro de uma faixa de temperatura menor do que 20 °C. Além disso, foi considerada a dispersão dos valores de KV e SFA obtidos em cada temperatura, realizando repetições quando os valores destes mensurandos não seguirem a tendência dominante (formato sigmoidal da curva).

Em seguida, foram avaliadas a SFA e KV dos ensaios realizados nas maiores e menores temperaturas. Caso a SFA do ensaio na maior temperatura seja 100 % dúctil, se realizam mais dois ensaios até uma temperatura máxima de +85 °C em relação a primeira temperatura para a qual se obteve SFA de 100 %. Caso ainda não se tenha um ensaio com SFA superior a 95 %, se realizam ensaios em temperaturas maiores adicionando +40 °C à máxima temperatura ensaiada e reavaliando progressivamente até se obter um ensaio com SFA > 95 %. De forma análoga, foram realizados no mínimo três ensaios no patamar inferior (SFA < 5 %).

Por fim, a CTDF é ajustada utilizando o modelo matemático da TH e mais três ensaios foram realizados na DBTT calculada pelo modelo, de modo a confirmar a DBTT através da análise de SFA e caracterizar a dispersão dos resultados na transição.

A Figura 3.13 apresenta o diagrama de blocos da metodologia adotada para determinar a curva de transição dúctil frágil. O diagrama de blocos auxilia na definição da temperatura de pelo menos 13 ensaios Charpy. Para definir a temperatura dos sete ensaios restantes, os resultados obtidos nos 13 ensaios realizados para o material em questão, considerando o formato sigmoidal da CTDF, bem como a experiência do operador devem ser utilizados.

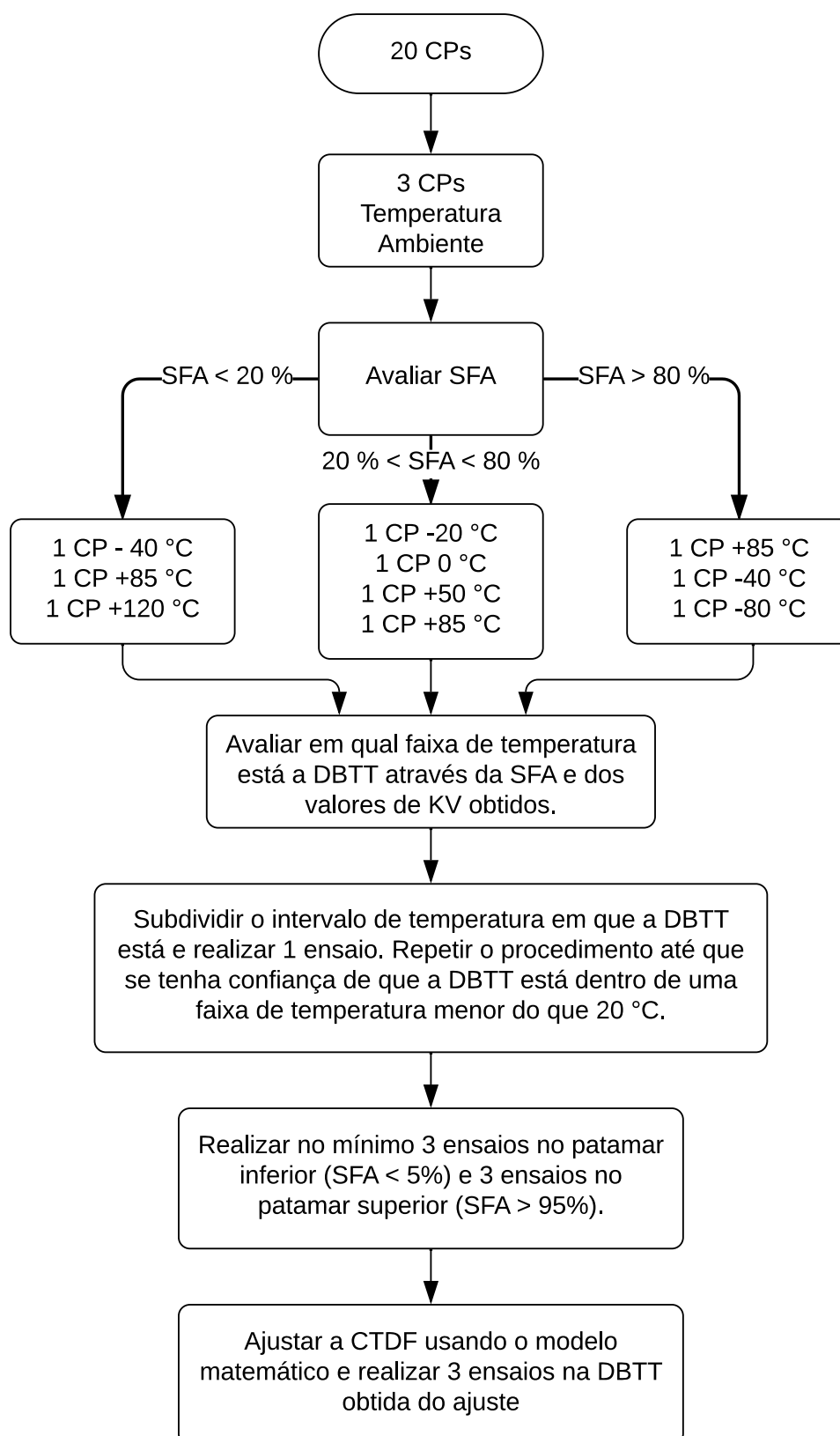


Figura 3.13 – Diagrama de blocos para determinar a curva de transição dúctil-frágil. Fonte: Autor (2026).

A Tabela 3.4 apresenta o número de ensaios Charpy realizado para cada material. Observa-se que o material D possui apenas 19 ensaios dos 20 previstos. No entanto, a execução de um ensaio a menos não compromete a qualidade nem a representatividade dos resultados obtidos.

Tabela 3.4 – Número de ensaios Charpy para cada material. Fonte: Autor (2026).

Material	Número de ensaios Charpy
A	21
B	20
C	22
D	19
E	22
F	20

As imagens da superfície de fratura dos CPs foram adquiridas utilizando um estereomicroscópio modelo OPZTS, da fabricante Opticam®.

3.4 Ajuste da curva de transição dúctil-frágil

No presente trabalho, o ajuste da curva de transição dúctil-frágil foi realizado apenas para a variável de energia absorvida (KV) em função da temperatura (T). Não foram construídas curvas de transição utilizando a SFA e a expansão lateral como variável de saída. O uso de KV como variável independente justifica-se por ser o principal resultado do ensaio Charpy e é o mais utilizado na indústria como especificação técnica e controle de qualidade. Ainda, este mensurando é medido de forma mais confiável.

Para a modelagem da CTDF, foi escolhido o modelo matemático da TH. Esse modelo é o mais utilizado na literatura por apresentar uma formulação matemática relativamente simples e conseguir representar de forma adequada o comportamento sigmoidal das curvas de transição.

O modelo da TH é intrinsecamente não linear. Dessa forma, o ajuste dos parâmetros do modelo não pode ser realizado por métodos de regressão linear convencionais. Assim, os parâmetros do modelo foram calculados por meio do método dos mínimos quadrados não linear (MMQN), o qual minimiza a soma dos quadrados dos resíduos entre os valores experimentais de KV e os valores previstos pelo modelo.

No ajuste dos parâmetros por otimização, foram aplicadas restrições para garantir a coerência física dos resultados, uma vez que um resultado de KV_{LS} menor do que zero não possui significado físico. As restrições são:

- O KV_{LS} deve ser maior ou igual a zero
- O KV_{US} deve ser menor ou igual ao maior valor de KV obtido.

Na análise dos resultados são apresentados os parâmetros de DBTT, KV_{US} , KV_{LS} , KV_{DBTT} , C e RMSE

O RMSE é amplamente utilizado para avaliar a aderência de modelos aos dados experimentais, e quanto menor o RMSE melhor é a aderência. No entanto, não existe um valor mínimo de RMSE que permita classificar se o modelo fornece um bom ajuste aos dados experimentais (LUCON et al., 2021). No presente trabalho, além do RMSE, a qualidade do ajuste foi avaliada por meio do RMSE normalizado pelo valor de KV_{DBTT} , conforme a Eq. (3.1), denominado de NRMSE. A escolha de KV_{DBTT} se justifica por ser a média dos patamares superior e inferior, de modo a ponderar os dois extremos da CTDF. Embora a normalização também não permita estabelecer um critério absoluto para definir um bom ajuste, o uso do NRMSE permite uma avaliação relativa da qualidade do ajuste, facilitando a comparação entre diferentes materiais.

$$NRMSE (\%) = \frac{RMSE}{KV_{DBTT}} \cdot 100 \quad (3.1)$$

3.5 Avaliação da Incerteza da Curva de Transição Dúctil-Frágil

A incerteza da CTDF foi avaliada utilizando os métodos GUM, MC e *bootstrap*. As metodologias correspondentes a cada uma dessas abordagens são apresentadas nos tópicos a seguir.

3.5.1 Método GUM

A avaliação da incerteza associada à CTDF foi realizada de acordo com o GUM, considerando que o mensurando é a função matemática do modelo da TH e os parâmetros de ajustes são as variáveis de influência do mensurando. Para aplicação do método, as seguintes hipóteses foram consideradas: os erros experimentais são aleatórios e aproximadamente homoscedásticos e as variáveis de influência do modelo são

correlacionadas. O teste de Levene, na forma de Brown-Forsythe, foi aplicado aos resíduos do ajuste para avaliar a hipótese de homoscedasticidade, verificando a igualdade das variâncias entre as regiões de LS, US e transição. Para tanto, foi considerado um nível de significância de 5 % para a hipótese nula. Os resultados do teste são apresentados por meio da estatística F, dos graus de liberdade do numerador (GL1) e do denominador (GL2), e do respectivo valor de p.

O procedimento para cálculo da incerteza é como segue: Inicialmente, os parâmetros de ajuste ($\hat{\theta}$) para os dados experimentais de KV e T são determinados pelo MMQN, conforme o item 3.4. Em seguida, a variância (σ^2) dos resíduos (r_i) da CTDF foi calculada considerando o número de ensaios (n) e o número de parâmetros do modelo (p), conforme a Eq. (3.2)

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-p} \sum_{i=1}^n r_i^2 \quad (3.2)$$

Em seguida, foi determinada a matriz Jacobiana do modelo em relação aos parâmetros otimizados, conforme a Eq. (3.3).

$$J_{i,j} = \left. \frac{\partial f(T_i, \theta)}{\partial \theta_j} \right|_{\theta=\hat{\theta}} \quad (3.3)$$

Na Equação (3.3), $\frac{\partial f(T_i, \theta)}{\partial \theta_j}$ é a derivada parcial do mensurando em relação ao vetor de parâmetros de ajuste $\theta_j = [DBTT, LS, US, C]$.

Utilizando a matriz Jacobiana, a matriz de covariância dos parâmetros de ajuste (C_θ) foi estimada como expresso na Eq. (3.4).

$$C_\theta = \sigma^2 \cdot (J^T J)^{-1} \quad (3.4)$$

Na Equação (3.4), o termo $(J^T J)^{-1}$ é a influência da sensibilidade do modelo de ajuste na determinação dos parâmetros, enquanto o termo σ^2 é a dispersão dos resíduos dos dados experimentais.

Por fim, a variância combinada da CTDF é avaliada por propagação das incertezas dos parâmetros. Para cada temperatura de interesse, o gradiente do modelo HT é avaliado e a variância combinada da CTDF é determinada conforme a Eq. (3.5)

$$u^2(f(T_i)) = \nabla f(T_i, \hat{\theta})^T \cdot C_{\theta} \cdot \nabla f(T_i, \hat{\theta}) \quad (3.5)$$

A incerteza-padrão combinada do mensurando em questão é determinada como a raiz quadrada da variância combinada, como mostra a Eq. (3.6).

$$u(f(T_i)) = \sqrt{\nabla f(T_i, \hat{\theta})^T \cdot C_{\theta} \cdot \nabla f(T_i, \hat{\theta})} \quad (3.6)$$

3.5.2 Método de MC

Para a avaliação da incerteza da CTDF utilizando o método MC a distribuição de probabilidade do mensurando é obtida diretamente a partir da simulação das variáveis de influência, sem realizar aproximações lineares do modelo. As hipóteses adotadas no método GUM também foram mantidas para o método de MC, e o procedimento de análise é como segue. A distribuição de probabilidade dos parâmetros de ajuste foi definida conforme a Eq. (3.7).

$$\theta^m \sim \mathcal{N}(\hat{\theta}, C_{\theta}), \quad m = 1, \dots, M \quad (3.7)$$

Na Equação (3.7), θ^m é o vetor de parâmetros simulados, $\mathcal{N}(\hat{\theta}, C_{\theta})$ é a distribuição normal multivariada, com vetor média igual ao vetor de parâmetros estimados e a matriz de covariância (C_{θ}), determinada conforme a Eq. (3.4), descreve a variabilidade de cada parâmetro e as correlações entre eles. O número de simulações M adotado foi de 1 000 000. Os valores aleatórios para o vetor de parâmetros foram gerados utilizando a função *multivariate_normal()* do gerador *default_rng()* da biblioteca NumPy.

Para cada vetor de parâmetros simulados θ^m , o modelo da TH foi avaliado em toda extensão da CTDF, isto é, no intervalo de -200 °C até a máxima temperatura de ensaio. Assim, para cada T_i , tem-se uma amostra da distribuição $f(T_i)$, calculada pela Eq. (3.8).

$$f^m(T_i) = f(T_i, \theta^m) \quad (3.8)$$

A incerteza-padrão associada à CTDF em cada temperatura é estimada como o desvio-padrão amostral dos M valores simulados, conforme a Eq. (3.9).

$$u(f(T_i)) = \sqrt{\frac{1}{M-1} \cdot \sum_{m=1}^M [f^m(T_i) - \bar{f}(T_i)]^2} \quad (3.9)$$

Na Equação (3.9), $\bar{f}(T_i)$ é a média das simulações de avaliação do mensurando para cada temperatura.

Uma vez obtidos os valores simulados do mensurando, o histograma dos valores obtidos foi construído para verificar se os valores simulados estão normalmente distribuídos. A normalidade foi verificada, também por meio do coeficiente de assimetria e da curtose. Considerando uma distribuição normal ideal, os valores do coeficiente de assimetria e da curtose assumem 0 e 3, respectivamente. Adicionalmente neste trabalho o teste de Kolmogorov-Smirnov (KS) foi utilizado para verificar a normalidade. Para tanto foram utilizadas as rotinas *skew*, *kurtosis* e *kstest* da biblioteca SciPy para Python (VIRTANEN et al., 2020).

Se a normalidade dos valores simulados for confirmada, então, a incerteza-padrão combinada associada ao mensurando é calculada como o desvio padrão populacional dos valores simulados. Por sua vez, a incerteza expandida, com nível de abrangência de 95,45 % é obtida ao multiplicar a incerteza-padrão combinada pelo fator de abrangência $k=2,00$.

3.5.3 Método *Bootstrap*

A avaliação da incerteza da CTDF pelo método *bootstrap* seguiu as mesmas hipóteses assumidas nos métodos GUM e MC. Para tanto, a CTDF é ajustada aos dados experimentais pelo modelo HT, e as estimativas dos parâmetros e a variância dos resíduos associado são determinados. Em seguida, são gerados 10 000 conjuntos de dados simulados com n amostras, em que n é o número de dados experimentais para cada material, usando um gerador de números aleatórios com distribuição normal, média zero e variância global dos resíduos do ajuste, conforme as Eq. (3.10) e (3.11). Os números aleatórios foram gerados utilizando a função *normal()* do gerador *default_rng()* da biblioteca NumPy. Além disso, foi aplicado uma restrição física ao modelo, de modo que os valores simulados negativos foram definidos como igual a $+10^{-10}$ (zero computacional positivo).

$$KV^B(T_i) = KV(T_i) + \epsilon_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (3.10)$$

$$\epsilon_i \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2) \quad (3.11)$$

Para cada conjunto de dados simulados é realizado o ajuste do modelo da TH e as CTDF e os valores dos parâmetros são armazenados. A incerteza da CTDF é estimada como sendo o desvio-padrão dos valores ajustados para cada temperatura, e a incerteza dos parâmetros é estimada como sendo o desvio-padrão populacional dessa distribuição.

3.5.4 Incerteza-padrão combinada e incerteza expandida

A incerteza-padrão combinada foi calculada considerando a incerteza do ajuste do modelo HT, a incerteza de calibração da máquina de Impacto Charpy e a incerteza da resolução desta, como mostrado na Eq. (3.12).

$$u_c(CTDF) = \sqrt{u_{(ajuste)}^2 + u_{(calibração)}^2 + u_{(resolução)}^2} \quad (3.12)$$

Os resultados de incerteza expandida são apresentados para um fator de abrangência k igual a 2,00 e 95,45 % de probabilidade de abrangência.

3.5.5 Validação

A validação da avaliação da incerteza para toda a CTDF foi efetuada comparando os valores de incerteza expandida obtidos e aqueles decorrentes da aplicação do método GUM e das determinações da ISO 148-1 (ISO, 2016). Para tanto, para cada material, foram realizados seis ensaios em temperaturas específicas, e que não foram utilizados na determinação da CTDF, configurando um segundo conjunto de dados experimentais. A Tabela 3.5 apresenta a matriz de ensaios de validação da metodologia.

Tabela 3.5 – Temperaturas dos ensaios de validação da metodologia. Fonte: Autor (2026).

Material	Temperatura (°C)			
	-40	-20	0	DBTT
A	X	X		
B	X	X		
C		X	X	
D		X	X	X
E		X	X	
F		X	X	

Desta forma a incerteza padrão de KV para uma dada temperatura (KV_T) foi determinada pela Eq. (3.13). Nesta equação, s é o desvio padrão amostral dos valores de energia

absorvida, n é o número de ensaios realizados para a temperatura em questão, R é a resolução da máquina de impacto Charpy, $U(\text{Cal})$ e $k(\text{Cal})$ são a incerteza expandida da calibração da máquina de impacto Charpy e k é o fator de abrangência correspondente.

$$u(KV_T) = \sqrt{\left(\frac{s}{\sqrt{n}}\right)^2 + \left(\frac{R}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{U(\text{Cal})}{k(\text{Cal})}\right)^2} \quad (3.13)$$

3.5.6 Desempenho computacional dos métodos

A avaliação da performance computacional dos três métodos foi realizada a partir da medição do tempo de execução de cada algoritmo. Para esse fim, foi utilizada a função *perf_counter()* da biblioteca *time* da linguagem *Python*, que fornece uma medida de alta resolução do tempo decorrido. O tempo de execução foi determinado a partir da diferença entre o instante inicial, registrado por $t_0 = \text{time.perf_counter}()$, e o instante final, calculado como $t = \text{time.perf_counter}() - t_0$. As simulações foram executadas em um computador com um processador 13th Gen Intel® Core™ i7-13700T e 16 GB de memória RAM.

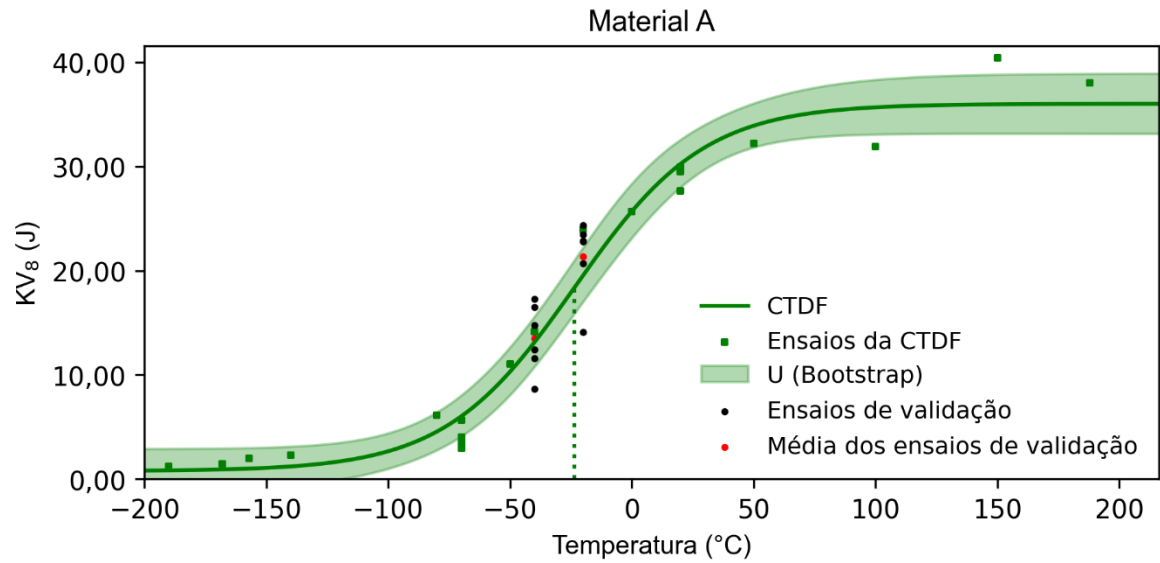
CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos, bem como as análises e discussões decorrentes. Inicialmente, são apresentados os resultados dos ensaios SCVN, a CTDF ajustada pelo modelo da TH, a faixa de incerteza expandida calculada pelo método *bootstrap*, os parâmetros do ajuste, bem como os resultados dos ensaios realizados em temperaturas discretas para a validação do método proposto. Em seguida, são apresentados os resultados da avaliação da homoscedasticidade dos resíduos e da análise de normalidade dos resultados do mensurando para os métodos MC e *bootstrap*. Também é apresentado a comparação entre os métodos avaliados e o desempenho computacional dos métodos. Por fim, são apresentados os resultados da validação da metodologia proposta para avaliação da incerteza da CTDF.

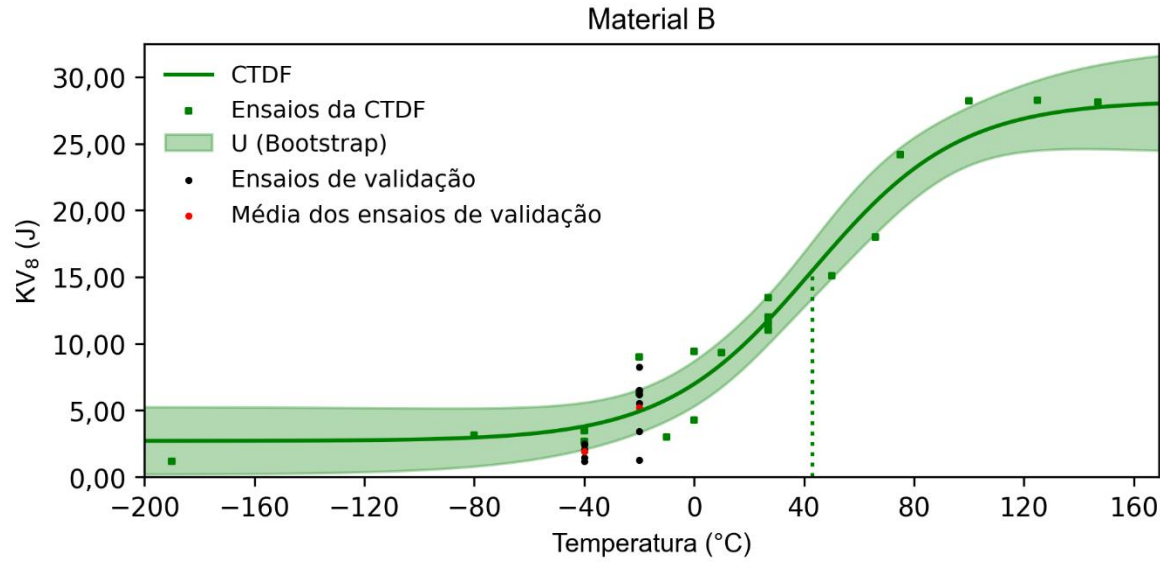
4.1 Resultados dos Ensaios SCVN, CTDF e Incerteza Associada.

As Figuras 4.1 a 4.6 apresentam os resultados dos ensaios (marcadores em verde), as curvas de transição dúctil-frágil de todos os materiais avaliados com a faixa de incerteza expandida (U) da CTDF destacada em cor verde, obtidas via método *bootstrap*. Nessas figuras são declarados os valores de DBTT, KV_{DBTT} , KV_{LS} e KV_{US} com a incerteza expandida associada a cada parâmetro, para 95,45 % de probabilidade de abrangência, obtidos via método *bootstrap*. Também é declarado o RMSE do ajuste. Para evitar a apresentação das curvas em duplicata, nestas figuras são apresentados também os resultados dos ensaios realizados para a validação (marcadores pretos). O marcador vermelho representa o valor médio dos ensaios de validação para cada temperatura de interesse. Para complementação das análises, na Figura 4.7 são apresentadas as fractografias de CPs que foram ensaiados em temperatura ambiente de todos os materiais avaliados.



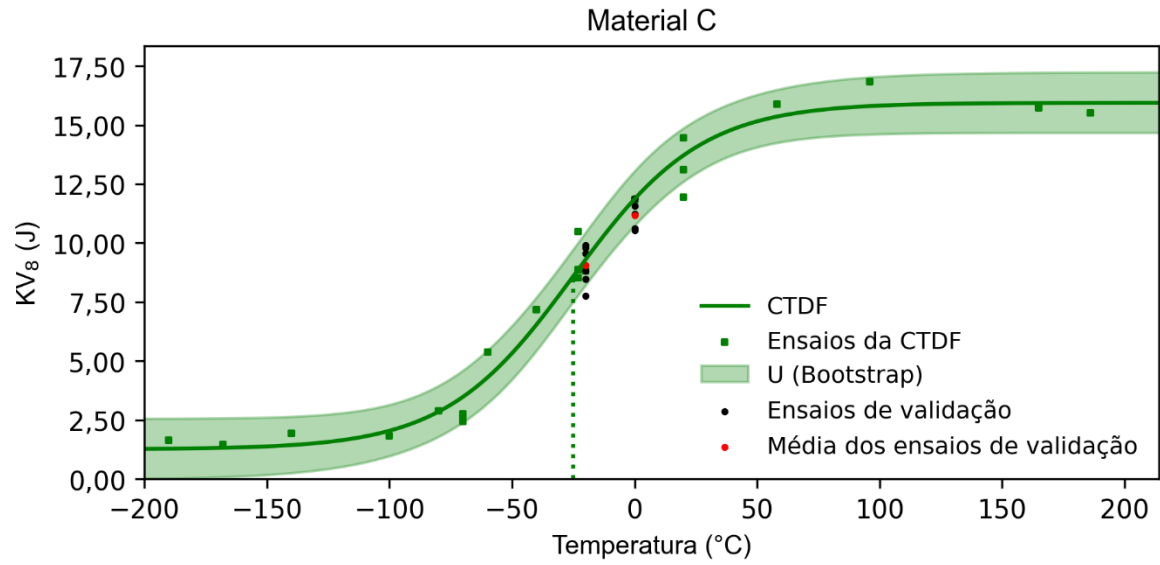
DBTT ($^{\circ}C$)	KV_{DBTT} (J)	KV_{LS} (J)	KV_{US} (J)	C ($^{\circ}C$)	RMSE (J)
$-23,5 \pm 9,6$	$18,39 \pm 1,54$	$0,77 \pm 1,85$	$36,02 \pm 2,75$	$53,4 \pm 14,2$	2,18

Figura 4.1 – Resultados dos ensaios SCVN, CTDF, incerteza associada à CTDF, parâmetros do ajuste e resultados dos ensaios de validação para o Material A. Fonte: Autor (2026).



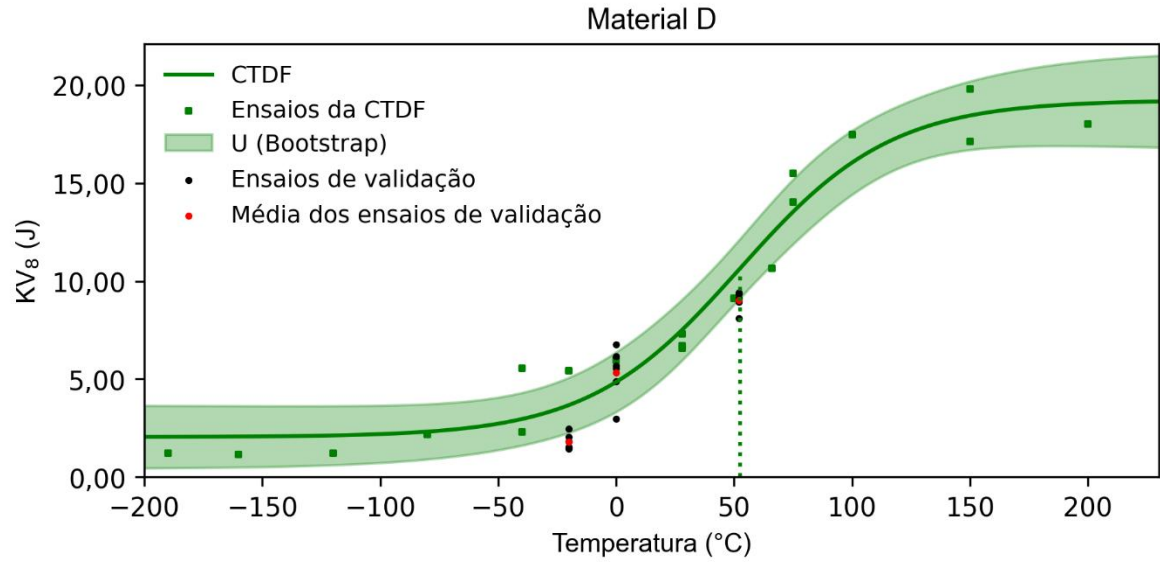
DBTT ($^{\circ}C$)	KV_{DBTT} (J)	KV_{LS} (J)	KV_{US} (J)	C ($^{\circ}C$)	RMSE (J)
$43,0 \pm 13,8$	$15,47 \pm 1,99$	$2,70 \pm 2,42$	$28,24 \pm 4,13$	$53,5 \pm 24,2$	1,88

Figura 4.2 – Resultados dos ensaios SCVN, CTDF, incerteza associada à CTDF, parâmetros do ajuste e resultados dos ensaios de validação para o Material B. Fonte: Autor (2026).



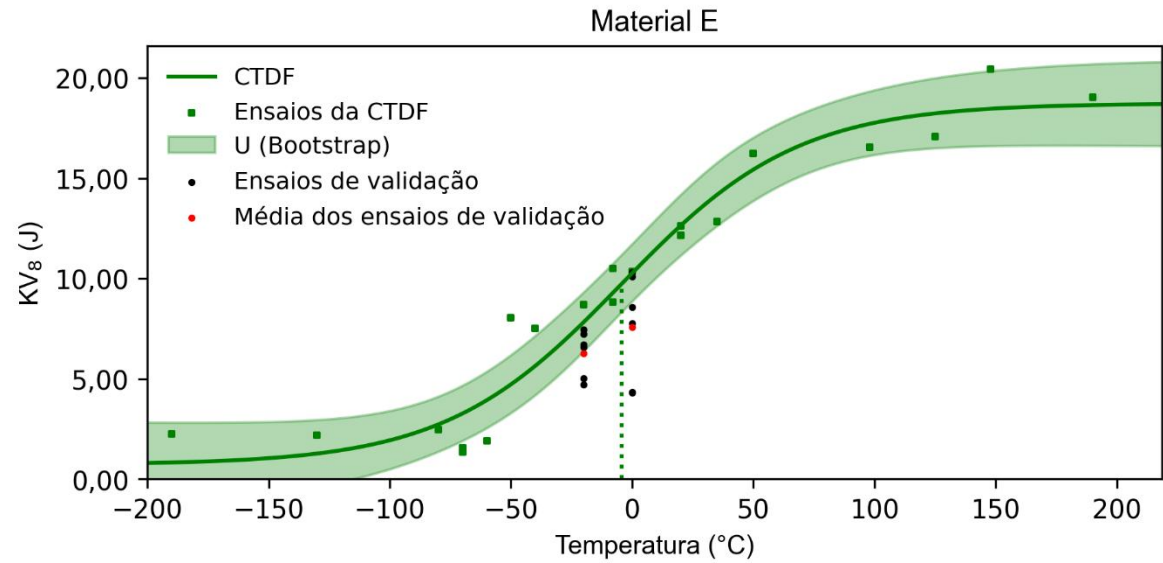
DBTT ($^{\circ}\text{C}$)	KV_{DBTT} (J)	KV_{LS} (J)	KV_{US} (J)	C ($^{\circ}\text{C}$)	RMSE (J)
$-24,9 \pm 7,1$	$8,60 \pm 0,58$	$1,26 \pm 0,91$	$15,95 \pm 0,92$	$52,2 \pm 12,7$	0,77

Figura 4.3 – Resultados dos ensaios SCVN, CTDF, incerteza associada à CTDF, parâmetros do ajuste e resultados dos ensaios de validação para o Material C. Fonte: Autor (2026).



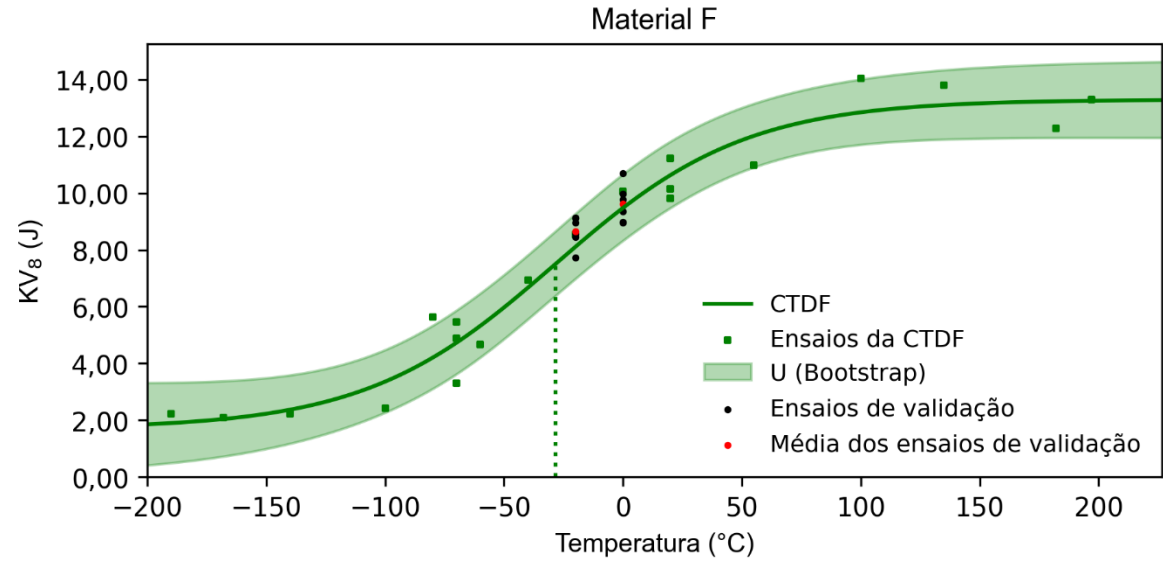
DBTT ($^{\circ}\text{C}$)	KV_{DBTT} (J)	KV_{LS} (J)	KV_{US} (J)	C ($^{\circ}\text{C}$)	RMSE (J)
$52,5 \pm 14,9$	$10,64 \pm 1,21$	$2,04 \pm 1,37$	$19,24 \pm 2,39$	$64,2 \pm 28,2$	1,27

Figura 4.4 – Resultados dos ensaios SCVN, CTDF, incerteza associada à CTDF, parâmetros do ajuste e resultados dos ensaios de validação para o Material D. Fonte: Autor (2026).



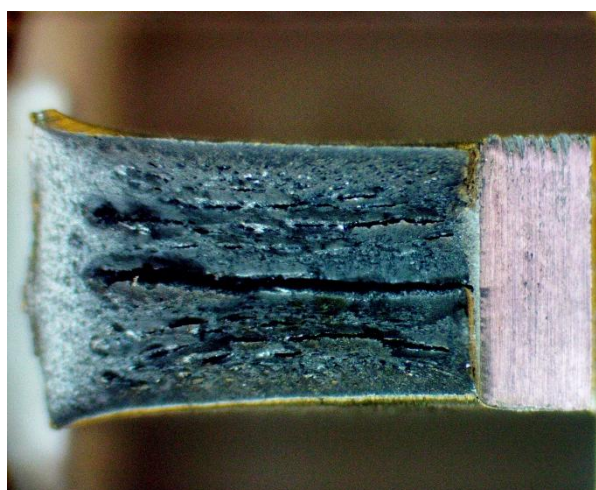
DBTT ($^{\circ}\text{C}$)	KV_{DBTT} (J)	KV_{LS} (J)	KV_{US} (J)	C ($^{\circ}\text{C}$)	RMSE (J)
$-4,4 \pm 14,9$	$9,72 \pm 1,19$	$0,71 \pm 1,96$	$18,73 \pm 2,00$	$72,8 \pm 29,3$	1,42

Figura 4.5 – Resultados dos ensaios SCVN, CTDF, incerteza associada à CTDF, parâmetros do ajuste e resultados dos ensaios de validação para o Material E. Fonte: Autor (2026).

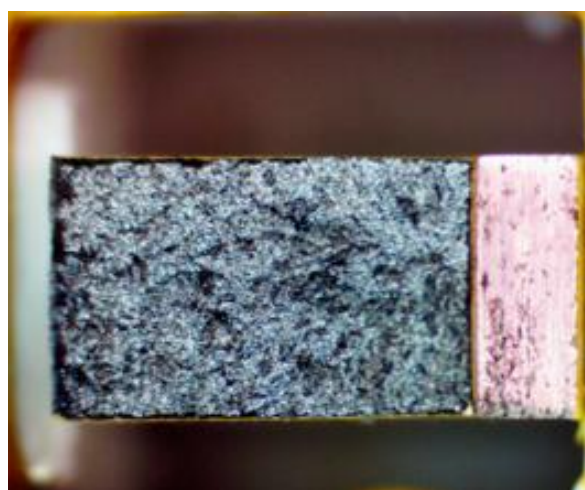


DBTT ($^{\circ}\text{C}$)	KV_{DBTT} (J)	KV_{LS} (J)	KV_{US} (J)	C ($^{\circ}\text{C}$)	RMSE (J)
$-28,5 \pm 16,6$	$7,50 \pm 0,75$	$1,70 \pm 1,41$	$13,29 \pm 1,01$	$80,0 \pm 28,9$	0,77

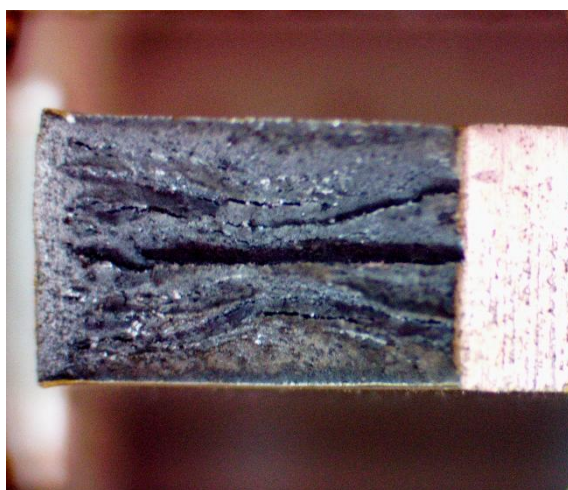
Figura 4.6 – Resultados dos ensaios SCVN, CTDF, incerteza associada à CTDF, parâmetros do ajuste e resultados dos ensaios de validação para o Material F. Fonte: Autor (2026).



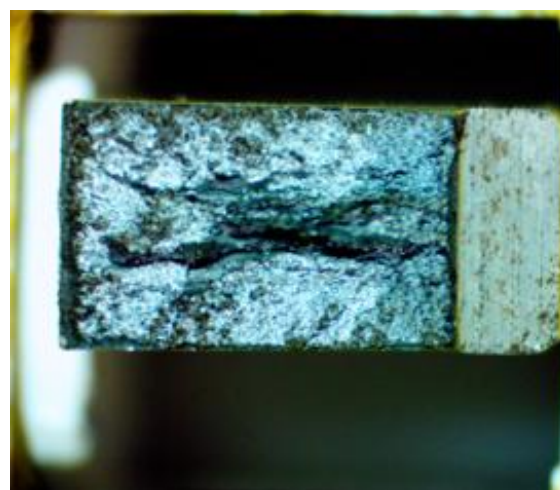
(a)



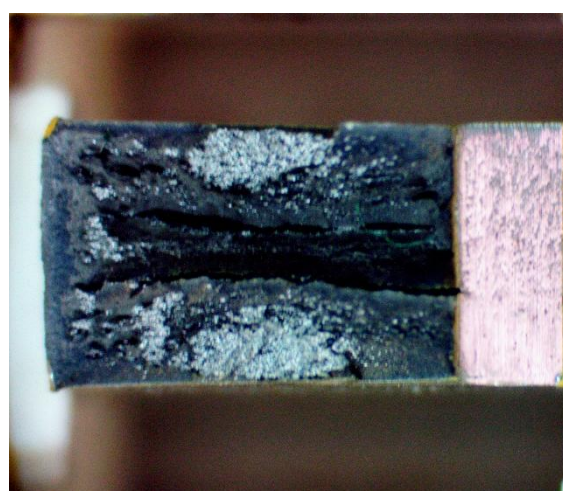
(b)



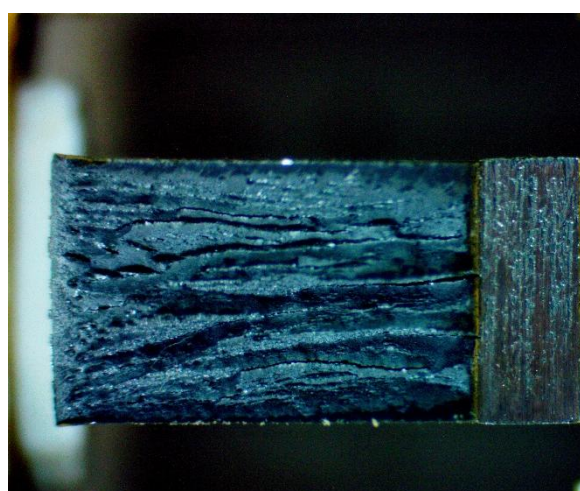
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4.7 – Fractografia de CPs ensaiados em temperatura ambiente para os materiais avaliados. Fonte: Autor (2026).

Nas Figuras 4.1 a 4.6, se observa que todos os materiais avaliados apresentam o formato *sigmoidal* característico das CTDF, com patamares inferior e superior bem definidos. Os valores de KV apresentam maior dispersão na região de transição e no patamar superior, comportamento esperado em função da maior sensibilidade do material na região de transição, pois há a coexistência de fratura dúctil-frágil, bem como do aumento da ordem de grandeza do mensurando no patamar superior, o que tende a aumentar a variabilidade dos resultados.

Na Figura 4.7 observa-se que os materiais A, C e F apresentam comportamento predominantemente dúctil em temperatura ambiente, caracterizado pela superfície escura e opaca. O material E apresenta fratura mista, típica da região de transição. Já os materiais B e D apresentam comportamento predominantemente frágil, evidenciado pela superfície de fratura brilhante, característica de falha por clivagem. Além disso, destaca-se a ocorrência de delaminações nas superfícies de fratura de todos os materiais avaliados, exceto para o material B.

Os valores de RMSE obtidos indicam uma boa aderência do modelo da TH aos dados experimentais para todos os materiais avaliados, com um RMSE máximo de 2,18 J e mínimo de 0,77 J. A Tabela 4.1 apresenta os resultados de NRMSE. Se nota que o NRMSE, no pior caso, é da ordem de 15 %. Esse resultado evidencia que apesar da elevada dispersão que caracteriza os valores de KV em função da temperatura, o modelo da TH é adequado para representar a CTDF dos dados analisados. Além disso, o NRMSE permite concluir que o melhor ajuste obtido foi para o material C (NRMSE de 8,95 %) e o pior foi para o material E (NRMSE de 14,61 %).

Tabela 4.1 – Resultados do NRMSE dos ajustes das CTDF dos materiais avaliados. Fonte: Autor (2026).

Material	NRMSE (%)
A	11,8
B	12,15
C	8,95
D	11,93
E	14,61
F	10,27

Em relação à DBTT, nota-se que apenas os materiais A, C, E e F apresentam valores inferiores à temperatura mínima de operação dos dutos flexíveis (4 °C). Este fato é indicativo de que esses materiais tendem a operar predominantemente no regime dúctil nas condições

de serviço e possuem maior margem de segurança estrutural. Por outro lado, os materiais B e D apresentam comportamento predominantemente frágil em condições operacionais, o que reforça a necessidade de critérios adicionais para avaliar a adequação ao serviço desses materiais.

Nesse contexto, a análise de temperaturas características, similar à temperatura na qual a energia absorvida é de 27 J (T_{27J}) ou 40 J (T_{40J}) para avaliação de soldas em dutos, conforme definido na norma API 5L (API, 2012) para CPs convencionais se mostra relevante. Pois, permite relacionar a CTDF a níveis mínimos de energia absorvida associado às exigências de projeto e operação. Considerando uma proporção direta com a área da seção transversal entre os CPs convencional e *half-size*, as temperaturas características equivalentes corresponderiam, respectivamente, a $T_{13,5J}$ e T_{20J} . Entretanto, em função de os materiais avaliados apresentarem alta e altíssima resistência mecânica, foram adotadas, para a presente análise, temperaturas características alternativas, mais representativas do comportamento desses materiais. Assim, foram consideradas as temperaturas $T_{13,5J}$ para os materiais A e B de alta resistência mecânica e T_{9J} para os materiais C, D, E e F de altíssima resistência mecânica.

A Tabela 4.2 apresenta os resultados das temperaturas $T_{13,5J}$ e T_{9J} obtidos via CTDF, bem como um resumo das propriedades e comportamento dos materiais.

Tabela 4.2 – Resumo das propriedades e comportamento dos materiais avaliados. Fonte: Autor (2026).

Material	Microestrutura	DBTT (°C)	$T_{13,5J}$ (°C)	T_{9J} (°C)	Comportamento em T_{amb}	Delaminação em T_{amb}
A	Ferrita + Cementita	-23,5	-40,0	-57,94	Dúctil	Sim
B	Perlita granular	43,0	34,65	13,08	Frágil	Não
C	Perlita	-24,9	20,02	-23,5	Dúctil	Sim
D	Perlita granular	52,5	74,66	40,1	Frágil	Sim
E	Perlita	-4,4	31,4	-13,3	Dúctil-frágil	Sim
F	Perlita	-28,5	Não atinge	-7,8	Dúctil	Sim

Em relação à incerteza expandida associada à CTDF se observa que esta se mostra adequada uma vez que a maior parte dos dados experimentais, representados pelos marcadores verdes, encontra-se nos limites impostos. Adicionalmente, os valores médios de KV resultantes dos ensaios de validação, indicados pelos marcadores em vermelho, se

encontram em sua maioria dentro da faixa de incerteza estimada. Vale notar que a incerteza foi calculada considerando uma probabilidade de abrangência de 95,45 %. Ainda, de forma geral, os valores de KV apresentam baixa repetibilidade.

Com relação aos resultados dos ensaios de validação (marcadores pretos) se observa que uma parte expressiva dos valores individuais de KV está fora dos limites impostos pela incerteza estimada. Este resultado era esperado, uma vez que os valores de KV são caracterizados por uma baixa repetibilidade. A Tabela 4.3 apresenta com SIM quando a média dos valores de KV está dentro da faixa de incerteza. Por sua vez, o NÃO é utilizado em caso contrário. Vale notar que as células destacadas em cinza representam temperatura no patamar inferior e, portanto, não serão consideradas na análise.

A partir da Tabela 4.3, se observa que a média resultante dos ensaios de validação, que caracteriza o mensurando para aquela temperatura, realizados perto da DBTT está dentro desta faixa para os materiais A, B, C e F. Por sua vez, para os materiais D e E não foi observado o mesmo comportamento, e o valor médio de KV está fora da faixa de incerteza estimada. Para o material B não é possível elaborar uma conclusão porque os ensaios de validação foram realizados no patamar inferior.

Tabela 4.3 – Comportamento da média dos valores de KV da validação em relação à faixa de incerteza estimada pelo método *bootstrap*. Fonte: Autor (2026).

Material	Temperatura (°C)			
	-40	-20	0	52
A	SIM	SIM		
B	NÃO	SIM		
C		SIM	SIM	
D		NÃO	SIM	NÃO
E		NÃO	NÃO	
F		SIM	SIM	

4.2 Avaliação da Homoscedasticidade dos Resíduos

A Tabela 4.4 apresenta os resultados do teste de Levene aplicado aos resíduos do ajuste para os diferentes materiais analisados. Observa-se que apenas o material A apresentou valor de $p < 0,05$, levando à rejeição da hipótese nula de igualdade das variâncias ao nível de significância de 5 %, o que indica evidência estatística de heteroscedasticidade dos resíduos nas diferentes regiões da CTDF. Para os materiais B a F, os valores de p foram

superiores ao nível de significância adotado, não havendo evidência estatística para rejeitar a hipótese nula, de modo que os resíduos podem ser considerados estatisticamente homoscedásticos.

Tabela 4.4 – Resultados do Teste de Levene. Fonte: Autor (2026).

Material	F-valor	GL1	GL2	p-valor	Conclusão ($\alpha=0,05$)
A	5,105	2	17	0,0184	Heteroscedástico
B	0,762	2	17	0,4822	Homoscedástico
C	2,132	2	19	0,1461	Homoscedástico
D	0,043	2	16	0,9584	Homoscedástico
E	0,594	2	19	0,5621	Homoscedástico
F	1,853	2	17	0,1871	Homoscedástico

A distribuição dos resíduos em cada região do ensaio é ilustrada por meio de *boxplots* apresentados na Figura 4.8, os quais complementam o teste de Levene. Há indicação visual de menor variância dos resíduos no LS, para os materiais A, C e F, mas apenas o material A apresentou diferença ao nível de significância de 5 %. Além disso, nota-se que os materiais B e D apresentaram dispersão significativa no patamar inferior, com variabilidade similar à da região de transição.

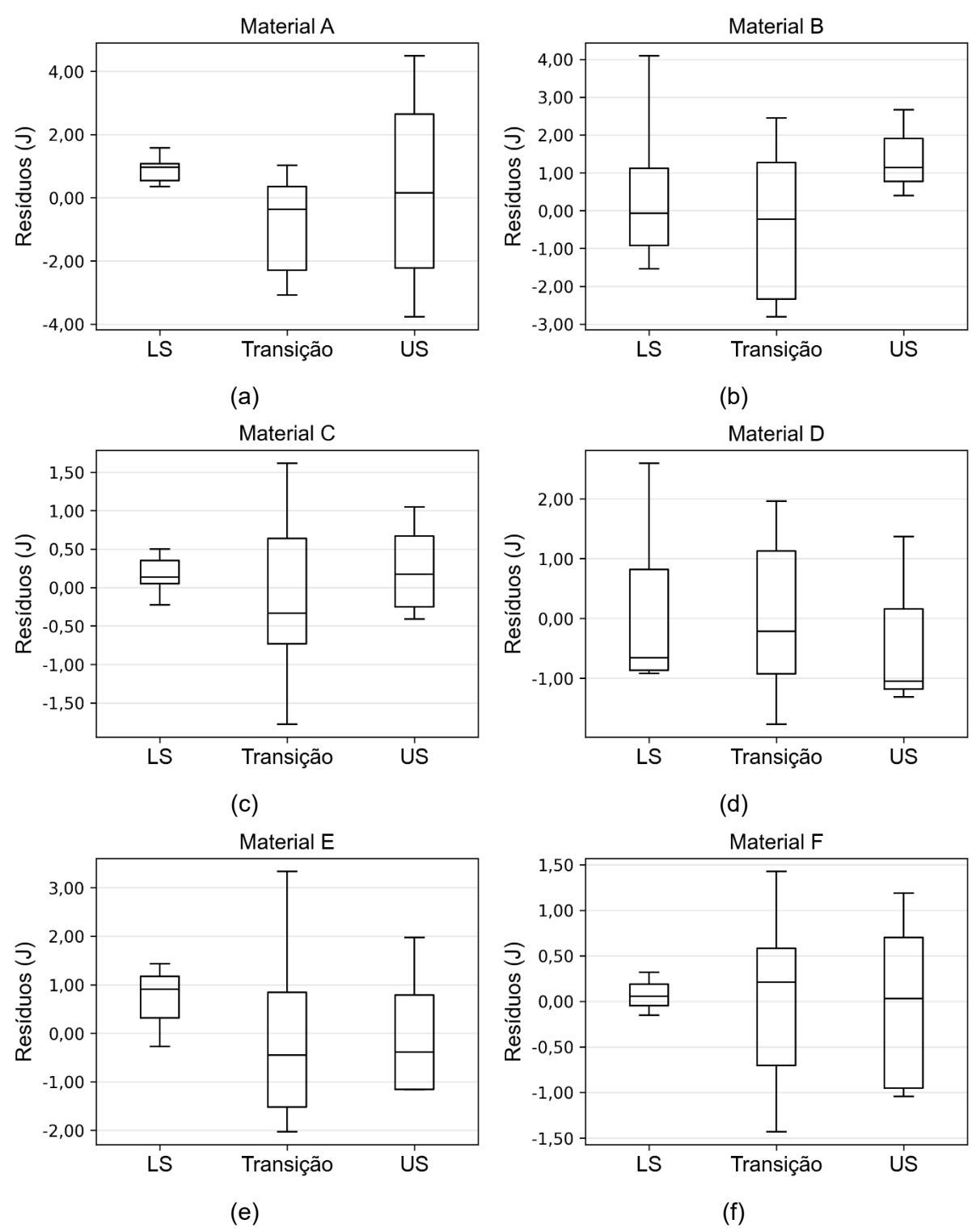


Figura 4.8 – *Boxplot* dos resíduos do ajuste da CTDF para os materiais avaliados. Fonte: Autor (2026).

4.3 Histograma dos valores simulados

A Figura 4.9 mostra os histogramas dos valores simulados de KV_{DBTT} , obtidos a partir da simulação de MC, permitindo uma avaliação visual do formato das distribuições.

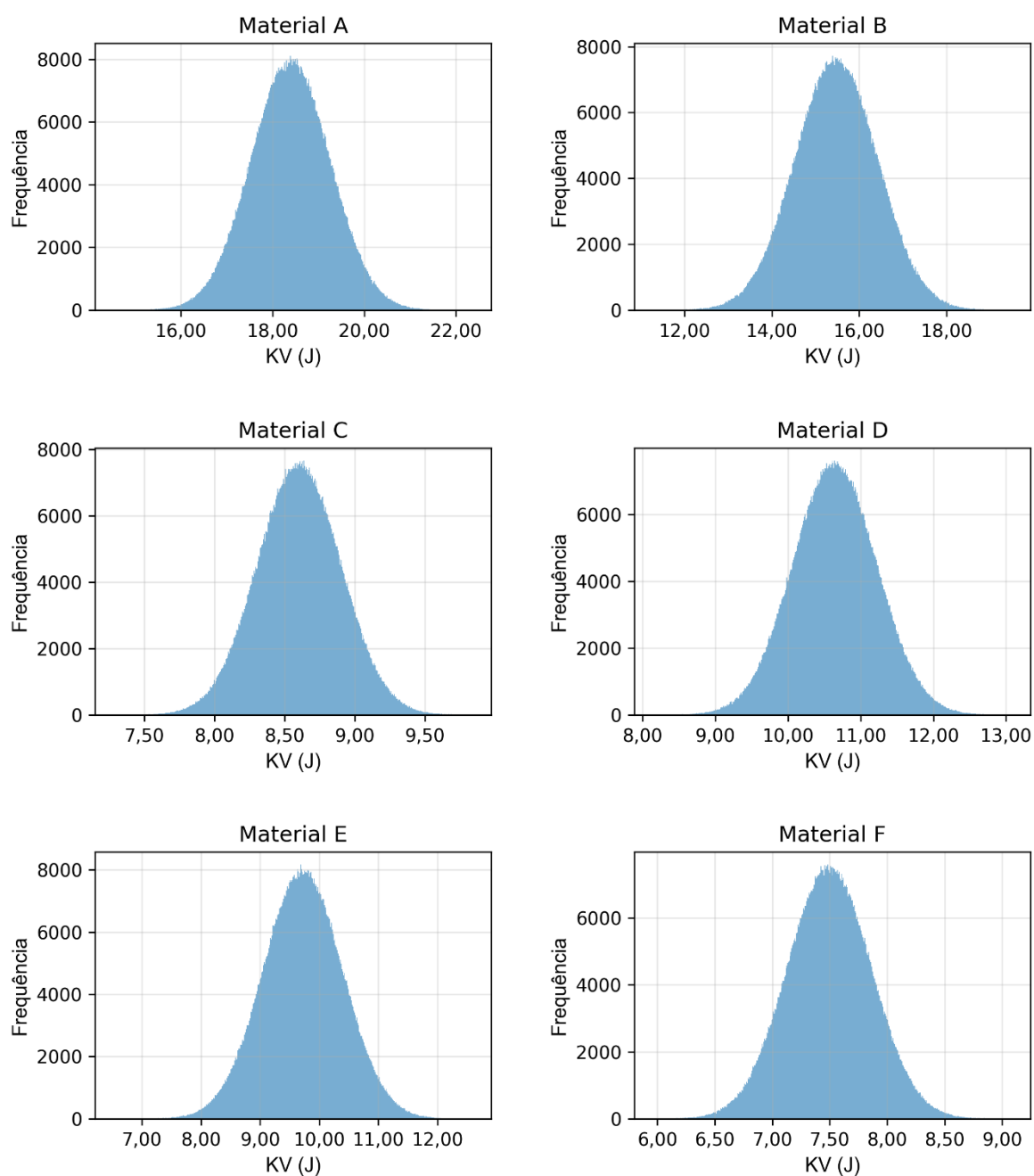


Figura 4.9 – Histograma dos valores simulados para KV_{DBTT} do método MC. Fonte: Autor (2026).

Na Figura 4.9 se observa que o formato da distribuição é próximo da normal. A Tabela 4.6 apresenta os resultados quantitativos da análise de normalidade para os valores simulados de KV_{DBTT} para o método de MC, incluindo os coeficientes de *skewness*, curtose e a estatística (D) do teste de KS. Dessa forma, é possível concluir que os valores simulados de KV_{DBTT} estão normalmente distribuídos para os seis materiais avaliados, logo a incerteza-padrão combinada associada pode ser calculada como o desvio-padrão populacional dos valores simulados.

Tabela 4.5 – Resultados de *skewness*, curtose e do teste de KS para o método de MC. Fonte: Autor (2026).

Material	Skewness	Curtose	D-valor	p-valor	Conclusão ($\alpha=0,05$)
A	-0,00096	2,99631	0,00069	0,72307	Aceita H_0 (Normal)
B	-0,00194	3,00131	0,00051	0,95404	Aceita H_0 (Normal)
C	-0,00340	2,99979	0,00045	0,98676	Aceita H_0 (Normal)
D	-0,00017	3,00316	0,00051	0,95759	Aceita H_0 (Normal)
E	-0,00260	2,99623	0,00057	0,90041	Aceita H_0 (Normal)
F	-0,00032	2,99885	0,00051	0,95622	Aceita H_0 (Normal)

Apesar do método *bootstrap* não precisar necessariamente que a distribuição dos resultados simulados do mensurando seja normal, os histogramas dos valores simulados de KV_{DBTT} são apresentados na Figura 4.10.

A Tabela 4.6 apresenta os resultados quantitativos da análise de normalidade para os valores simulados de KV_{DBTT} para o método *bootstrap*, incluindo os coeficientes de *skewness*, curtose e a estatística (D) do teste de KS. Se observa que as distribuições do mensurando foram normais para os materiais A, C e E e não normal para os materiais B, D e F. Essa não normalidade na distribuição do mensurando se justifica pela restrição física aplicada aos valores simulados, de modo a não apresentar valores de KV simulados negativos.

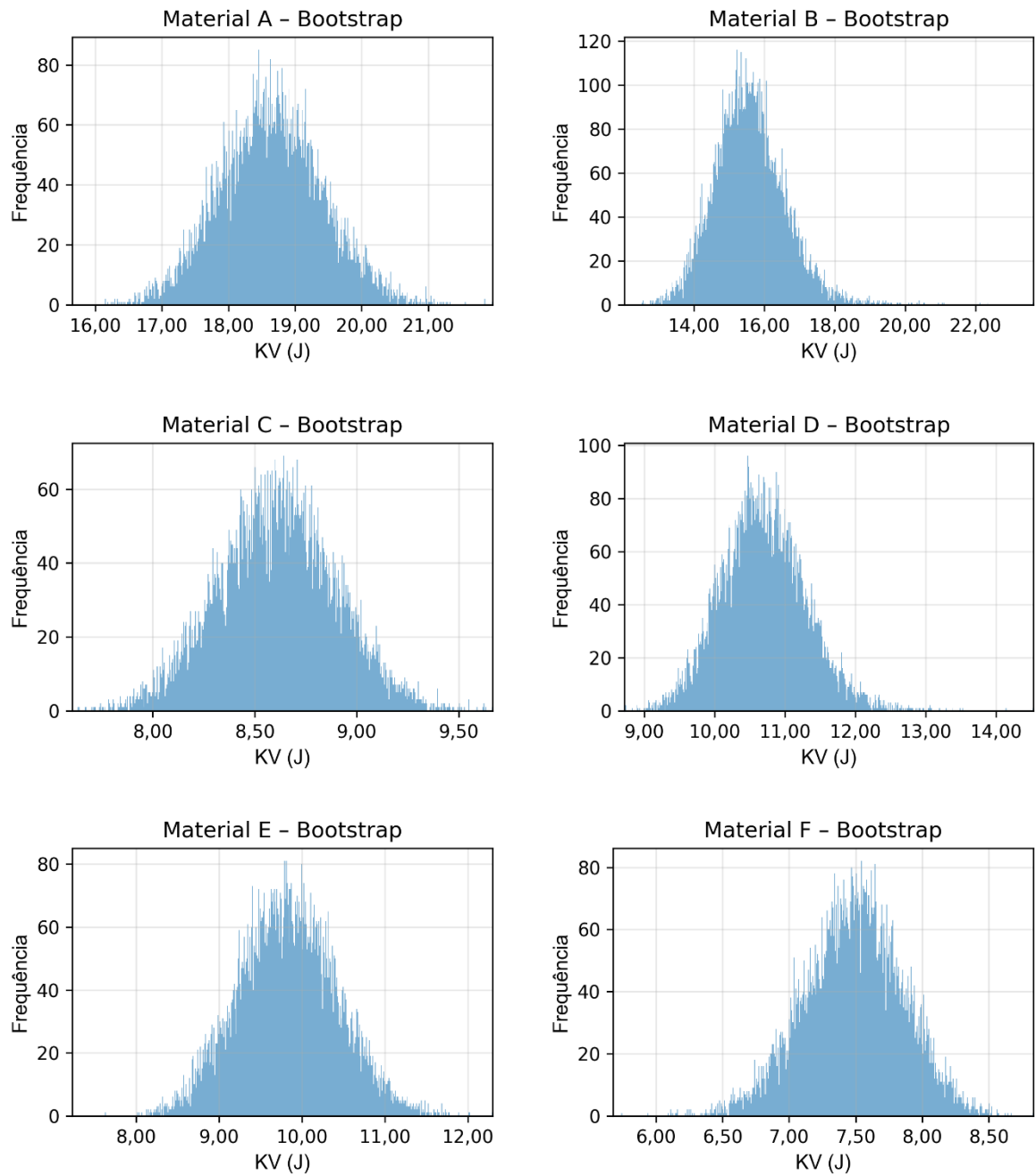


Figura 4.10 – Histograma dos valores simulados para KV_{DBTT} do método bootstrap. Fonte: Autor (2026).

Tabela 4.6 – Resultados de *skewness*, curtose e do teste de KS para o método de MC. Fonte: Autor (2026).

Material	Skewness	Curtose	D-valor	p-valor	Conclusão ($\alpha=0,05$)
A	0,09187	3,03787	0,00657	0,77907	Aceita H_0 (Normal)
B	0,57232	4,71808	0,03173	0,00000	Rejeita H_0 (Não Normal)
C	0,01220	2,93979	0,00482	0,97327	Aceita H_0 (Normal)
D	0,31114	3,61518	0,01728	0,00503	Rejeita H_0 (Não Normal)
E	0,08852	2,94621	0,00797	0,54661	Aceita H_0 (Normal)
F	-0,16573	3,12063	0,01380	0,04404	Rejeita H_0 (Não Normal)

4.4 Comparação Entre os Métodos GUM, MC e *Bootstrap*

A Figura 4.11 apresenta a incerteza expandida da CTDF em função da temperatura, comparando os métodos GUM (linha azul contínua), MC (linha laranja tracejada) e *Bootstrap* (linha verde contínua). As linhas pretas tracejadas representam o início (DBTT-C) e o fim (DBTT+C) da transição dúctil-frágil. Observa-se que os três métodos fornecem tendências semelhantes, com valores de incerteza mais elevados no início do patamar inferior e no fim do patamar superior e mínimos locais próximos às regiões de início e fim da transição dúctil-frágil. A aplicação dos métodos GUM e o MC resultou em valores de incertezas praticamente iguais, o que era esperado pois os métodos diferem apenas na forma de propagação da incerteza. As maiores diferenças entre os métodos GUM e MC se concentram na região de transição, onde a resposta do modelo da TH é menos linear e a aproximação por linearização de primeira ordem adotada no método GUM apresenta menor exatidão.

Além disso, nota-se que o método *bootstrap* apresenta uma tendência sistemática de fornecer valores de incerteza menores para o patamar inferior, enquanto GUM e MC permanecem praticamente coincidentes. Esse comportamento indica que o método *bootstrap* consegue representar de forma mais adequada a menor variabilidade estatística observada nos dados experimentais do patamar inferior.

Observa-se ainda a presença de comportamento bimodal para os materiais C, D e E. Conforme discutido por Marini (2020), é esperado que a dispersão dos resultados de KV seja máxima na região de transição dúctil-frágil, em razão da coexistência de mecanismos de fratura dúctil e frágil. Nessas condições, a distribuição dos resultados pode, em determinados casos, apresentar caráter bimodal, refletindo a elevada variabilidade intrínseca dos ensaios nessa região da curva de transição.

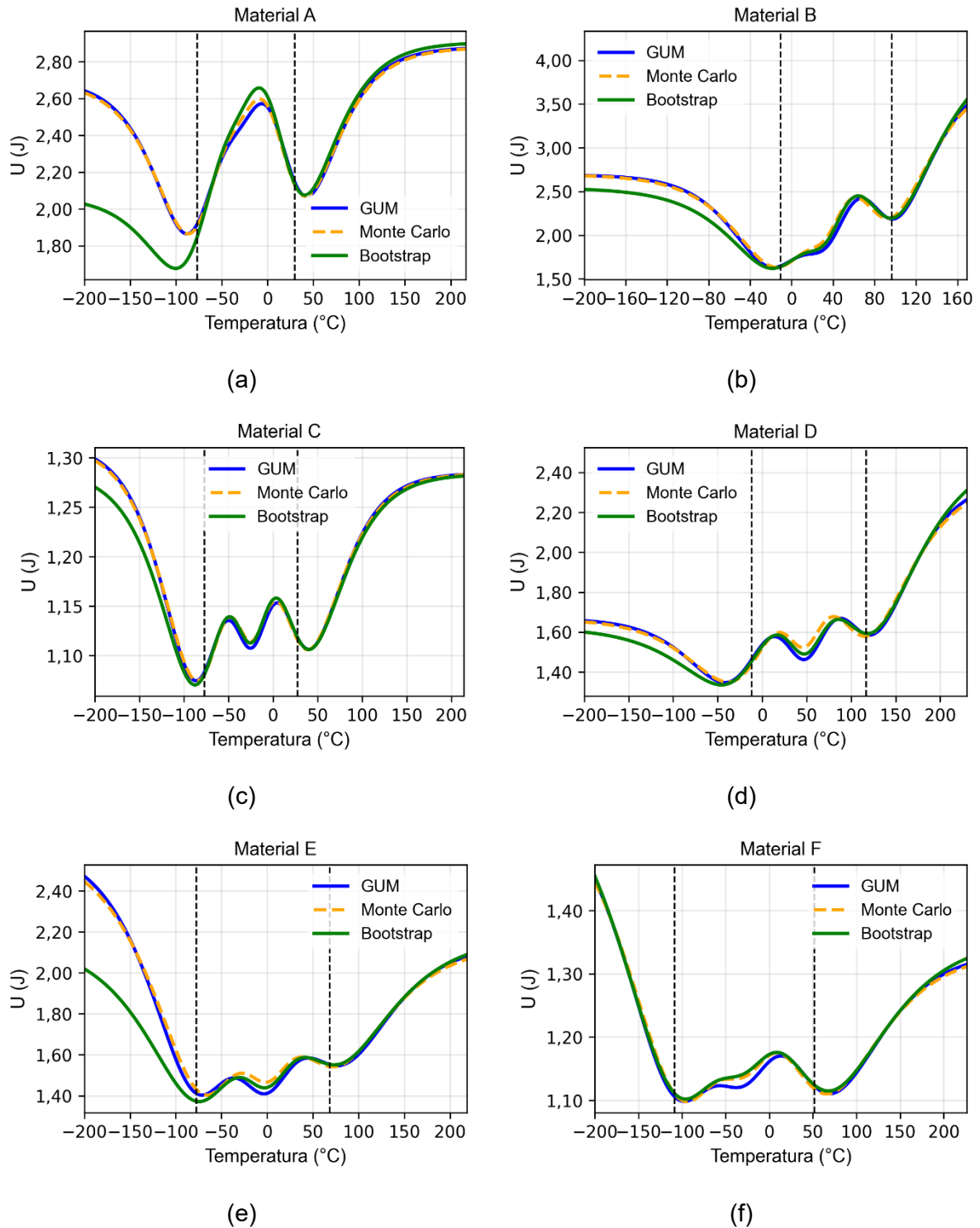


Figura 4.11 – Incerteza expandida da CTFD para os métodos GUM, MC e *Bootstrap*. Fonte: Autor (2026).

A Figura 4.12 apresenta o tempo de execução dos métodos avaliados para o cálculo da incerteza associada à CTFD. Observa-se que o método baseado no GUM apresenta tempos de execução desprezíveis para todos os materiais analisados, da ordem de centésimos de

segundo. O método de MC é o que apresenta o custo computacional mais elevado, com tempos variando aproximadamente entre 17 s e 27 s. O método *bootstrap* apresenta um comportamento intermediário, com tempo computacional entre cerca de 3,5 s e 6,5 s. Nota-se que, embora exista variação entre o tempo computacional dos materiais avaliados, a hierarquia de desempenho entre os métodos é mantida, indicando que o custo computacional é dominado principalmente pela metodologia adotada e pelo número de simulações realizadas, e não por particularidades específicas de cada material.

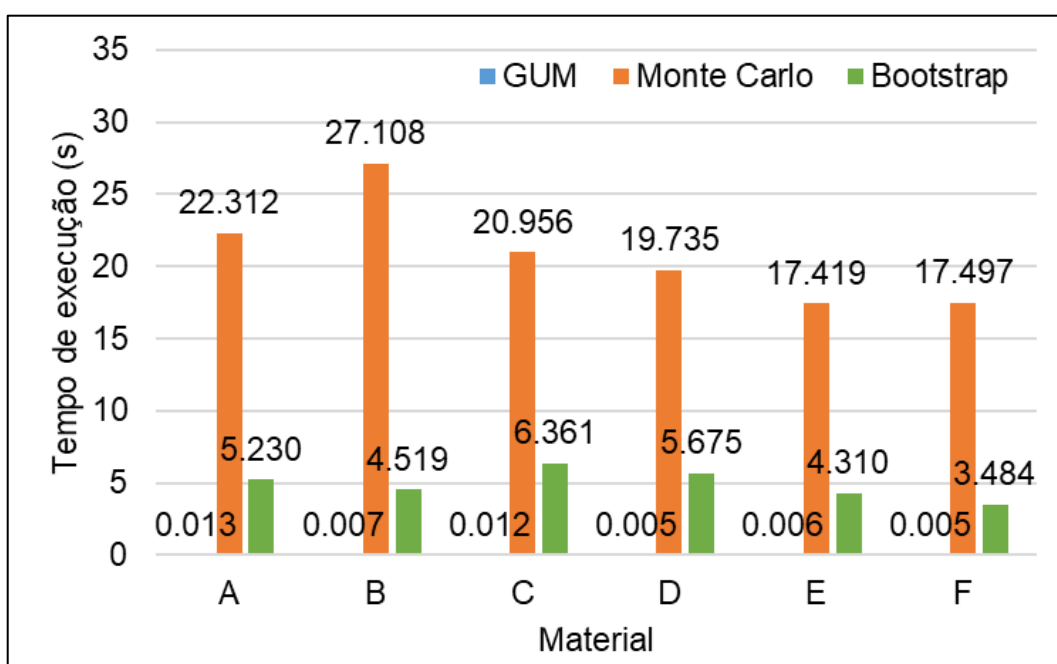


Figura 4.12 – Tempo de execução dos métodos GUM, MC e *Bootstrap*. Fonte: Autor (2026).

Em função dos resultados apresentados anteriormente e por refletir de forma mais representativa a variabilidade observada nos resultados experimentais, o método *bootstrap* foi considerado o mais adequado para a avaliação da incerteza associada à CTDF, sendo, portanto, o único método considerado na etapa de validação apresentada na seção seguinte.

4.5 Resultados da Validação da Metodologia Proposta para Determinar a Incerteza da CTDF

As Figuras 4.14 a 4.18 apresentam: (a) gráfico de colunas dos valores médios de KV obtidos nos ensaios de validação comparados com o valor obtido da CTDF. As barras de erro representam a incerteza expandida associada em cada caso. Para facilitar as análises, em

(b) são mostrados por meio de gráficos de colunas os valores de incerteza obtidos pelos métodos ISO e *bootstrap* com 95,45 % de probabilidade de abrangência. Por fim, em (c) e (d) as contribuições das variáveis de entrada na incerteza final são mostradas para a metodologia proposta pela norma ISO 148-1 (ISO, 2016).

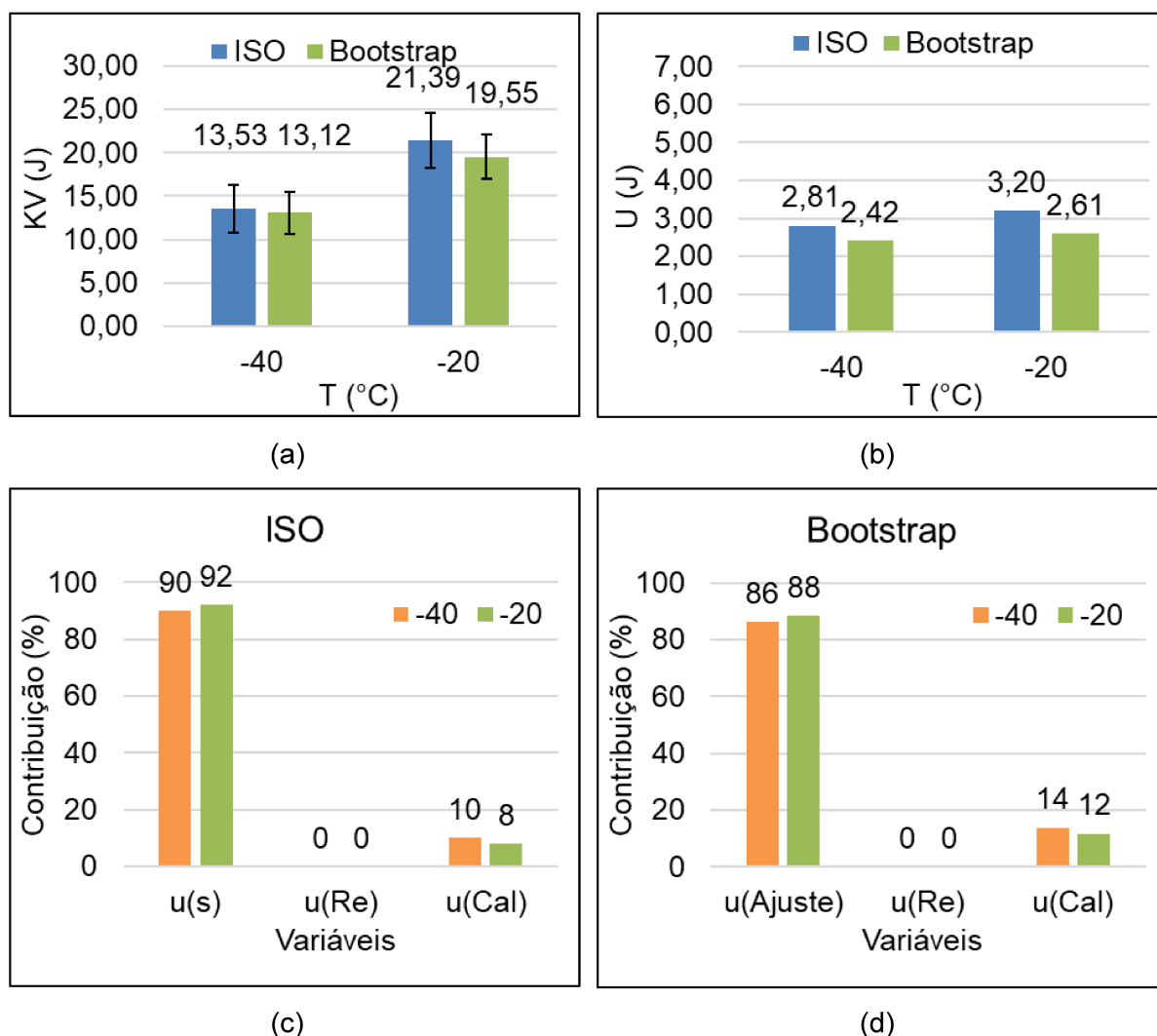


Figura 4.13 – (a) Valores de KV e incerteza expandida, (b) Valores de incerteza expandida obtidos pelos métodos ISO e *bootstrap*, (c) contribuição das variáveis do método ISO e (d) contribuição das variáveis do método *bootstrap* para o material A. Fonte: Autor (2026).

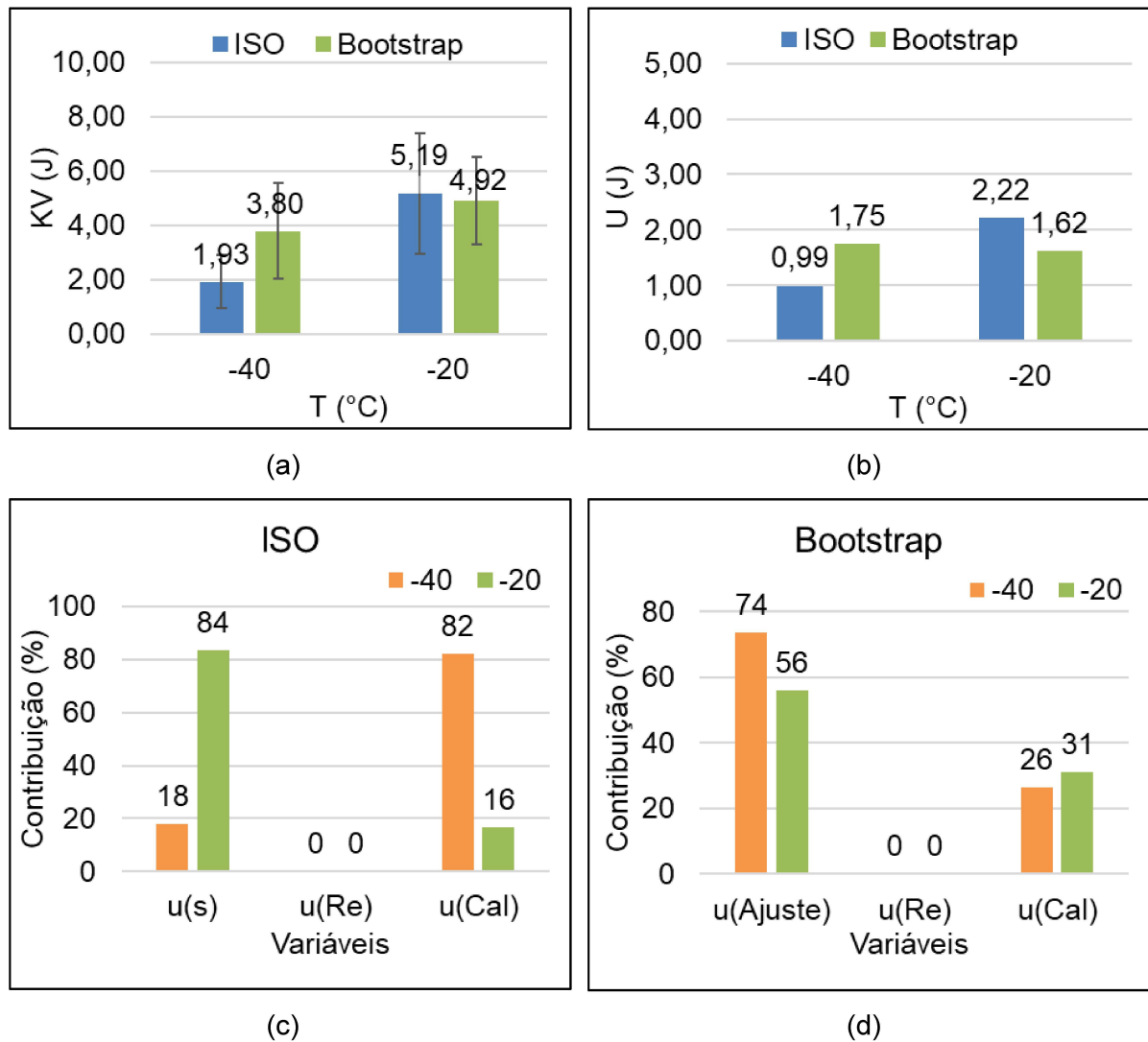


Figura 4.14 – (a) Valores de KV e incerteza expandida, (b) Valores de incerteza expandida obtidos pelos métodos ISO e *bootstrap*, (c) contribuição das variáveis do método ISO e (d) contribuição das variáveis do método *bootstrap* para o material B. Fonte: Autor (2026).

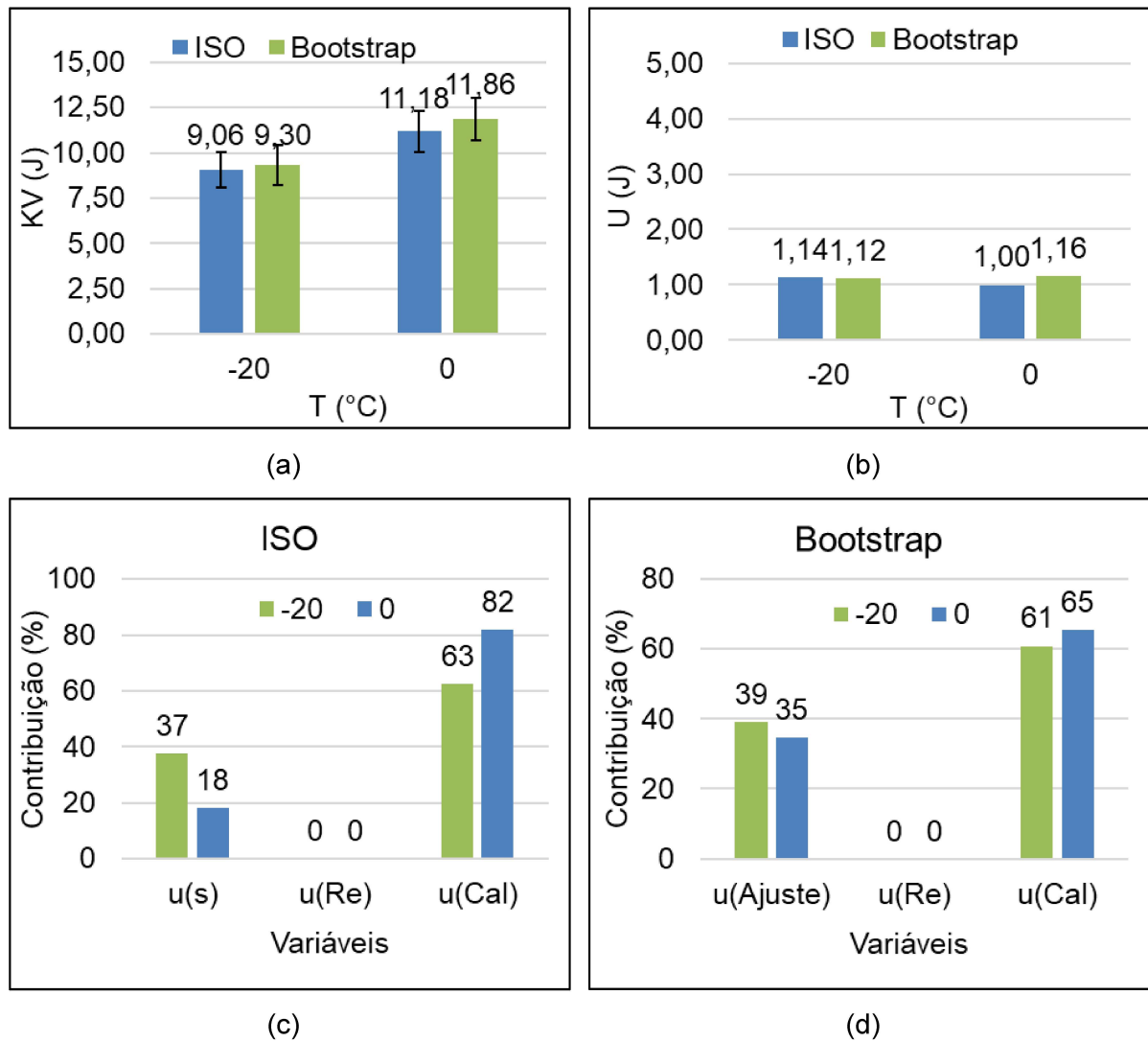


Figura 4.15 – (a) Valores de KV e incerteza expandida, (b) Valores de incerteza expandida obtidos pelos métodos ISO e *bootstrap*, (c) contribuição das variáveis do método ISO e (d) contribuição das variáveis do método *bootstrap* para o material C. Fonte: Autor (2026).

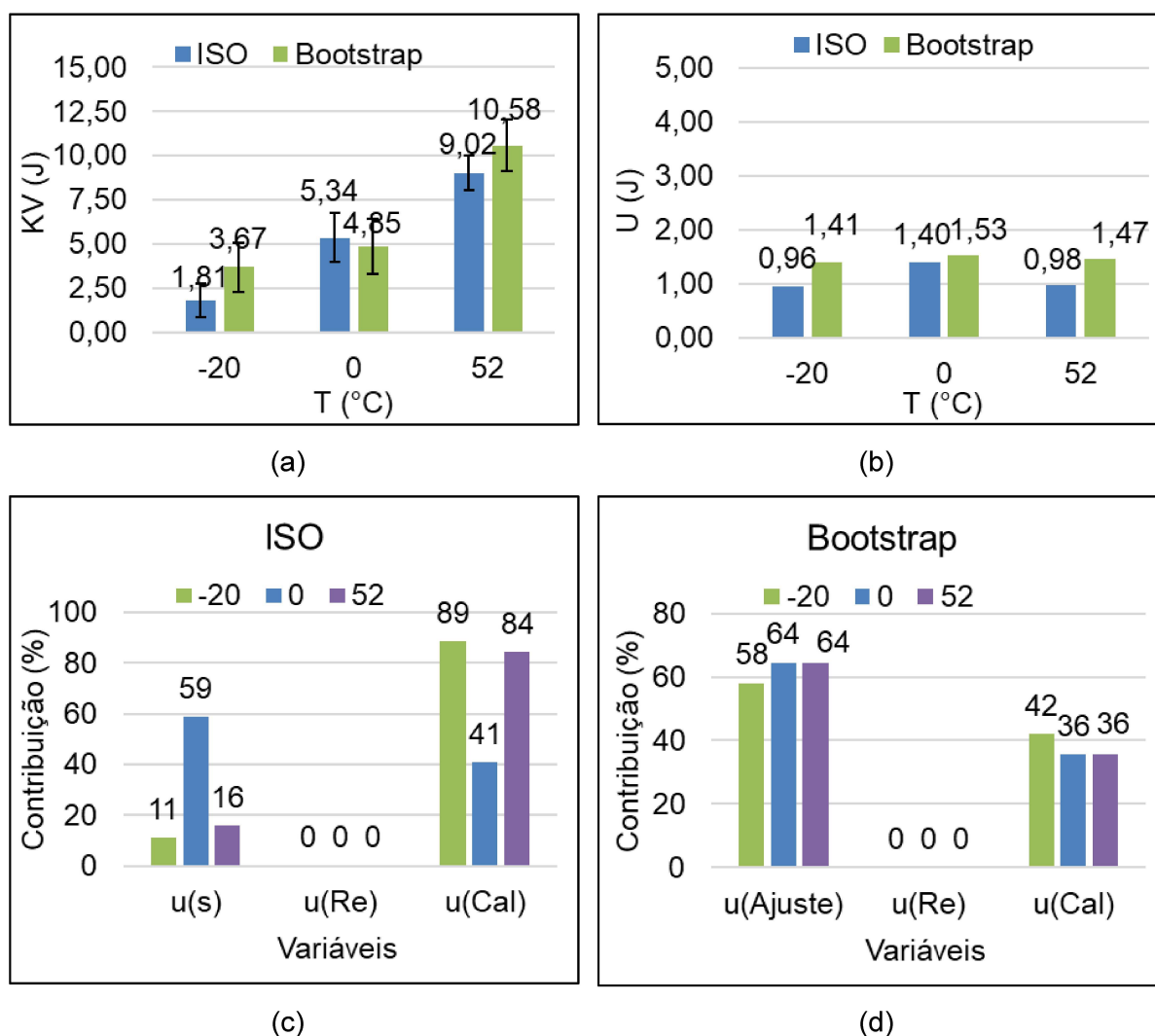


Figura 4.16 – (a) Valores de KV e incerteza expandida, (b) Valores de incerteza expandida obtidos pelos métodos ISO e *bootstrap*, (c) contribuição das variáveis do método ISO e (d) contribuição das variáveis do método *bootstrap* para o material D. Fonte: Autor (2026).

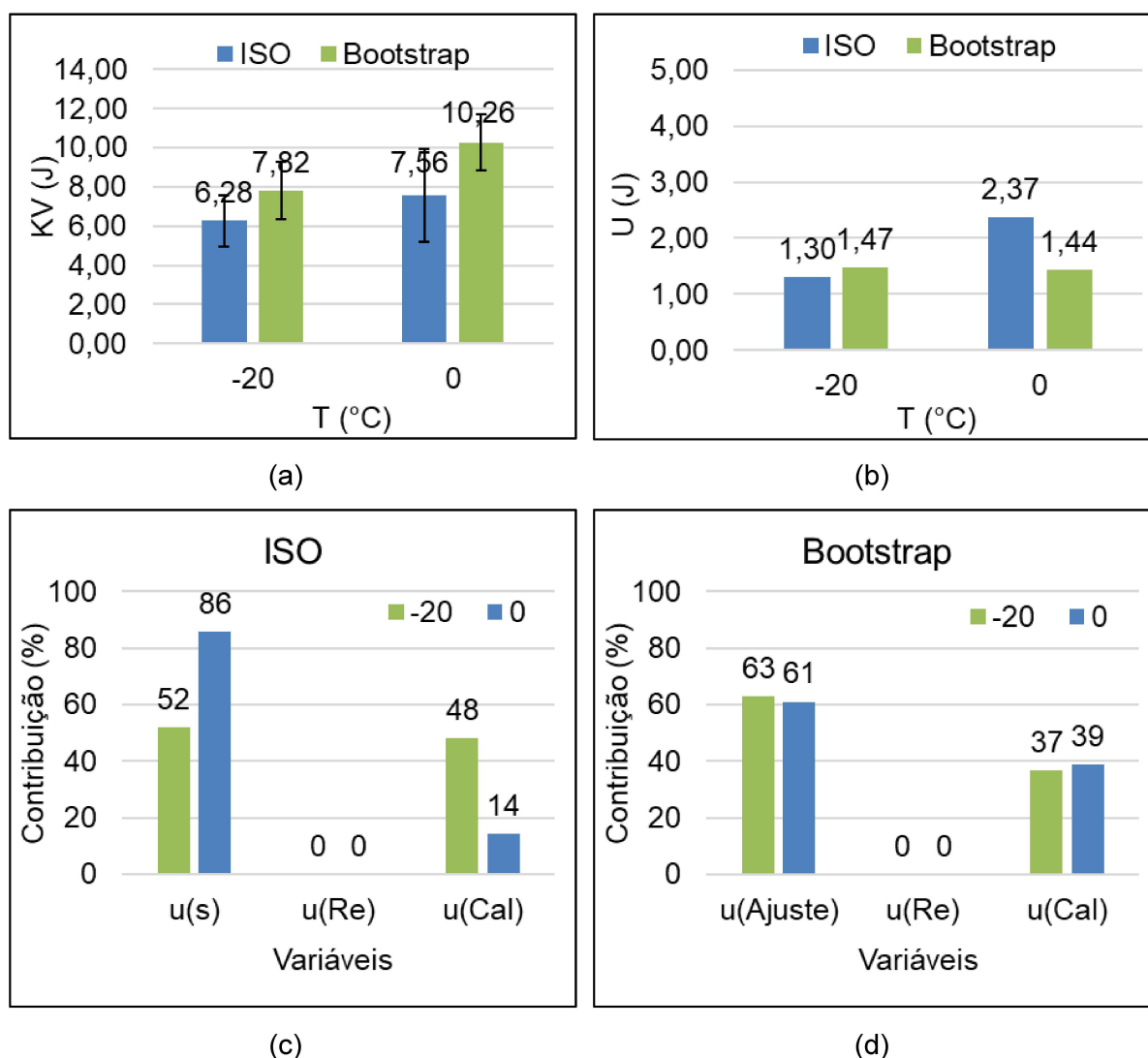


Figura 4.17 – (a) Valores de KV e incerteza expandida, (b) Valores de incerteza expandida obtidos pelos métodos ISO e *bootstrap*, (c) contribuição das variáveis do método ISO e (d) contribuição das variáveis do método *bootstrap* para o material E. Fonte: Autor (2026).

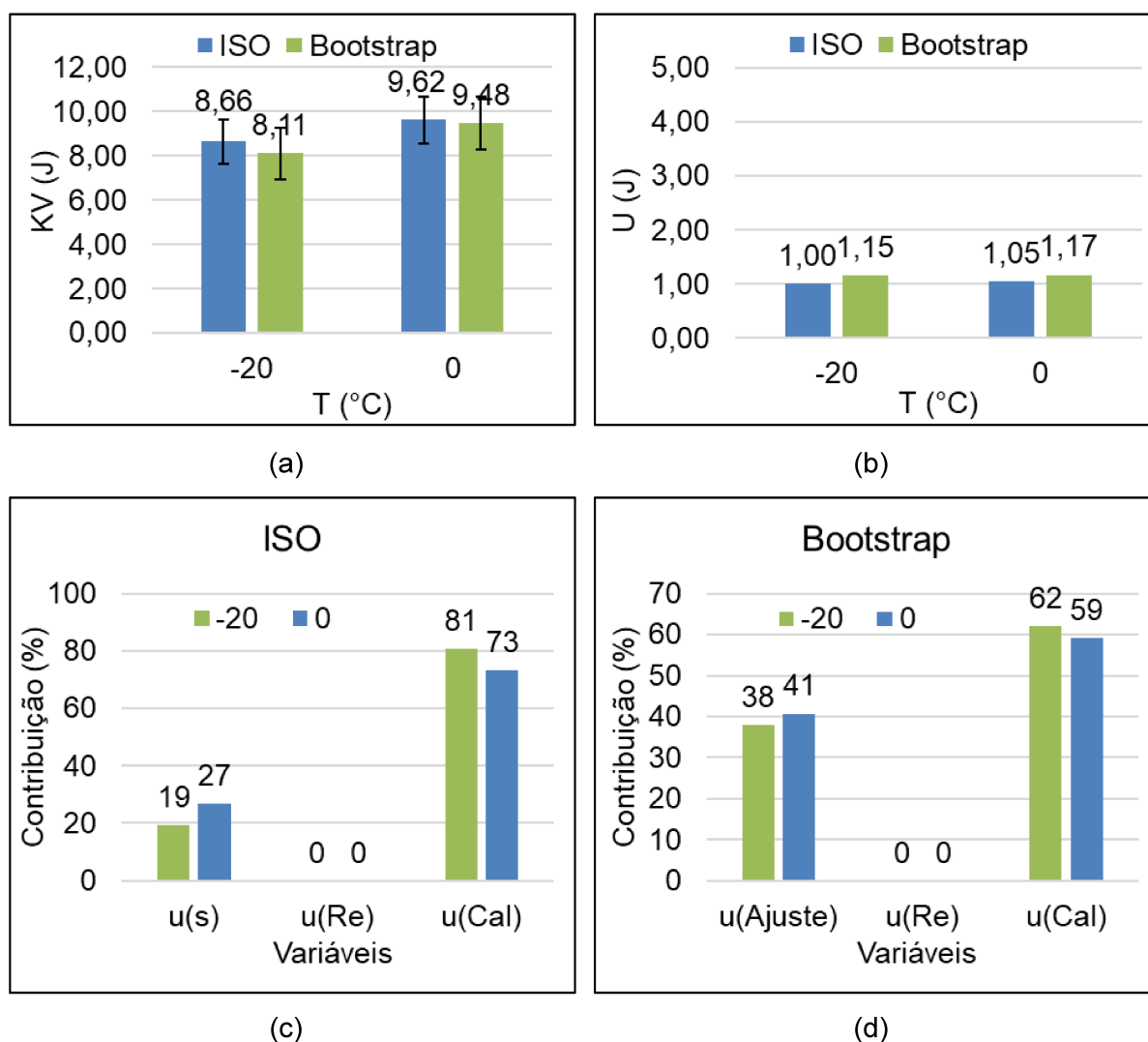


Figura 4.18 – (a) Valores de KV e incerteza expandida, (b) Valores de incerteza expandida obtidos pelos métodos ISO e *bootstrap*, (c) contribuição das variáveis do método ISO e (d) contribuição das variáveis do método *bootstrap* para o material F. Fonte: Autor (2026).

A partir das Figuras 4.14 a 4.18 se conclui que os valores médios de KV obtidos via ensaios de validação e a partir da CTDF são similares, evidenciando uma boa concordância entre os dois métodos. A sobreposição das barras de erro reforça essa observação, sugerindo que não há diferenças estatisticamente significativas entre os resultados fornecidos por ambos os métodos para as condições analisadas. Contudo, se ressalta que não foram aplicados testes estatísticos para a comparação entre os resultados dos métodos ISO e *bootstrap*, uma vez que esses os métodos apresentam tamanhos amostrais muito distintos, o que compromete a validade e a interpretação. Dessa forma, optou-se apenas por uma análise baseada na comparação direta dos intervalos de incerteza.

Além disso, as incertezas associadas possuem magnitudes semelhantes. A Figura 4.19 apresenta a diferença da incerteza obtida via método *bootstrap* em relação ao método da ISO. Nota-se que a maior diferença observada é de -0,93 J para o material E na temperatura de 0 °C. Essa diferença está associada ao fato de os ensaios de validação estarem localizados muito próximo da DBTT do material (-4,4 °C), na qual a dispersão esperada é máxima. A análise dos resíduos reforça essa interpretação, ao indicar maior dispersão na região de transição quando comparada aos LS e US. Apesar da diferença pontual, não se observa tendência sistemática de desvios nas demais temperaturas ou materiais analisados. Assim, a discrepância identificada reflete uma limitação local associada à variabilidade experimental do material em questão e à sensibilidade do modelo na região de transição, não comprometendo a validade global do ajuste nem da metodologia de avaliação de incerteza adotada.

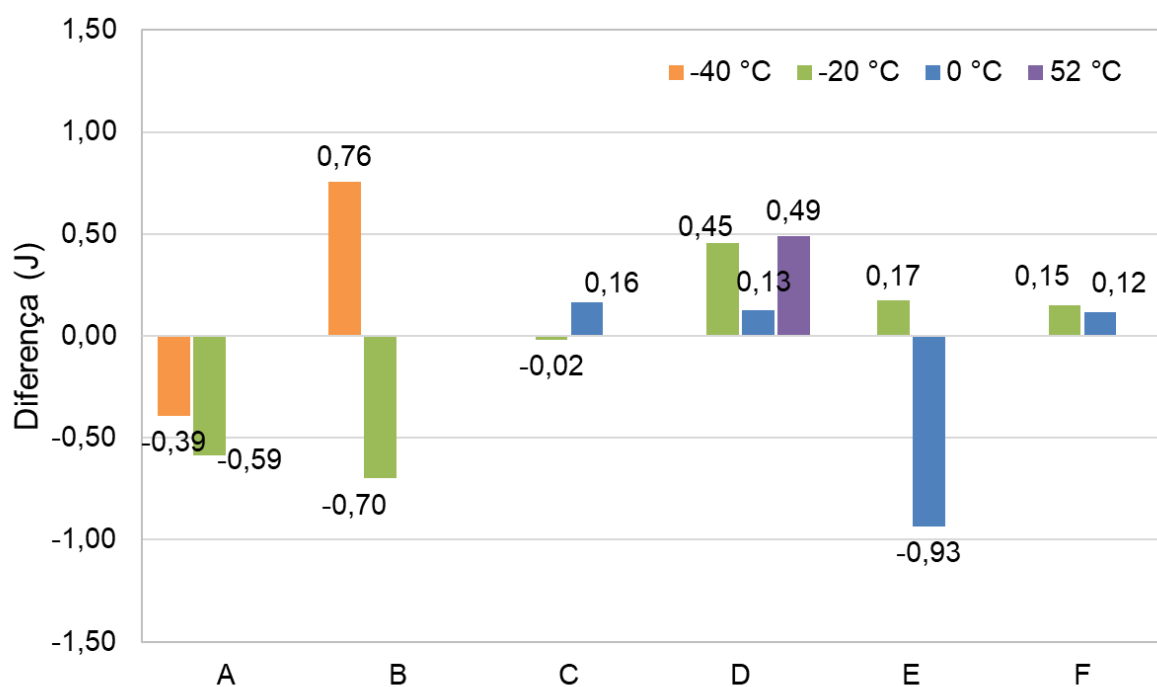


Figura 4.19 – Diferença entre a incerteza expandida do método *bootstrap* e a do método ISO. Fonte: Autor (2026).

Os materiais C, D e F apresentaram diferença menor ou igual a 0,49 J. Essa diferença é da ordem da incerteza associada à calibração da máquina de impacto Charpy utilizada para realizar os ensaios. Dessa forma, considera-se que a metodologia proposta está validada.

4.6 Discussão com a Literatura

A metodologia proposta neste trabalho difere da abordagem estabelecida pela ISO 148-1 (ISO, 2016), que se limita à avaliação da incerteza do valor médio de KV em temperaturas discretas e não contempla a incerteza associada ao ajuste da curva de transição nem a sua propagação para parâmetros derivados, como a CTDF ou a DBTT. Em contraste, a abordagem aqui desenvolvida considera explicitamente a incerteza do ajuste da curva, possibilitando a avaliação contínua da incerteza do mensurando ao longo de toda a CTDF, sem restringir a análise a pontos isolados de temperatura.

Em comparação com Todinov (2002), que adota uma modelagem probabilística específica para soldas multipasse e tem como objetivo a incerteza de T_{40J} a partir de um limite superior conservador da variância, a metodologia aqui apresentada é mais geral, simples e aplicável a diferentes materiais, sem a necessidade de hipóteses microestruturais específicas.

Em relação à abordagem empírica proposta por Marini (2020), a metodologia proposta avança ao incorporar explicitamente a variabilidade experimental observada e a incerteza associada ao ajuste do modelo da CTDF.

Em comparação com Lucon et al. (2021), que propõem a utilização do *bootstrap* paramétrico adotando o erro quadrático médio (RMSE) como desvio-padrão para a geração dos conjuntos sintéticos de dados, a metodologia proposta neste trabalho difere ao considerar a variância dos resíduos como medida mais adequada da dispersão experimental. O uso da variância permite representar de forma consistente a contribuição estatística dos resíduos ao considerar explicitamente o número de observações e o número de parâmetros ajustados, refletindo corretamente os graus de liberdade do problema. Além disso, a variância é o estimador natural da dispersão no contexto do GUM, enquanto o RMSE representa uma medida de qualidade do ajuste, mas não necessariamente um estimador não tendencioso da variabilidade experimental.

Em comparação com Switzner et al. (2023), que avaliam a incerteza da DBTT e de KV_{US} a partir de diferentes níveis de parametrização do modelo da tangente hiperbólica, a metodologia proposta evita a imposição de restrições arbitrárias aos parâmetros do modelo. As restrições adotadas por Switzner et al., ao fixar parcial ou totalmente os patamares e a largura da CTDF, reduzem artificialmente a incerteza estimada. Além disso, a incerteza associada à imposição dessas restrições não é propagada no modelo matemático do mensurando, o que resulta em estimativas não conservadoras da incerteza. Em contraste, a metodologia proposta preserva a liberdade dos parâmetros e a covariância entre eles, permitindo uma avaliação mais consistente e fisicamente representativa da incerteza associada à CTDF.

Em comparação com Pacheco et al. (2026), a metodologia proposta neste trabalho difere por tratar explicitamente a incerteza associada ao ajuste da CTDF. Enquanto Pacheco et al. concentram a análise na propagação das incertezas de KV e T para a DBTT, não é considerada a incerteza decorrente do ajuste do modelo matemático do mensurando. Como a DBTT é um parâmetro estimado a partir do ajuste do modelo matemático aos dados experimentais, a não consideração dessa fonte de incerteza tende a subestimar a incerteza associada à DBTT.

Dessa forma, a metodologia proposta consolida e amplia os avanços da literatura ao estabelecer uma metodologia fisicamente consistente e aplicável à avaliação da incerteza associada à CTDF como um todo.

CAPÍTULO V

CONCLUSÃO

Neste trabalho, foram determinadas as CTDFs de seis materiais utilizados na fabricação de arames de dutos flexíveis. Para calcular a incerteza associada à CTDF foi proposta e validada uma metodologia. As seguintes conclusões foram elaboradas ao fim deste trabalho:

- a. A metodologia proposta se mostrou viável para a avaliação da incerteza associada à CTDF dos materiais considerados, fornecendo resultados coerentes com a dispersão observada nos ensaios experimentais de validação. Sua formulação e implementação são simples, o que favorece a aplicação prática e contribui para a popularização da avaliação da incerteza associada à CTDF.
- b. A metodologia combina três métodos, o GUM, o de Monte Carlo e o *bootstrap*, sem a necessidade de aplicar explicitamente a lei de propagação de incertezas ou de determinar os graus de liberdade efetivos. Essas características reduzem a complexidade prática da análise.
- c. A metodologia proposta possibilita a avaliação e representação da incerteza da CTDF completa, mesmo quando um número limitado de ensaios é realizado.
- d. O método GUM apresentou o menor custo computacional, seguido pelo *bootstrap*, enquanto o método de MC apresentou o maior custo computacional.
- e. A contribuição da incerteza associada à resolução da máquina de impacto foi insignificante e pode ser desconsiderada. Já as contribuições da incerteza do ajuste e da incerteza padrão de KV alternaram a predominância a depender do material e condição analisada.
- f. A análise das CTDF dos materiais avaliados permite concluir que os materiais B e D não são adequados para as condições de operação dos dutos flexíveis. Esses materiais apresentam comportamento predominantemente frágil em temperatura ambiente. Além disso, a temperatura característica T_{9J} desses materiais é maior do que a mínima temperatura de operação, o que indica tenacidade ao impacto insuficiente nas condições de serviço.

- g. O material E apresenta fratura com comportamento dúctil-frágil em temperatura ambiente e DBTT próxima à temperatura mínima de operação, o que indica uma margem de segurança limitada. Dessa forma, a análise sugere a necessidade de ensaios complementares, como os de tenacidade à fratura, para confirmar a adequação do material às condições de serviço.
- h. Os materiais A, C e F mostram-se adequados para as condições de operação dos dutos flexíveis, uma vez que apresentam DBTT inferior à 4 °C e níveis mínimos de energia absorvida ao impacto conforme analisado pelas temperaturas características de $T_{13,5J}$ e T_{9J} .
- i. Ressalta-se que a adequação dos materiais A, C e F refere-se exclusivamente aos resultados dos ensaios Charpy e à análise das CTDF, e outros ensaios são necessários para confirmar qualificação destes materiais.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

A seguir são apresentadas as sugestões para os trabalhos futuros:

- a. Avaliar a aplicabilidade da metodologia proposta para cálculo da incerteza associada à CTDF obtida por meio da aplicação de outros modelos de ajuste;
- b. Avaliar a incerteza a partir da construção de outra CTDF independente;
- c. Validar a metodologia para as CTDF obtidas em função das variáveis SFA e EL;
- d. Realizar ensaios experimentais em CP convencional, *quarter-size* e miniaturizado para validar a aplicabilidade da metodologia proposta para outras configurações de CPs Charpy.

CAPÍTULO VI

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT ISO/IEC 17025. **General requirements for the competence of testing and calibration laboratories**, 2017. 38p.

ACUNA, A.; RIFFEL, K. C.; RAMIREZ, A. Effect of Sigma Phase on CVN Impact Toughness in HDSS Weld Metal. **Materials Science and Engineering: A**, v. 912, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.146948>.

ANDERSON, T. L. **Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications**. 3 ed. CRC Press, 2005. 640 p.

ARENCIBIA, R. V.; PIRATELLI FILHO, A.; LEAL, J. E. S.; ROSA, V. A. de O. **Incerteza de medição: metodologia de cálculo, conceitos e aplicações**. Rio de Janeiro: Interciência, 2019.

ASTM E1019. **Standard Test Method for Impact Testing of Miniaturized Charpy V-notch Specimens**. American Society for Testing and Materials, 2018

ASTM E2248. **Standard Test Method for Impact Testing of Miniaturized Charpy V-notch Specimens**. American Society for Testing and Materials, 2018

ASTM E23. **Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials**. American Society for Testing and Materials, 2023.

ASTM E8/E8M. **Standard test methods for tension testing of metallic materials**. American Society for Testing and Materials, 2025.

ASTM E92. **Standard test methods for Vickers hardness and Knoop hardness of metallic materials**. American Society for Testing and Materials, 2023.

BHANDARI, K. K.; MANDAL, A.; SK, M. B.; KARANI, A.; GANDHI, D.; DEB, A.; CHAKRABARTI, D. Crack-tip Gradient Microstructure: Formation and Influence on Impact Toughness Behavior of Low-Carbon Ferritic Steel. **Materials Science and Engineering: A**, v. 930, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2025.148166>.

BIPM; IEC; IFCC; ILAC; ISO; IUPAC; IUPAP; OIML. **Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement**. JCGM 100:2008, 2008b. 131p.

BIPM; IEC; IFCC; ILAC; ISO; IUPAC; IUPAP; 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**. Bureau International des Poids et Mesures. JCGM 101, 2008c. 90p.

CAO, L. W.; WU, S.J.; FLEWITT, P.E.J. Comparison of ductile-to-brittle transition curve fitting approaches, **International Journal of Pressure Vessels and Piping**. V. 93–94, p. 12–16, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2012.02.001>.

CHAOUADI, R.; MARIE, S.; PUZZOLANTE, J-L; LAMBRECHT, M; GLOANNEC, B. L. CHEVAL, P. Experimental validation of the Charpy-impact based reference temperature T₀ of SA 508 heavy forgings of nuclear components and development of a Charpy-based fracture toughness lower bound curve. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**. v. 217, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2025.105544>

CHARPY, G. *Note sur l'essai des métaux à la flexion par choc*. **Société des Ingénieurs Civils de France**, Paris, 1901.

CHATTERJEE, A.; MOITRA, A.; BHADURI, A. K.; CHAKRABARTI, D.; MITRA, R. Effect of heat treatment on ductile-brittle transition behaviour of 9Cr-1Mo steel. **Procedia Engineering**, 2014, **Anais Elsevier Ltd**, 2014. p. 287–294. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.040>.

CHATTERJEE, A.; MOITRA, A.; BHADURI, A. K.; MITRA, R.; CHAKRABARTI, D. Dynamic fracture behaviour of thermo-mechanically processed modified 9Cr-1Mo steel. **Engineering**

Fracture Mechanics, v. 149, p. 74–88, 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2015.09.051>.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials science and engineering: an introduction**. 9. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016.

DOWLING, N. E. **Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue**. 4 ed. London: Pearson, 2012. 954 p.

DUAN, H.; SHAN, Y.; YANG, K.; SHI, X.; YAN, W. Effect of microstructure and crystallographic orientation characteristics on low temperature toughness and fracture behavior of pipeline steels. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 17, p. 3172–3185, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.02.043>.

FERNANDES, K. A. **Avaliação da Qualidade Dimensional e Geométrica de Cilindros de Blocos de Compressores Herméticos Usinados pelo Processo de Brunimento Flexível**. 2014. 188f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

FOX, J. **Applied regression analysis & generalized linear models**. 3. ed. Thousand Oaks: SAGE Publications, 2015. 817p.

INMETRO. **A estimativa da incerteza de medição pelos métodos do ISO GUM 95 e de simulação de Monte Carlo**. INMETRO-DIMCI-DIMEC-LAPRE. Nota técnica, 2008. 34p.

INMETRO. **Avaliação de dados de medição - Guia para a expressão de incerteza de medição – GUM 2008**. Rio de Janeiro, Brasil, 2012b, 126p.

ISO 148-1. **Metallic materials — Charpy pendulum impact test — Part 1: Test method**. International Organization for Standardization, 2016.

ISO 148-2. **Metallic materials — Charpy pendulum impact test — Part 2: Verification of Testing machines**. International Organization for Standardization, 2008.

IWATA, Noriyuki Y.; KASADA, Ryuta; KIMURA, Akihiko; OKUDA, Takanari. Effects of milling parameters on the microstructure and Charpy impact properties of MA/ODS ferritic steels.

Fusion Engineering and Design, v. 126, p. 24–28, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.10.025>.

JEONG, W.; CHUN, Y. B.; KANG, S. H.; RHEE, C. K.; YOO, C. H.; YOO, S.; KIM, H.; AKMAL, M.; RYU, H. J. Enhancement of strength and ductile-brittle transition temperature of SA508 Gr.3 low-alloy steel by controlling heat accumulation in laser powder-directed energy deposition. **Journal of Materials Science and Technology**, v. 202, p. 240–252, 2024.
<https://doi.org/10.1016/j.jmst.2024.02.042>

JIN, S.; HWANG, S. K.; MORRIS JR., J. W. The effect of grain size and retained austenite on the ductile-brittle transition of a titanium-gettered iron alloy. **Metallurgical Transactions A**, v. 6A, p. 1721–1726, 1975. <https://doi.org/10.1007/BF02642299>

KOLLURI, M.; TEN PIERICK, P.; BAKKER, T.; STRAATHOF, B. T.; MAGIELSEN, A. J.; SZARAZ, Z.; D'AGATA, E.; OHMS, C.; MARTIN, O. Influence of Ni-Mn contents on the embrittlement of PWR RPV model steels irradiated to high fluences relevant for LTO beyond 60 years. **Journal of Nuclear Materials**, v. 553, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2021.153036>.

KOTRECHKO, S.; SOROKA, K.; REVKA, V. A new method for determining the threshold level of impact energy for reactor pressure vessel metal. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 216, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2025.105509>.

KRASOVSKII, A. Y.; VAINSHTOK, V. A. Crystallography of Cleavage in BCC Metals. **Strength Mater.** v. 9, p. 1091-1099, 1977. <https://doi.org/10.1007/BF01528588>

LEE, K. H.; PARK, S. G.; KIM, M. C.; LEE, B. S.; WEE, D. M. Characterization of transition behavior in SA508 Gr.4N Ni-Cr-Mo low alloy steels with microstructural alteration by Ni and Cr contents. **Materials Science and Engineering: A**, v. 529, n. 1, p. 156–163, 2011.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.09.012>.

LIN, P.; NIE, J. F.; CUI, S. G.; LU, Y. P. Molecular dynamics study on the ductile to-brittle transition in W-Re alloy systems. **Acta Materialia**, v. 285, 2025.
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2024.120684>.

LONSDALE, D.; FLEWITT, P. E. J. The Role of Grain Size on the Ductile-Brittle Transition of a 2.25 Pct Cr-1 Mo Steel. **Metallurgical and Materials Transactions**. v. 9, p. 1619-1623, 1978. <https://doi.org/10.1007/BF0266194>

LUCON, E.; MCCOWAN, C. N.; SANTOYO, R. L. Overview of NIST Activities on Subsize and Miniaturized Charpy Specimens: Correlations With Full-Size Specimens and Verification Specimens for Small-Scale Pendulum Machines. **Journal of Pressure Vessel Technology**, Transactions of the ASME, v. 138, n. 3, 2016. <https://doi.org/10.1115/1.4032474>.

LUCON, E.; SPLETT, J.; KOEPKE, A.; NEWTON, D. **NIST Software Package for Obtaining Charpy Curves**. NIST Technical Note 2158 (2021). <https://doi.org/10.6028/NIST.TN.2158>

MANDAL, A.; GHOSH, A.; CHAKRABARTI, D.; DAVIS, C. Effect of coiling temperature on impact toughness of hot rolled ultra-high-strength multiphase steel strips. **Materials Science and Engineering: A**, v. 824, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141796>.

MARINI, B. Empirical Estimation of Uncertainties of Charpy Impact Testing Transition Temperatures for an RPV Steel. **EPJ Nucl. Sci. Technol.** v. 6, 57, 2020. <https://doi.org/10.1051/epjn/2020019>

MIURA, N.; SHINKO, T.; NOMOTO, A. Variation of ductile-brittle transition temperature for Charpy curve provided by hyperbolic tangent function. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 216, 105495, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2025.105495>

NELSON, W.A. Statistical Methods. **Encyclopedia of Ecology**. Academic Press. 2008. p. 3350-3362. <https://doi.org/10.1016/B978-008045405-4.00661-3>.

NIKNEJAD, T.; QIAN, C.; GIANETTO, J. A.; KANG, J. Influence of microstructural gradient on Charpy V-notch impact toughness variability in X65 pipeline girth weld. **Engineering Failure Analysis**, v. 180, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2025.109841>.

NITZSCHE, V. R.; HSIA, K. J. Modelling of dislocation mobility controlled brittle-to-ductile transition. **Materials Science and Engineering**. v. 176, p. 155-164, 1994. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(94\)90970-9](https://doi.org/10.1016/0921-5093(94)90970-9)

NOH, S.; KASADA, R.; KIMURA, A. Solid-state diffusion bonding of high-Cr ODS ferritic steel. **Acta Materialia**, v. 59, n. 8, p. 3196–3204, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2011.01.059>.

OLDFIELD, W.; Curve fitting impact test data: A statistical procedure. ASTM STP 466, **American Society for Testing and Materials**, v. 3:11, 1975. <https://www.osti.gov/biblio/6253423>

ORYNYAK, I.; ZARAZOVSKII, M.; BOGDAN, A. V. Determination of the Transition Temperature Scatter Using the Charpy Data Scatter. **ASME 2013 Pressure Vessels and Piping Conference**. 2013, Paris, France. <https://doi.org/10.1115/PVP2013-97697>

PACHECO, R. M. B.; FERREIRA, D. C. F.; ARENCIBIA, R. V. A detailed methodology for assessment of the uncertainty associated with ductile-to-brittle transition temperature obtained via Charpy impact testing. **Measurement**, v. 226, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.120261>

PACHECO, R. M. B. **Avaliação da Incerteza Associada à Temperatura de Transição Dúctil-Frágil Obtida Via Ensaios de Impacto Charpy**. 2024. 114 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2024.674>

PILLOT, Sylvain; PACQUEAU, Pascal. An attempt to define a Charpy V-notched mastercurve to fit transition of ferritic steels. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 135, p. 259–273, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2015.01.012>.

PISARSKI, H. G.; HAYES, B.; OLBRICHT, J.; LICHTER, P.; WIESNER, C. S. Validation of idealised Charpy impact energy transition curve shape. **European Structural Integrity Society**, v. 30, p. 333–340, 2002. [https://doi.org/10.1016/S1566-1369\(02\)80037-1](https://doi.org/10.1016/S1566-1369(02)80037-1)

RATICK, S.; SCHWARZ, G. Monte Carlo Simulation. **International Encyclopedia of Human Geography**. Elsevier. 2009. p. 175-184, <https://doi.org/10.1016/B978-008044910-4.00476-4>.

SAKAI, Y.; TAMANOI, K.; OGURA, N. Application of tanh curve fit analysis to fracture toughness data of Japanese RPVS. **Nuclear Engineering and Design**, v. 115, n. 1, p. 31–39, 1989. [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(89\)90257-4](https://doi.org/10.1016/0029-5493(89)90257-4)

SAKONDER, C.; LI, Y.; XUE, L.; PAREDES, M.; BARBOSA, V. S.; SARZOSA, D. F. B.; RUGGIERI, C.; CRISTEA, M. E.; DARCIS, P. Investigation of the inverse fracture occurrence in X65 Q&T pipeline steels under impact loading, Part I: Experiments. **Engineering Failure Analysis**, v. 161, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108307>.

SHI, Z.; CHEN, Z.; YU, B.; LIN, H.; BAI, B.; HE, X. Assessment of the impact behavior of CLF-1 steel with Charpy V-notch testing and miniature Charpy V-notch testing. **Fusion Engineering and Design**, v. 208, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2024.114692>

SUN, J.-J.; LIAN, F.-L.; LIU, H.-J.; JIANG, T.; GUO, S.-W.; DU, L.-X.; LIU, Y.-N. Microstructure of warm rolling and pearlitic transformation of ultrafine-grained GCr15 steel. **Materials Characterization**, v. 95, p. 291–298, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2014.07.011>

SUN, M.; PACKER, J. A. Charpy V-notch impact toughness of cold-formed rectangular hollow sections. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 97, p. 114–126, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.02.005>.

SWITZNER, N. T.; ANDERSON, J.; AHMED, L. A.; ROSENFELD, M.; VELOO, P. Algorithms to Estimate the Ductile to Brittle Transition Temperature, Upper Shelf Energy, and Their Uncertainties for Steel Using Charpy V-Notch Shear Area and Absorbed Energy Data. **Metals** 2023, 13, 877. <https://doi.org/10.3390/met13050877>

TANGUY, B.; BESSON, J.; PIQUES, R.; PINEAU, A. Ductile to brittle transition of an A508 steel characterized by Charpy impact test Part I: Experimental results. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 72, n. 1, p. 49–72, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2004.03.010>

TODINOV, M. T. Uncertainty and risk associated with the Charpy impact energy of multi-run welds. **Nuclear Engineering and Design**, v. 231, p. 27–38, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2004.02.003>

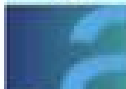
TÓRTH; ROSSMANITH; SIEWERT. Historical Background and Development of the Charpy Test. From Charpy to Present Impact Testing, **Elsevier Science Ltd. and ESIS**, v. 30, p. 3–19, 2002. [https://doi.org/10.1016/S1566-1369\(02\)80002-4](https://doi.org/10.1016/S1566-1369(02)80002-4).

VIRTANEN, P.; GOMMERS, R.; OLIPHANT, T. E.; et al. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. **Nature Methods**. v. 17, p. 261-272, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>

WALLIN, Kim; BAER, Wolfram. Evaluation of Charpy-V transition curve fitting based on distribution-free statistical assessment. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 206, 105079, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2023.105079>

WINDLE, P., L.; CROWDER, M.; MOSKOVIC, R. A statistical model for the analysis and prediction of the effect of neutron irradiation on charpy impact energy curves. **Nuclear Engineering and Design**, p. 43–56, 1996.

ANEXO A – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DA MÁQUINA DE TRACÇÃO

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO		
EMITENTE: LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO INSTRON		
DATA DE EMISSÃO: 24-jun-2022	NÚMERO DO CERTIFICADO: 22063482MC	
 INSTRON 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: servicebrasil@instron.com		
Tipo de calibração: Força Padrão relevante: ISO 7500-1:2018 Data da calibração: 24-jun-2022 Página 1 de 4 páginas SIGNATÁRIO APROVADO SILVIO OYAMA 25489838892		Este documento é um processo controlado sob o sistema de gestão da qualidade do INMETRO. Assinatura: (assinado) Nome: (assinado) Cargo: (assinado)

*** RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO ***	
ID do sistema:	8801MTU6168
Número Série Transdutor:	2527-111/002718
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 Alimentos e Derivados	Temperatura Mínima:	21.2 °C
Endereço:	Av. João Naves de Ávila, 2121 - Campus Santa Mônica Bloco 3F 38408-100 Uberlândia_MG Brasil	Temperatura Máxima:	21.3 °C
Contato:	Raphael Rezende Pires		
E-mail:	raphael.pires@lud.com.br		
Ordem de Serviço:	18365		

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

Marketing is

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 Descoberto".

Institute CalverCR Version 1.50

Este certificado atesta aos requisitos de confiabilidade pela Cipeq que atende a confiabilidade da informação e comprovam sua confiabilidade a partir da análise do modelo (ou do Sistema Internacional de Unidades - SI). Os resultados indicados neste certificado e o relatório seguem o relatório apenas aos seus conteúdos. Qualquer fraude de uso em relação ao conteúdo deste certificado, sem indicação no selo contencioso. Este relatório não deverá ser considerado, exceto no âmbito, sem o selo contencioso da laboratório credenciado.

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 ($\pm$ kN)	Classe Padrão
	Indicação						
	Execução 1	Execução 2	Execução 3				
100 Intervalo % (100 kN)							
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	0.029	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 ($\pm$ kN)	Classe Padrão
	Indicação						
	Execução 1	Execução 2	Execução 3				
100 Intervalo % (100 kN)							
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 por 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*	
	Indicado (kN)	Aplicado (kN)	Indicado (kN)	Aplicado (kN)	Indicado (kN)	Aplicado (kN)	Relativa %	($\pm$ kN)
100 Intervalo % (100 kN)								
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

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)
100 Intervalo % (100 kN)								
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)	
100 Intervalo % (100 kN)								
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 levados em consideração.

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



CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

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

NÚMERO DO CERTIFICADO:
22042402MC

Página 4 de 4 páginas

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	3648838/2021
J93154	indicador de força	NA	05-out-2020	05-out-2022	181322-101
N402899	célula de carga	36202 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	0.00% da leitura
100	Compressão	N402899	20/ 40/ 60/ 80/ 100	0.00% da leitura
Todos	Tração-Compressão	975608	Todos	1.8 °F

A precisão do indicador de força usado com um dispositivo elétrico 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 7300-1 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 B – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO PAQUÍMETRO DIGITAL



Mitutoyo Sul Americana Ltda.

LABORATÓRIO DE METROLOGIA

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Calibração
NBR ISO/IEC
17025



CAL 0031

Pag.: 1 / 2

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº. 07625/13

Cliente : " UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA."

Endereço : Avenida João Naves de Ávila, 2121 - Uberlândia - MG.

Ordem de serviço: 068.189

1 - Objeto Calibrado

PAQUÍMETRO DIGITAL

Fabricante: Mitutoyo
Código: 500-196-20B
Nº. de Série: 10901281
Faixa nominal : 150 mm
Resolução : 0,01 mm
Identificação do proprietário : Não consta

2 - Padrões utilizados na Calibração:

Blocos padrão	Número: 00112
Certificado N.º 00199/13 - RBC - Mitutoyo	Validade: 01/2014
Relógio apalpador	Número: LCF233
Certificado N.º 00997/13 - RBC - Mitutoyo	Validade: 08/2013
Padrão escalonado para paquímetro	Número : 010259
Certificado N.º 05825/13 - RBC - Mitutoyo	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 Suetake
 Gerente do Depto de Garantia da Qualidade

Este certificado atende aos requisitos de acreditação pela CGCRE que avalia a competência do laboratório e comprova sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida (ou ao Sistema Internacional de Unidades - SI).
A reprodução deste Certificado só poderá ser total e depende da aprovação por escrito da Mitutoyo.
Os resultados deste Certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer itens.

«Escritório Central» Av. João Carlos de Silva Borges, 1249 - Santo Amaro - CEP 04728-002 - São Paulo - SP - Telefone: (11) 5643-0000 - Fax: (11) 5641-3722
 «Filial» Rod. Indio Tibiquá, 1555 - Bairro Ruffo - CEP: 09620-000 - 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: assist@mitutoyo.com.br
 Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 5643-0027 - Fax: (11) 5643-0028 - E-mail: ate@mitutoyo.com.br



Mitutoyo Sul Americana Ltda.

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº. 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

Padrão (mm)	Indicação no Instrumento (mm)	Incerteza de Medição (mm)
1,1	1,10	0,02
1,5	1,50	
1,9	1,90	
4,0	4,00	
8,0	8,00	
16,0	16,00	
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 _{eff})	infinito

Medida Interna

Padrão (mm)	Indicação no Instrumento (mm)	Incerteza de Medição (mm)
20,0	20,00	0,02
50,0	50,00	
100,0	100,01	
150,0	150,02	

Fator de abrangência (k)	2,03
Graus de liberdade (V _{eff})	96

Outros Itens

Item	Resultado (mm)	Incerteza de Medição (mm)	Fator de abrangência (k)	Graus de liberdade (V _{eff})
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_{eff} 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.

ANEXO C – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DA MÁQUINA DE IMPACTO CHARPY

	UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA LABORATÓRIO DE TECNOLOGIA EM ATRITO E DESGASTE Avenida João Naves de Ávila, 2121, bloco 5F, Santa Mônica 38.400-902 – Uberlândia/MG	
Certificado de Calibração do Charpy (Verificação Indireta)		
Documento do Sistema da Qualidade		Página 1/6
CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N. 02/2023		
1.1. IDENTIFICAÇÃO DA MÁQUINA		
Charpy HIT450P Fabricante: ZwickRoell GmbH & Co. KG Modelo: HIT450P Raio do cutelo: 8 mm Faixa nominal: 450 J		
1.2. PADRÕES UTILIZADOS NA CALIBRAÇÃO		
Unidade SRM 2113 de corpos de prova convencionais (força) com a seguinte especificação: SRM 2113 LL103 (ID: 606) SRM 2113 LL103 (ID: 955) SRM 2113 LL103 (ID: 622) SRM 2113 LL103 (ID: 769) Certificado de calibração Lot No. LL-103		
Unidade SRM 2112 de corpos de prova convencionais (força) com a seguinte especificação: SRM 2112 LL103 (ID: 270) SRM 2112 LL103 (ID: 675) SRM 2112 LL103 (ID: 297) SRM 2112 LL103 (ID: 506) Certificado de calibração Lot No. LL-103		
Unidade SRM 2098 de corpos de prova convencionais (energia) com a seguinte especificação: SRM 2098 SH-66 (ID: 1421) SRM 2098 SH-66 (ID: 1422) SRM 2098 SH-66 (ID: 1423) SRM 2098 SH-66 (ID: 1424) Certificado de calibração Lot No. SH-66		
1.3. PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO		
A verificação indireta foi conduzida seguindo a ASTM E23 - Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. 2023 e a ISO 148-2 – Materiais metálicos – Ensaio de impacto por pêndulo Charpy (Parte 2: Verificação de máquinas de ensaio). 2016. Os valores de energia absorvida e de força máxima indicados pela máquina de ensaio foram comparados com os valores de energia absorvida declarados no certificado de calibração de cada unidade de corpos de prova de referência.		
Data da calibração: 03 de outubro 2023		
Data de emissão do certificado: 23 de outubro de 2023		
Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente à máquina submetida à verificação nas condições especificadas, não sendo extensivo a outras máquinas.		



1.4. RESULTADOS DA VERIFICAÇÃO

Página 2/6

Tabela 1 – Resultados dos ensaios de verificação indireta (Energia absorvida)

Resultados do ensaio e dados de certificados		Erro e Incerteza	
Identificação dos corpos de prova de referência	KV_v	$\overline{KV}_v$	17,87 J
SRM 2113 LL103 (ID: 606)	18,15 J	s_v	0,61 J
SRM 2113 LL103 (ID: 955)	18,60 J	n_v	4
SRM 2113 LL103 (ID: 622)	17,36 J	$u(\overline{KV}_v)$	0,30 J
SRM 2113 LL103 (ID: 769)	17,38 J		
Do certificado: Energia de Referência	18,20 J	B_v	-0,33 J
Do certificado: graus de liberdade, v_{MR}	71	$u(B_v)$	0,31 J
Do certificado: Incerteza expandida U_{RM} com 95 % de abrangência e $k_{RM}=1,9939$	0,10 J	u_v	0,45 J
Incerteza padrão combinada u_{RM}	0,05 J	vB_v	6,12
SRM 2112 LL103 (ID: 270)	105,19	$\overline{KV}_v$	104,54 J
SRM 2112 LL103 (ID: 675)	104,85	s_v	0,61 J
SRM 2112 LL103 (ID: 297)	104,33	n_v	4
SRM 2112 LL103 (ID: 506)	103,80	$u(\overline{KV}_v)$	0,30 J
Do certificado: Energia de Referência	105,30 J	B_v	-0,76 J
Do certificado: graus de liberdade, v_{MR}	70	$u(B_v)$	0,31 J
Do certificado: Incerteza expandida U_{RM} com 95 % de abrangência e $k_{RM}=1,9944$	0,60 J	u_v	0,87 J
Incerteza padrão combinada u_{RM}	0,30 J	vB_v	5,08
SRM 2098 SH-66 (ID: 1421)	197,05 J	$\overline{KV}_v$	194,27 J
SRM 2098 SH-66 (ID: 1422)	193,64 J	s_v	3,12 J
SRM 2098 SH-66 (ID: 1423)	190,12 J	n_v	4
SRM 2098 SH-66 (ID: 1424)	196,25 J	$u(\overline{KV}_v)$	1,57 J
Do certificado: Energia de Referência	197,8 J	B_v	-3,54 J
Do certificado: graus de liberdade, v_{MR}	69	$u(B_v)$	1,72 j
Do certificado: Incerteza expandida U_{RM} com 95 % de abrangência e $k_{RM}=1,423$	1,423 J	u_v	3,93 j
Incerteza padrão combinada u_{RM}	0,713 J	vB_v	4,41

Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente à máquina submetida à verificação nas condições especificadas, não sendo extensivo a outras máquinas.



Tabela 2 – Resultados dos ensaios de verificação indireta (Força máxima)

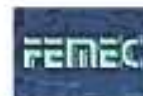
Página 3/6

Resultados do ensaio e dados de certificados		Cálculo do erro e da incerteza	
Identificação dos corpos de prova de referência	Força máxima		
SRM 2113 LL103 (ID: 606)	32,30 kN	$\bar{F}_V$	32,30 kN
SRM 2113 LL103 (ID: 955)	32,14 kN	s_{FV}	0,24 kN
SRM 2113 LL103 (ID: 622)	32,64 kN	n_{FV}	4
SRM 2113 LL103 (ID: 769)	32,12 kN	$u(\bar{F}_V)$	0,12 kN
Do certificado: Energia de Referência	33,00 kN	BF_V	-0,70 kN
Do certificado: graus de liberdade, ν_{MR}	6	$u(BF_V)$	0,77 kN
Do certificado: Incerteza expandida U_{RM} com 95 % de abrangência e $k=2,447$	1,86 kN	uF_V	1,04 kN
Incerteza padrão combinada u_{CRM}	0,76 kN	vF_V	8,63
SRM 2112 LL103 (ID: 270)	25,47 kN	$\bar{F}_V$	25,56 kN
SRM 2112 LL103 (ID: 675)	25,47 kN	s_{FV}	0,12 kN
SRM 2112 LL103 (ID: 297)	25,72 kN	n_{FV}	4
SRM 2112 LL103 (ID: 506)	25,56 kN	$u(\bar{F}_V)$	0,06 kN
Do certificado: Energia de Referência	1,78 kN	BF_V	1,50 kN
Do certificado: graus de liberdade, ν_{MR}	6	$u(BF_V)$	0,29 kN
Do certificado: Incerteza expandida U_{RM} com 95 % de abrangência e $k=2,447$	0,70 kN	uF_V	1,52 kN
Incerteza padrão combinada u_{CRM}	0,29 kN	vF_V	3,23

Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente à máquina submetida à verificação nas condições especificadas, não sendo extensivo a outras máquinas.

ANEXO D – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO BANHO TERMOSTÁTICO

	UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA LABORATÓRIO DE TECNOLOGIA EM ATRITO E DESGASTE Avenida João Naves de Ávila, 2121, bloco 5F, Santa Mônica 38.400-902 – Uberlândia/MG	
Certificado do Banho Termostático		
Documento do Sistema da Qualidade		Página 1/4
CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N. 21/2024		
1.1. IDENTIFICAÇÃO DA MÁQUINA		
Banho Termostático Fabricante: Time Group Inc Modelo: DWY-80A, classe 0,5 Resolução: 0,1 °C Faixa nominal: - 80 °C a + 40 °C		
1.2. SISTEMA DE MEDIÇÃO REFERÊNCIA UTILIZADO NA CALIBRAÇÃO		
Termômetro digital para termopares de isolamento mineral acoplado a uma termorresistência PT100 Fabricante: Salcas Modelo: TM-210 Resolução: 0,01 °C Faixa nominal: - 40 °C a + 1760 °C		
Certificado de calibração emitido pelo Laboratório de Termometria da Consistec (CR-02153/19 – emitido em 04/04/2019)		
1.3. PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO		
A calibração foi feita por comparação com o sensor de temperatura de referência imerso em meio termostático homogêneo a uma profundidade de 70 mm, na faixa de – 40 °C a + 40 °C em intervalos espaçados de 10 °C com medição após 5 minutos de estabilização. Foram executados 3 ciclos completos avaliando o mensurando nos sentidos crescente (ida) e decrescente (volta).		
Data da calibração: 18 de junho de 2024		
Data de emissão do certificado: 21 de agosto de 2024		
Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente à máquina submetida à verificação nas condições especificadas, não sendo extensivo a outras máquinas.		



1.4. RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO

Página 2/4

Tabela 1 – Resultados da calibração sentido crescente de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$

Temperatura indicada pelo Banho Termostático ($^{\circ}\text{C}$)	Temperatura Medida ($^{\circ}\text{C}$)	Erro ($^{\circ}\text{C}$)	v_{eff}	k	U ($^{\circ}\text{C}$)
40,0	39,25	0,75	2	4,3	0,7820
30,0	29,32	0,68	25	2,06	0,0716
20,0	19,58	0,42	3	3,18	0,2691
10,0	10,02	-0,02	4	2,78	0,1496
0,0	0,43	-0,43	5	2,57	0,1244
-10,0	-8,97	-1,03	3	3,18	0,2775
-20,0	-18,53	-1,47	2	4,3	0,5919
-30,0	-28,26	-1,74	2	4,3	0,8641
-40,0	-38,03	-1,97	4	2,78	0,1523

Tabela 2 – Resultados da calibração no sentido crescente de $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$

Temperatura indicada pelo Banho Termostático ($^{\circ}\text{C}$)	Temperatura Medida ($^{\circ}\text{C}$)	Erro ($^{\circ}\text{C}$)	v_{eff}	k	U ($^{\circ}\text{C}$)
-40,0	-37,82	-2,18	3	3,18	0,2410
-30,0	-28,36	-1,64	2	4,3	0,4415
-20,0	-18,78	-1,22	2	4,3	0,8049
-10,0	-8,96	-1,04	2	4,3	0,4426
0,0	0,67	-0,67	2	4,3	0,4820
10,0	10,18	-0,18	188	1,96	0,0610
20,0	19,95	0,05	34	2,03	0,0688
30,0	29,66	0,34	297	1,96	0,0603
40,0	39,36	0,64	2	4,3	1,0645

Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente à máquina submetida à verificação nas condições especificadas, não sendo extensivo a outras máquinas.

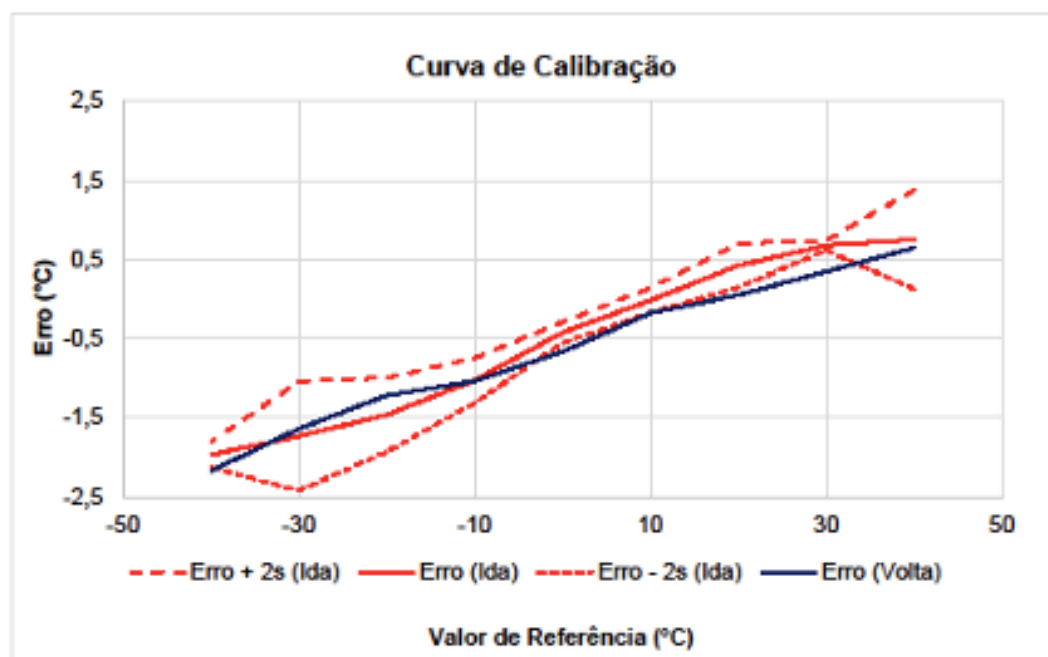


Figura 1 – Curva de calibração.

1.5. OUTROS PARÂMETROS

Histerese: 0,37 °C.

Não linearidade: 0,25 °C.

1.6. 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 ν_{eff} graus de liberdade efetivos corresponde a uma possibilidade de abrangência de 95 %.

1.7. TEMPERATURA

Temperatura ambiente: $20,0 \pm 1,0$ °C.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
LABORATÓRIO DE TECNOLOGIA EM ATRITO E DESGASTE
Avenida João Naves de Ávila, 2121, bloco 5F, Santa Mônica
38.400-902 – Uberlândia/MG



Página 4/4

Documento assinado digitalmente
gov.br RAFAEL MARQUES BORGES PACHECO
Data: 21/08/2024 15:59:42-0300
Verifique em <https://validar.br>

Eng. Rafael Marques Borges Pacheco
Operador

ROSENDA VALDES Assinado de forma digital
ARENCIBIA:21460 por ROSENDA VALDES
806808 ARENCIBIA:21460806808
Dados: 2024.08.21
15:59:39 -03'00'

Profa Rosenda Valdês Arencibia
Coordenadora do projeto

Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente à máquina submetida à verificação nas condições especificadas, não sendo extensivo a outras máquinas.