

**VITOR NAKAYAMA DE ARAÚJO PIRES FERREIRA E
BRUNO DE OLIVEIRA PRADO**

**UMA CONTRIBUIÇÃO PARA A AVALIAÇÃO DA
INCERTEZA ASSOCIADA AO MÓDULO DE
ELASTICIDADE E AOS LIMITES DE ESCOAMENTO E
DE RESISTÊNCIA. IMPLEMENTAÇÃO DOS
ROTEIROS DE CÁLCULO EM MATLAB**



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

2023

**VITOR NAKAYAMA DE ARAÚJO PIRES FERREIRA E
BRUNO DE OLIVEIRA PRADO**

**UMA CONTRIBUIÇÃO PARA A AVALIAÇÃO DA INCERTEZA
ASSOCIADA AO MÓDULO DE ELASTICIDADE E AOS LIMITES DE
ESCOAMENTO E DE RESISTÊNCIA. IMPLEMENTAÇÃO DOS
ROTEIROS DE CÁLCULO EM MATLAB**

Projeto de Fim de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para
a obtenção do título de **BACHAREL EM
ENGENHARIA MECÂNICA.**

Área de Concentração: Materiais e Processos de
Fabricação

Orientadora: Profa. Dra. Rosenda Valdés Arencibia

UBERLÂNDIA – MG

2023

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

F383
2023 Ferreira, Vitor Nakayama de Araújo Pires, 1999-
Uma contribuição para a avaliação da incerteza associada ao módulo de elasticidade e aos limites de escoamento e de resistência. Implementação dos roteiros de cálculo em MATLAB [recurso eletrônico] / Vitor Nakayama de Araújo Pires Ferreira. - 2023.

Orientadora: Rosenda Valdés Arencibia.
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em
Engenharia Mecânica.

Modo de acesso: Internet.

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia mecânica. I. Arencibia, Rosenda Valdés, 1969-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. 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 Curso de Graduação em Engenharia Mecânica
 Rodovia BR 050, KM 78, Bloco 1D, 2º andar - Bairro Glória, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
 Telefone: (34) 2512-6773 - www.mecanica.ufu.br - cocme@ufu.br



ATA DE DEFESA - GRADUAÇÃO

Curso de Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	FEMEC41100 - Projeto de Fim de Curso II				
Data:	28/06/2023	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	16:10
Matrícula do Discente:	11711EMC045 e 11711EMC031				
Nome do Discente:	Vitor Nakayama de Araújo Pires Ferreira e Bruno de Oliveira Prado				
Título do Trabalho:	UMA CONTRIBUIÇÃO PARA A AVALIAÇÃO DA INCERTEZA ASSOCIADA AO MÓDULO DE ELASTICIDADE E AOS LIMITES DE ESCOAMENTO E DE RESISTÊNCIA. IMPLEMENTAÇÃO DOS ROTEIROS DE CÁLCULO EM MATLAB				
A carga horária curricular foi cumprida integralmente?	<input checked="" type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não				

Reuniu-se, em ambiente virtual, plataforma online: [Microsoft Teams](#), a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, em **28/06/2023**, assim composta: [Prof. Dr. Luciano José Arantes - FEMEC/UFU](#), [Eng. Dr. José Eduardo Silveira Leal - LTAD/FEMEC/UFU](#) e [Profª. Drª. Rosenda Valdés Arencibia - FEMEC/UFU](#), orientadora dos candidatos.

Iniciando os trabalhos, a presidenta da mesa, [Profª. Drª. Rosenda Valdés Arencibia - FEMEC/UFU](#), apresentou a Comissão Examinadora e os candidatos, agradeceu a presença do público, e concedeu aos discentes a palavra, para a exposição do trabalho. A duração da apresentação dos discentes e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do curso.

A seguir a senhora presidenta concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir os candidatos. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando os candidatos:

(x) Aprovado sem nota.

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 28/06/2023, 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 **Luciano José Arantes, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/06/2023, às 16:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **José Eduardo Silveira Leal, Usuário Externo**, em 28/06/2023, às 16:10, 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 **4595047** e o código CRC **C02298C5**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida.

Aos meus pais, Juliana de Oliveira e Fabiano de Sousa Prado, por me guiarem com o suporte, amor e cuidado necessário. Ao meu irmão Matheus de Oliveira Prado pela parceria. Aos meus avós, Donizete de Oliveira Prado, Neudes Flores de Sousa Prado, Antônio Borges Neto e Marizeth Lopes da Silva, pelos exemplos de sabedoria e amor.

Às minhas orientadoras Professora Rosenda Valdés Arencibia e MSc. Joyce Antunes, por toda paciência, dedicação e cuidado realizando uma orientação impecável de forma responsável, leve e criteriosa. Ao meu amigo e parceiro de trabalho Vitor Nakayama pelos anos de companheirismo

Por fim, agradeço também a toda equipe do LTAD, Laprosolda, LEPU, Meta consultoria e Delta – Engenharia automotiva por terem contribuído com a minha graduação e crescimento pessoal.

Bruno de Oliveira Prado

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este Curso, tão prestigiado e reconhecido internacionalmente, com qualidade de ensino incomparável.

Aos meus pais, Daniela e José Ribamar, que guiaram meu crescimento com amor e cuidado, e que sempre colocaram a educação em primeiro lugar, e nunca pouparam esforços para que eu pudesse chegar aonde estou.

À minha namorada, Luísa, por todo o apoio e companheirismo, durante toda minha trajetória na graduação, compartilhou todos os momentos felizes e difíceis, que sempre foi um porto seguro, e a quem eu devo muito pela pessoa que sou.

Ao meu melhor amigo, Eduardo, com quem eu tive a sorte de dividir vários momentos memoráveis, difíceis e felizes ao longo da graduação, e que tenho o orgulho de ter ao meu lado após tantos anos, por todo o apoio, amizade e companheirismo.

À Profa. Dra. Rosenda Valdés Arencibia, pela dedicação inabalável e compromisso com a educação e o desenvolvimento da pesquisa, transmitindo muita motivação, e que sempre se mostrou acessível e aprazível e à MSc. Joyce, por todo o apoio prestado e disposição.

Ao meu companheiro de projeto e amigo, Bruno, que tive a oportunidade de desenvolver um laço de amizade muito forte e sincero, que me acompanhou ao longo do curso e com quem espero manter proximidade por muitos anos.

Vitor Nakayama de Araújo Pires Ferreira

FERREIRA V. N. A. P. e PRADO B. O. **Uma contribuição para a avaliação da incerteza associada ao módulo de elasticidade e aos limites de escoamento e de resistência. Implementação dos roteiros de cálculo em MATLAB.** 2023. 82 f. Projeto de Fim de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo contribuir com a avaliação da incerteza associada à medição do módulo de elasticidade e aos limites de escoamento e resistência implementando os roteiros de cálculo desenvolvidas por Antunes (2023) utilizando o *software* MATLAB®2019a. Todos os dados utilizados neste trabalho foram fornecidos por Antunes (2023) durante a realização de ensaios de tração de corpos de prova fabricados em aço AISI 4340 (28 HRC). Para a realização desse trabalho foi feito um estudo detalhado do método de ensaio, da instrumentação e do *software* utilizado. Após essa análise inicial foram identificados os mensurandos, as variáveis de entrada e os modelos matemáticos utilizados para o cálculo da incerteza de medição do módulo de elasticidade e dos limites de escoamento e de resistência. O método GUM e o de Monte Carlo foram aplicados em função da complexidade do modelo matemático em questão. Foram implementados três algoritmos, cuja estrutura foi dividida em blocos em função da quantidade de mensurandos considerados. Ainda, estes algoritmos foram criados de forma que durante o uso a interferência dos usuários seja mínima. A validação dos algoritmos foi efetuada por meio da comparação dos resultados obtidos via algoritmos implementados em MATLAB®2019a e aqueles decorrentes dos cálculos efetuados por Antunes (2023) utilizando o Excel. Foi observado que os três algoritmos permitem calcular a incerteza associada às três propriedades mecânicas objeto de estudo de forma satisfatória. Para a incerteza padrão combinada as diferenças observadas foram menores ou iguais a 0,25 %. Por outro lado, diferenças de até 2,12 % foram observados entre os valores de incerteza expandida do módulo de elasticidade.

Palavras-chave: Tenacidade à Fratura. Incerteza de Medição. MATLAB®2019a.

FERREIRA V. N. A. P. e PRADO B. O. **A contribution to the assessment of the uncertainty associated with the modulus of elasticity and yield and strength limits. Implementation of calculation scripts in MATLAB.** 2023. 82 f. Course Conclusion Project, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, MG.

ABSTRACT

This work aims to contribute to the evaluation of the measurement uncertainty associated with the modulus of elasticity and the yield and strength limits by implementing the calculation scripts developed by Antunes (2023) using the MATLAB®2019a software. All data used in this work were provided by Antunes (2023) during the performance of tensile tests on specimens made of AISI 4340 steel (28 HRC). To carry out this work, a detailed study of the test method, instrumentation and software used was carried out. After this initial analysis, all measurands, input variables and mathematical models used to calculate the measurement uncertainty of the modulus of elasticity and the yield and strength limits were identified. The GUM and Monte Carlo methods were applied depending on the complexity of the mathematical model in question. Three codes were created, whose structure was divided into blocks depending on the number of measurands considered. Furthermore, these codes were created in such a way that, during use, user interference is minimal. Code validation was carried out by comparing the results obtained via MATLAB®2019a and those resulting from the calculations performed by Antunes (2023) by using Excel. It was observed that the three codes allow the calculation of the uncertainty associated with the three mechanical properties under study adequately. For the combined standard uncertainty, the observed differences were less than or equal to 0.25 %. On the other hand, differences of up to 2.12 % were observed between the values of the expanded uncertainty of the modulus of elasticity.

Keywords: Fracture Toughness. Measurement uncertainty. MATLAB®2019a.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Distribuição retangular (BIPM et al, 2008)	08
Figura 2.2 – Distribuição triangular (BIPM et al, 2008)	09
Figura 2.3 – Representação de um caminho escolhido no método integrar J (modificada de Lopez, 2010)	14
Figura 2.4 – Gráfico de barras do módulo de elasticidade de alguns materiais (CALLISTER, 2012)	15
Figura 2.5 – Diagrama tensão deformação (modificada de HIBBELER, 2010)	16
Figura 3.1 – Dimensões do corpo de prova C(T) especificados pela ASTM E1820 (ASTM, 2020)	20
Figura 3.2 – Geometria e dimensões do corpo de prova para ensaio de tração, com dimensões em mm (ASTM E8, 2016)	21
Figura 3.3 – Diagrama de Ishikawa com os fatores de influência associados ao módulo de elasticidade (ANTUNES, 2023)	22
Figura 3.4 – Diagrama de Ishikawa com os fatores de influência associados ao limite de escoamento (ANTUNES, 2023)	22
Figura 3.5 – Diagrama de Ishikawa com os fatores de influência associados ao limite de resistência (ANTUNES, 2023)	23

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 –	Sistemas de medição utilizados na determinação dos mensurandos de interesse (Modificado de ANTUNES, 2023)	23
Tabela 3.2 –	Modelos matemáticos utilizados para avaliação da incerteza associada a todos os mensurandos considerados (Modificada de ANTUNES, 2023)	24
Tabela 3.3 –	Modelos matemáticos após o cálculo das derivadas parciais (Modificada de ANTUNES, 2023)	25
Tabela 3.4 –	Resumo das informações utilizadas no cálculo da incerteza padrão associada às variáveis de entrada (Adaptada de ANTUNES, 2023)	26
Tabela 4.1 –	Resultados obtidos pelos roteiros de cálculo para a avaliação da incerteza associada ao limite de escoamento, em comparação com os encontrados por Antunes (2023)	36
Tabela 4.2 –	Resultados obtidos pelos roteiros de cálculo para avaliação da incerteza associada ao limite de resistência, em comparação com os encontrados por Antunes (2023)	36
Tabela 4.3 –	Resultados obtidos pelos roteiros de cálculo para a avaliação da incerteza associada ao módulo de elasticidade, em comparação com os encontrados por Antunes (2023)	37

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	01
1.1 Objetivo Principal	02
1.2 Objetivos secundário	02
1.3 Contribuição	02
1.4 Estrutura do Trabalho de conclusão de curso	03
CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	04
2.1 Incerteza de medição	04
2.1.1 Método de Monte Carlo.....	10
2.2 Tenacidade à fratura	12
2.3 Módulo de elasticidade.....	15
2.4 Limite de escoamento	16
2.5 MATLAB	17
CAPÍTULO III – METODOLOGIA	19
3.1 Ensaio Integral J para determinar a tenacidade a fratura do aço AISI 4340, o módulo de elasticidade e os limites de escoamento e de resistência	19
3.2 Avaliação da incerteza de medição associada ao módulo de elasticidade e aos limites de escoamento e resistência	22
3.2.1 Definição dos modelos matemáticos	24
3.2.2 Cálculo da incerteza padrão associada às variáveis de entrada	26
3.2.3 Cálculo da incerteza padrão combinada e da expandida associada às variáveis de saída para o método GUM	26
3.3 Implementação e validação dos roteiros de cálculo em MATLAB®R2019a	27
CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
4.1 Código implementado em MATLAB para o limite de escoamento	30
4.2 Valores de incerteza obtidos via MATLAB, para validação dos roteiros desenvolvidos	36
CAPÍTULO V – CONCLUSÃO	38
5.1 Sugestões para trabalhos futuros	39

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40
---	-----------

APÊNDICES

A - Algoritmo completo para o módulo de elasticidade	43
B - Algoritmo completo para o limite de escoamento	50
C - Algoritmo completo para o limite de resistência	54

ANEXOS

1 - Certificado de calibração do paquímetro digital	58
2 - Certificado de calibração da Instron®, modelo 2620-604	60
3 - Certificado de calibração do extensômetro eletromecânico	64
4 - Certificado de calibração do termo-higrômetro digital	68

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A tenacidade à fratura é uma propriedade que indica a capacidade que o material possui de resistir à propagação de uma trinca e, portanto, é utilizada na fase de projeto de equipamentos, bem como no reparo de componentes que estão em operação. Diferentes parâmetros foram criados para estimar a tenacidade à fratura do material, quais sejam: o fator de intensidade de tensão (K); a integral J e o deslocamento de abertura na ponta da trinca (CTOD).

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

Independentemente do método de ensaio ou do parâmetro utilizado para estimar a tenacidade à fratura, existe uma dificuldade adicional na determinação da incerteza associada. Este fato pode ser justificado por dois motivos, o primeiro está relacionado com o significativo número de fatores de influência que pode contribuir para a incerteza final. Enquanto o segundo, se deve à complexidade dos modelos matemáticos utilizados nos cálculos. Assim sendo, a maioria dos valores de tenacidade à fratura disponíveis na literatura carecem da rastreabilidade metrológica exigida pela NBR ISO/IEC 17025 (ABNT, 2017). Uma primeira tentativa para solucionar este problema foi realizada por Koepke *et al.* (2023). Estes autores aplicaram de forma satisfatória o método de Monte Carlo para calcular a incerteza padrão associada aos parâmetros a_{0q} , α e η utilizados nas equações para cálculo da tenacidade à fratura via ensaios CTOD-R e J-R. Eles também investigaram o efeito de

diferentes distribuições de probabilidades (normal, retangular e triangular) das tolerâncias especificadas para os mensurandos e as variáveis de entrada nos resultados.

Antunes (2023) avaliou a incerteza associada à tenacidade à fratura obtida via ensaios convencionais (Integral J) de acordo com as determinações da norma ASTM E1820 (ASTM, 2018). Devido à complexidade dos cálculos e a grande quantidade de dados que devem ser manipulados surgiu a necessidade de implementar em MATLAB os roteiros de cálculo desenvolvidos por esta autora.

1.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho de conclusão de curso foi implementar via MATLAB®2019a os roteiros desenvolvidos por Antunes (2023). Estes algoritmos permitem avaliar a incerteza associada ao módulo de elasticidade e os limites de escoamento e resistência. Desta forma se contribui com um trabalho maior de avaliação da incerteza da tenacidade à fratura do material em estudo, o aço AISI 4340, seguindo a norma ASTM E1820 (ASTM, 2018), desenvolvendo os três primeiros algoritmos em MATLAB®2019a.

1.2 Objetivos secundários

Como objetivos secundários, pode-se citar.

- Reduzir os erros de cálculo durante a avaliação da incerteza de medição associada ao módulo de elasticidade e aos limites de escoamento e de resistência.
- Contribuir para a rastreabilidade dos valores de tenacidade a fratura, visando o atendimento da NBR/IEC 17025 (2017).
- Contribuir para a popularização do cálculo da incerteza de medição.

1.3 Contribuição

Foram implementados três algoritmos em MATLAB para cálculo da incerteza associada ao módulo de elasticidade e aos limites de escoamento e de resistência. Estes algoritmos podem ser utilizados como modelos para o cálculo da incerteza de outros mensurandos.

1.4 Estrutura do trabalho de conclusão de curso

Este projeto final de curso é estruturado em cinco capítulos, incluindo esta introdução, capítulo I. O segundo capítulo é destinado a revisão bibliográfica, abordando os diversos trabalhos publicados a nível nacional e internacional, para o reconhecimento da tenacidade à fratura, incerteza associada, bem como a norma ASTM E1820 (ASTM, 2018). Já o capítulo III apresenta a metodologia proposta para alcançar os objetivos do projeto. Por sua vez, o capítulo IV mostra os resultados obtidos, que se resumem aos algoritmos que foram desenvolvidos e a sua validação dos resultados. Por fim, no capítulo V, são apresentadas as conclusões e as propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos utilizados para desenvolvimento do trabalho.

2.1. Incerteza de medição

A necessidade de aperfeiçoamento e criação de novas tecnologias impulsionou o desenvolvimento da indústria, resultando em diversos benefícios para a sociedade (PRATAP; DYAKONOV, 2016), além de trazer, consigo, novas demandas. É fundamental, para qualquer empresa, garantir a confiabilidade dos produtos que estão sendo desenvolvidos e reduzir seus custos de produção e operação. Para alcançar esse objetivo e manter sua competitividade no mercado, diversas metodologias são empregadas, como o *Lean Manufacturing*, cujo objetivo geral é a implementação da melhoria contínua de processos, em conjunto com a eliminação de desperdícios, redução de custos e melhoria da qualidade (CENTENO; HUAYANAY, 2022).

Desse modo, para garantir que o produto atenda as especificações desejadas de qualidade, é necessário realizar diversas medições das variáveis de controle e, para atender essa demanda, a metrologia tem crescido em importância em todas as áreas de conhecimento (SOARES JÚNIOR, 1999), principalmente nas etapas de produção de bens.

A BS EM ISO 5198 (ISO, 1999) declara que todo e qualquer sistema de medição, por mais preciso e exato que seja, possui imperfeições, tais que influenciam nos resultados de medição. Assim, sempre se obtém valores diferentes do real valor do mensurando. O erro sistemático é a quantificação desse afastamento, e a dispersão dos valores obtidos nos processos de medição é proveniente dos efeitos aleatórios.

Os erros de medição são classificados em dois tipos, erros sistemáticos e aleatórios. Um erro sistemático é definido como um desvio associado ao valor medido e sua estimativa é denominada como tendência, e pode ser determinada pela diferença entre a média dos

valores obtidos durante a medição e o valor conhecido do mensurando (valor convencional, ou valor de referência). Os erros aleatórios são associados à variabilidade dos resultados obtidos em múltiplas medições. Segundo o comitê conjunto de guias em metrologia (JCGM, 2009), a dispersão dos dados observada para repetidas medidas de uma mesma grandeza pode ser calculada com o desvio padrão dos valores obtidos. A causa desta dispersão é atribuída aos erros aleatórios.

Os erros sistemáticos podem e devem ser corrigidos, mas não é possível eliminá-los completamente. A incerteza de medição é a soma do erro sistemático residual e dos erros aleatórios. Esses fatores tendem a ser mais relevantes quanto menores são as tolerâncias permitidas, como na indústria de miniaturização de produtos ou no campo da eletromecânica. Atualmente, é obrigatório, para se garantir a validade do ensaio de medição, a associação de uma incerteza ao resultado obtido e os elementos necessários para confirmar a rastreabilidade metrológica são uma cadeia de rastreabilidade pautada em um padrão nacional ou internacional.

O guia para a expressão da incerteza de medição, conhecido como GUM, foi publicado em 1993 pela *International Organization for Standardization* (ISO) e tem como objetivo uniformizar e direcionar o cálculo e a declaração de incerteza de medição, visto que a realização do cálculo de incerteza é intrinsecamente detalhada, envolvendo diversas etapas. Para Dias (2016), a obtenção da incerteza padrão combinada pode ser uma tarefa bastante complexa, se o propósito de uso e do nível de exatidão necessários forem altos.

Segundo a BIPM *et al.* (2008), como todo e qualquer processo de medição é passível de erros, todas as grandezas que influenciam no processo de medição e seu resultado devem ser indicadas na etapa inicial de determinação da incerteza. A quantidade e o tipo de componente variam para cada sistema de medição, além do tipo do mensurando e o nível necessário de exatidão. Tais componentes podem ser provenientes de equipamentos, condições ambientes ou do operador que realizará a medição. Esse processo de determinação dos fatores de influência, ou identificação das variáveis de entrada, é considerado por Valdés *et al.* (2019), dentre as etapas de avaliação de incerteza, como uma das mais complexas.

Segundo Couto (2002), as principais etapas para avaliação da incerteza de medição pelo método GUM são:

- Identificação do mensurando (variável de saída);
- Identificação das grandezas de influência (variáveis de entrada);
- Proposição de um modelo matemático que relaciona as variáveis de entrada e a variável de saída;
- Determinação da incerteza padrão associada às variáveis de entrada;

- Determinação da incerteza padrão combinada associada à variável de saída;
- Cálculo dos graus de liberdade efetivos;
- Determinação da incerteza expandida da variável de saída;

Em relação ao modelo matemático, este deve ser proposto assim que forem identificadas as variáveis de entrada e de saída, conforme a Eq. (2.1), sendo indispensável para a aplicação da lei de propagação de incerteza.

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (2.1)$$

Desse modo, a partir da Eq. (2.1), é possível obter a estimativa do mensurando Y , designada como y , baseando-se em um conjunto de estimativas de entrada $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, sendo N a quantidade de grandezas identificadas $X_1, X_2, X_3, \dots, X_N$. Assim, o resultado será conforme a Eq. (2.2).

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (2.2)$$

A incerteza padrão combinada é determinada pela Eq (2.3), se for considerado que as grandezas de entrada envolvidas forem $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ estatisticamente independentes entre si.

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i) \cdot u(x_j) \cdot r(x_i, x_j) \quad (2.3)$$

Na Equação (2.3), $u_c^2(y)$ é a incerteza padrão combinada da variável de saída, ou mensurando, $u(x_i)$ é a incerteza padrão das variáveis de entrada, x_i e x_j são as estimativas das variáveis X_i e X_j e $u(x_i, x_j) = u(x_i, x_j)$ é a concordância estimada. O coeficiente de correlação estimado, dado pela Eq. (2.4), caracteriza o grau de correlação entre x_i e x_j .

$$r(x_i, x_j) = \frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i) u(x_j)} \quad (2.4)$$

O BIPM et al. (2008) define que a incerteza de medição associada às estimativas das grandezas de entrada deve ser avaliada a partir de dois critérios distintos, denominados como avaliação tipo A ou B. A primeira consiste em avaliar a incerteza por análise estatística de

uma série de observações independentes para uma grandeza fixa de entrada, sob as mesmas condições de medição, sendo que a incerteza padrão é o próprio desvio padrão experimental da média que resulta das leituras. Já a avaliação do tipo B da incerteza padrão baseia-se em informações tais como experiências anteriores, especificações de fabricantes, considerações de manuais e certificados de calibração. Além disso, é possível utilizar diferentes distribuições de probabilidade durante os cálculos, Normal ou *t-Student*, em vista da quantidade de dados disponíveis para a avaliação.

A avaliação do tipo A de incerteza padrão pode ser utilizada quando existe um conjunto de valores de variáveis de entrada x_i , em condições de repetibilidade. Neste caso a incerteza padrão pode ser determinada como mostra a Eq. (2.5).

$$u(\bar{x}_i) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} \quad (2.5)$$

Na Equação (2.5), $s(x_i)$ é o desvio padrão dos valores do conjunto de repetições e n é o número de repetições.

A distribuição retangular, conforme mostrado na Fig. 2.1, é utilizada quando é possível estimar apenas os limites superior e inferior de X_i , definir que a probabilidade de que o valor X_i pertença ao seguinte intervalo $(a-, a+)$ é igual a um e, também, que a probabilidade do valor de X_i não estar nesse intervalo é igual a zero. Se não houver conhecimento específico para os possíveis valores de X_i que estão no intervalo, pode-se assumir que é igualmente provável que X_i está em qualquer ponto do intervalo e, conseqüentemente, seu grau de liberdade é infinito. Assim, a incerteza padrão será dada pela Eq. (2.6) e, nesse caso, são adotados infinitos graus de liberdade.

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (2.6)$$

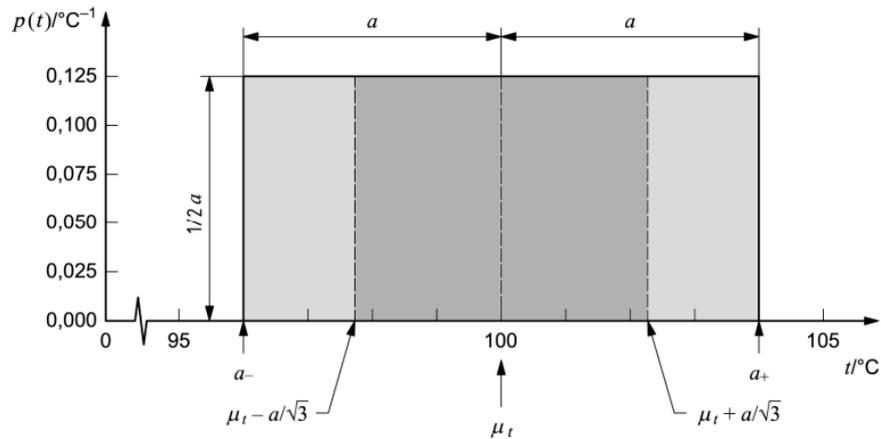


Figura 2.1 – Distribuição retangular (BIPM et al, 2008).

A função densidade de probabilidade da distribuição retangular, é dada pela Eq. (2.7).

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{2}, & (\mu - a) \leq x \leq (\mu + a) \\ 0, & \text{restante } x \end{cases} \quad (2.7)$$

Se houver mais informação disponível sobre a distribuição de valores possíveis da grandeza, a distribuição será considerada como triangular, conforme mostrado na Fig. 2.2, e tendo infinitos graus de liberdade, de modo que, sabendo que x_i segue uma distribuição do tipo triangular no intervalo $(a-, a+)$, a estimativa da incerteza padrão será descrita pela Eq. (2.8).

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{6}} \quad (2.8)$$

A densidade de probabilidade para a distribuição triangular, pode ser dada pela seguinte Eq. (2.9).

$$f(x) = \begin{cases} \frac{x + a}{a^2}, & -a \leq x \leq 0 \\ \frac{a - x}{a^2}, & 0 \leq x \leq a \\ 0, & \text{restante } x \end{cases} \quad (2.9)$$

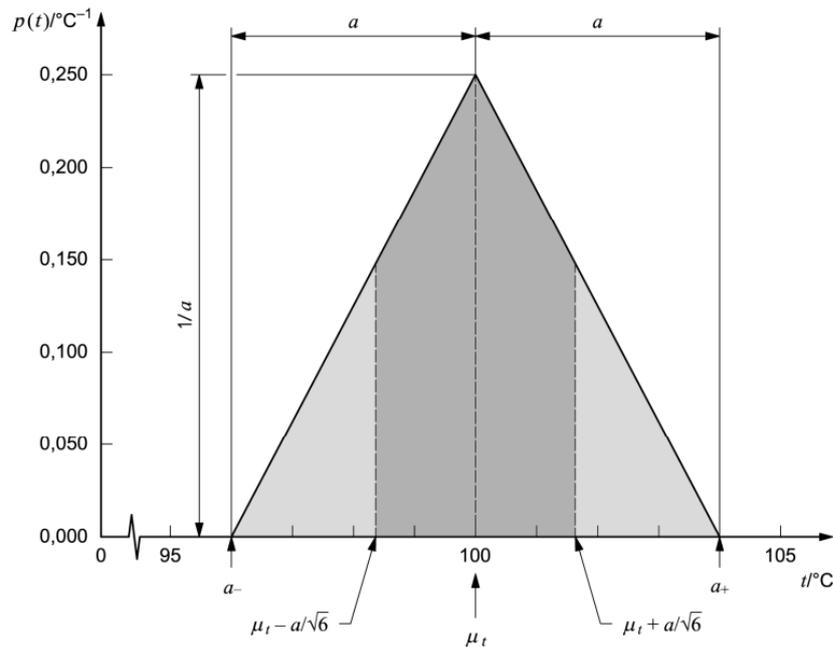


Figura 2.2 – Distribuição triangular (BIPM et al, 2008).

Quando as informações sobre uma fonte de entrada são obtidas de um certificado de calibração, a estimativa de incerteza padrão $u(x_i)$ é dada pela Eq. (2.10), em que $U(x_i)$ é a incerteza expandida de x_i e k é o fator de abrangência, ambos declarados no certificado de calibração. Tanto os graus de liberdade, quanto a distribuição de probabilidade devem ser fornecidos no certificado de calibração.

$$u(x_i) = \frac{U(x_i)}{k} \quad (2.10)$$

Após o cálculo da incerteza padrão de todas as variáveis de entrada, deve ser calculada a incerteza padrão combinada associada a esta, como indicado na Eq. (2.3). Em seguida, é necessário calcular o número de graus de liberdade efetivos (v_{ef}) para determinar o valor do fator de abrangência da medição, k . Seguindo o método GUM, utiliza-se a equação de Welch-Satterhwaite, conforme a Eq. (2.11).

$$v_{ef} = \frac{u_c(y)^4}{\left[\sum_i^N \frac{(u(x_i) \cdot C(x_i))^4}{V_i} \right]} \quad (2.11)$$

Em seguida, a incerteza expandida associada à variável de saída é determinada como mostra a Eq. (2.12).

$$U(y) = k \cdot u_c^2 \quad (2.12)$$

Por fim, utiliza-se a Eq. (2.13) para o cálculo da contribuição de cada variável de entrada na incerteza final.

$$Cont(y) = \frac{u^2(x_i) \cdot 100\%}{u_c^2(y)} \quad (2.13)$$

2.1.1. Método de Monte Carlo

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

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

A base para aplicação do método de Monte Carlo é o método do GUM. As primeiras etapas até o cálculo da incerteza padrão são as mesmas. A diferença está em que no método GUM se aplica a lei de propagação de incertezas no modelo matemático da medição para determinar a incerteza padrão combinada e no método de Monte Carlo números aleatórios são gerados para cada variável de entrada. Para tanto são utilizados o valor mais provável da variável de entrada em questão e sua respectiva incerteza padrão. A cada número gerado atribui-se o nome de iteração, que de acordo com o INMETRO (2008) devem ser realizadas 1 000 000 de iterações.

Quando os números de todas as variáveis de entrada forem gerados, é necessário propaga-los utilizando o modelo matemático da medição. Desta forma são obtidos os valores do mensurando. Em seguida, são determinados os valores de incerteza-padrão combinada e expandida da variável de saída. Também é elaborado um histograma para identificar o formato da distribuição dos valores simulados do mensurando.

Se a distribuição de probabilidade dos valores simulados do mensurando for normal, basta calcular o desvio padrão populacional para conhecer a incerteza-padrão combinada,

com um nível de abrangência de 68,27 %. A incerteza expandida, com nível de abrangência de 95,45 % é obtida em ao multiplicar a incerteza-padrão combinada por 2,00, sendo está uma aproximação.

O coeficiente de assimetria e a curtose também devem ser calculados. Eles indicam se os resultados obtidos via simulação de Monte Carlo são normais ou não, eliminando a necessidade de um teste de normalidade. Considerando uma distribuição normal ideal, os valores do coeficiente de assimetria e a curtose assumem os 0 e 3, respectivamente.

Rodrigues et al., (2021) avaliaram de forma pioneira a incerteza associada à tenacidade à fratura (K_{IC}) obtida via ensaios (*SNTT- Spiral Notch Torsion Test*) usando os métodos GUM e Monte Carlo. Durante a simulação de Monte Carlo, 10^6 iterações foram realizadas usando o Microsoft Excel 2020. A incerteza expandida associada ao K_{IC} foi $1,8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, que representa 1,76 % do valor médio ($102,2 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$).

Jeon et al., (2009) apresentaram um modelo simplificado para estimativa da incerteza associada às propriedades de tração obtidas via ensaio de indentação instrumentada. Os autores observaram incertezas da ordem de 18,9 % e 9,8 % para a resistência ao escoamento e à tração, respectivamente. Se observa que estes valores de incerteza são significativamente maiores que aqueles obtidos por Rodrigues et al., (2021) para a tenacidade à fratura.

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

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

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

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

2.2. Tenacidade a fratura

A tenacidade a fratura é uma propriedade que indica a resistência de um material à fratura frágil na presença de algum defeito, desde trincas a qualquer descontinuidade, inclusão ou fases dispersas no material que possa ser concentradores de tensão (CALLISTER, 2007). A Equação (2.14) foi desenvolvida a partir dos princípios de mecânica da fratura, relacionando a tensão crítica para a propagação de trinca e o comprimento da trinca, de modo a quantificar a tenacidade à fratura do material. Nela, K_c é a tenacidade a fratura, σ_c a tensão crítica para a propagação da trinca, a é o comprimento da trinca e Y um parâmetro ou função adimensional, dependente do tamanho e geometria da trinca e da amostra, assim como do modo de aplicação da força.

$$K_c = Y\sigma_c\sqrt{\pi a} \quad (2.14)$$

É possível observar que esse valor é obtido em função das dimensões do defeito, seu formato, dimensões do corpo de prova e a forma de aplicação da força durante a realização dos ensaios de determinação da tenacidade à fratura.

Para analisar o desempenho do material, em um ensaio de tenacidade à fratura, é necessário conhecer o comportamento relacionado à resistência e deformação do material, visto que existem três classificações, elástico linear, elástico não linear e elastoplástica. A

partir desse parâmetro, será determinado o ensaio de fratura ideal para cada material e, conseqüentemente, o parâmetro que deve ser utilizado para descrever a tenacidade do mesmo.

A mecânica da fratura elastoplástica (MFEP) possibilita realizar estudos do desenvolvimento da trinca e também, sobre a tenacidade a fratura se for considerado que a ponta da trinca se deforma plasticamente (HAAG, 2012). Essa metodologia, pode ser realizada, a partir de duas abordagens, sendo elas a CTOD e a integral J, a primeira é fundamentada em conceitos físicos, já a segunda é baseada em equações de balanço de energia. Porém, Anderson (2005) afirma que ambos os métodos são capazes de fornecer parâmetros que podem ser utilizados para a análise de fraturas. Além disso, essas metodologias apresentam a seguinte consideração, seus valores críticos, apresentam baixa dependência com as dimensões do corpo de prova, a ser utilizado.

A metodologia integral-J foi proposta no ano de (1968) por Rice, baseado nos conceitos da teoria da plasticidade, descrevendo a intensidade dos campos elastoplásticos que são desenvolvidos na ponta de uma trinca, sendo este, diretamente relacionado à mecânica da fratura elastoplástica, podendo ser entendida como um balanço energético que tem como objetivo, generalizar a taxa de liberação de energia potencial na trinca, em relação à sua variação de comprimento. Essa metodologia, quantifica a energia elástica não-linear, de modo que, uma curva J-R é determinada pela resistência do material à propagação estável da trinca em termos de J. A ASTM E1820 (2020) tem como objetivo, regulamentar a determinação das curvas de tenacidade de iniciação elastoplástica (J_{ic}), já que a sua determinação requer cuidados.

$$J = \int_{\Gamma} \left(W dy - \bar{T} \cdot \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) ds \quad (2.15)$$

Na Equação (2.15), Γ é o contorno escolhido a ser seguido (Fig. 2.3), percorrido em sentido anti-horário, com início e final não coincidentes em cada uma das faces da trinca, W é a densidade de energia de deformação, \bar{T} é o vetor tensão, que é definido pela normal \bar{n} , ao contorno, \bar{u} é o vetor de deslocamento na direção x e S é o comprimento do caminho.

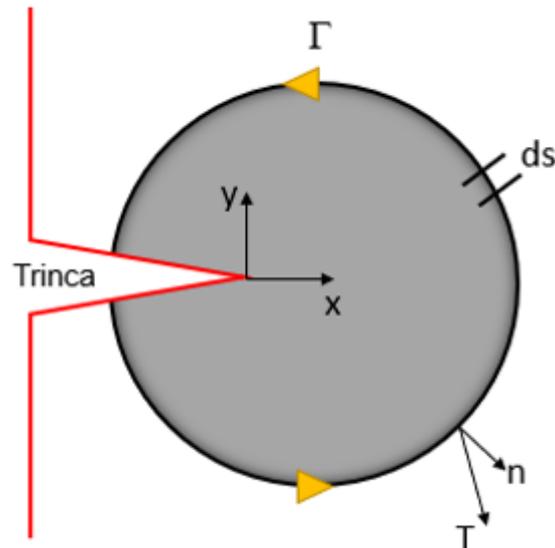


Figura 2.3 – Representação de um caminho escolhido no método integral J (modificada de Lopez, 2010).

A integral J não depende do estado de tensões na frente da trinca, ou seja, ela é calculada de forma independente do caminho (RICE, 1968). Medina (2014) afirmou que o crescimento de trincas em materiais não lineares é um processo estável e lento, pois há uma resistência do material, provocada pelo modo de deformação a que ele experimenta, a medida em que a trinca se propaga. Durante o ensaio de determinação da integral J, é necessário medir tanto a força aplicada quanto o deslocamento na linha de aplicação da força. Além disso, ASTM E1820 (ASTM, 2020) propõe a construção de uma curva J-R para determinar um valor de J_{IC} , o que requer a medição do comprimento da trinca, durante o ensaio, sendo este valor a integral J a partir do qual tem-se o início de uma propagação dúctil da trinca. Como é impossível se determinar o ponto exato onde se inicia e estabiliza o crescimento da falha, a definição do valor de J_{IC} é feita de forma arbitrária.

Os ensaios da integral J podem ser divididos em dois grupos, sendo eles, ensaio de um único corpo de prova e ensaio de múltiplos corpos de prova. No segundo caso, vários corpos de prova são carregados até o momento em que ocorre a propagação dúctil da trinca, depois, o corpo de prova é descarregado, quebrado e o comprimento da trinca é medido na superfície da fratura. Cada teste é utilizado para se determinar um ponto na curva J-R, nesse teste, segundo a ASTM E1820 (ASTM, 2020) determina que nesse ensaio é determinado o J_{IC} no início da propagação dúctil, de modo que, não se faz necessário a criação de uma curva J-R completa.

A curva *J-R* completa deve ser obtida, para o ensaio de um único corpo de prova, para isso, foram desenvolvidos dois métodos com os comprimentos de trinca sendo monitorado durante o ensaio. O método da flexibilidade elástica com descarregamento é o mais utilizado, esse processo, foi proposto por Clarke *et al.* (1976) e depois padronizado pela norma ASTM E813 (ASTM, 1981). Em 1979, esse método, foi aprimorado por Joyce e Gudas (1979) com a criação de um programa computacional interativo para a realização de uma série de ensaios para a avaliação da flexibilidade elástica do corpo de prova. Atualmente, a norma ASTM E1820 (2020) determina como deve ser feita a medição do comprimento da trinca instantâneo e a construção da curva *J-R*.

2.3. Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade é a propriedade mecânica que permite avaliar a resistência do material à deformação elástica, constituído de uma forma de medida da rigidez de um elemento estrutural. Ou seja, o módulo de elasticidade, define o comportamento que um material tem para se deformar com facilidade ou não, se submetidos a solicitações mecânicas, desse modo, os materiais em que, o módulo de elasticidade é alto, não se deformam com facilidade. Em materiais compostos, com o exemplo o concreto, essa relação entre a tensão exercida sobre o material e a sua deformação não segue um padrão linear, como alguma materiais na fase elástica, desse modo, a determinação do seu módulo de elasticidade, apresenta algumas particularidades (VOGT, 2006).

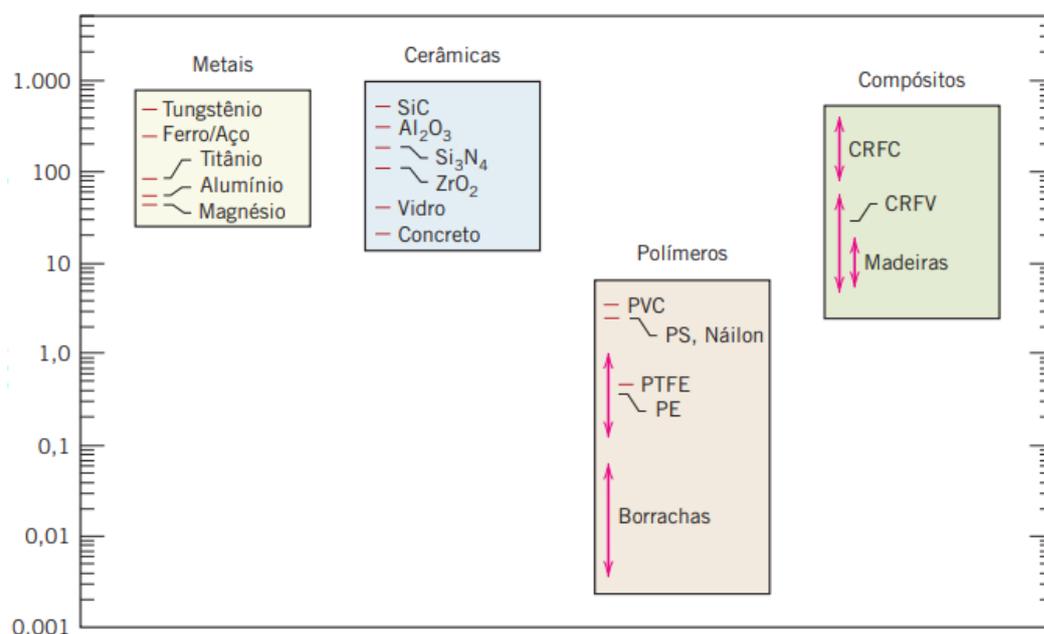


Figura 2.4 – Gráfico de barras do módulo de elasticidade de alguns materiais (CALLISTER, 2012).

Para garantir a compatibilidade metrológica da medição, são utilizadas técnicas de ensaio padronizadas. As sociedades profissionais frequentemente fazem a coordenação não só das publicações das normas padrão, mas também dos estabelecimentos. A ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) no Brasil, a ASTM (*American Society for Testing and Materials*) nos estados unidos são exemplos dessas sociedades responsáveis pela padronização dos ensaios de materiais. As publicações dessas instituições são divulgadas anualmente e uma série de normas está relacionada à determinação do módulo de elasticidade (COSSOLINO; PEREIRA, 2010).

2.4. Limite de escoamento

A ocorrência de fraturas é um obstáculo que vem crescendo junto com o desenvolvimento tecnológico, pois, tecnologias mais complexas tem consequentemente comportamentos estruturais com menor grau de previsibilidade (RODRIGUES, 2020). A grande maioria das estruturas é projetada, para que ocorram apenas deformações elásticas, se submetidas a qualquer tipo de esforço (CALLISTER, 2008). Desse modo, é importante se conhecer o nível de tensão em que ocorre o início da deformação plástica, o limite de escoamento é o valor da tensão, em que após liberada, promove uma deformação residual de 0,2 % no material.

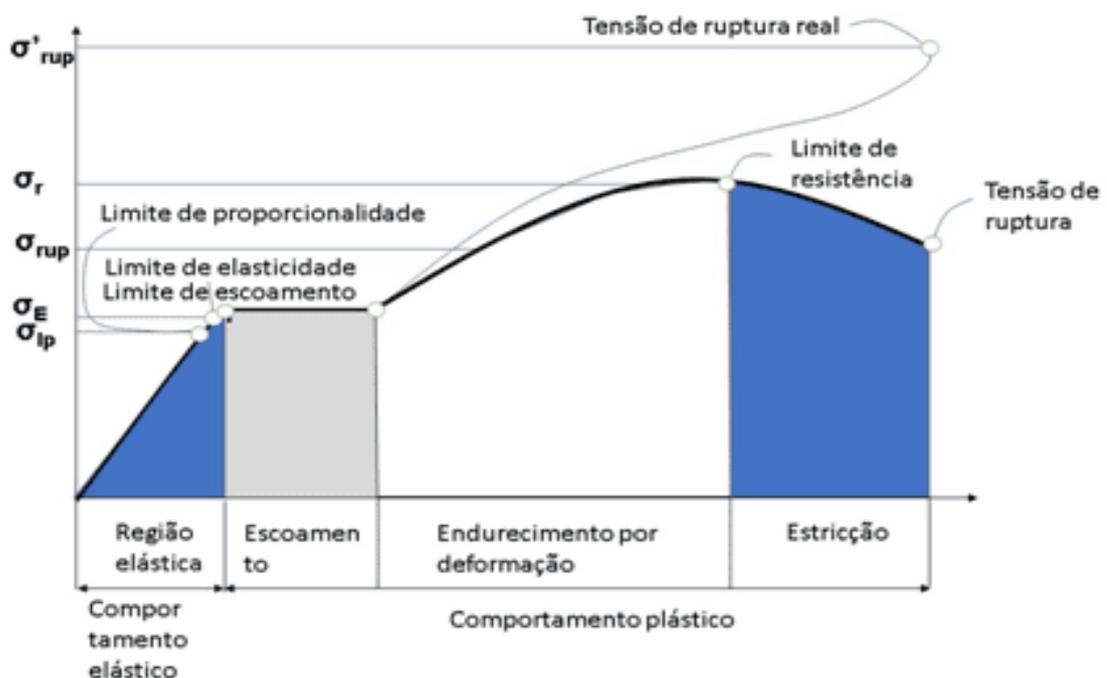


Figura 2.5 – Diagrama tensão deformação (modificada de HIBBELER, 2010).

2.5. MATLAB

Diversos *softwares* podem ser utilizados para desenvolver os cálculos de estudos de avaliação de incerteza, sendo que uma das principais alternativas é a plataforma MATLAB® (*Matrix Laboratory*), desenvolvido pela empresa MathWorks®, amplamente utilizado em diversas aplicações de matemática computacional, para modelagens matemáticas, análise e desenvolvimento de sistemas e produtos, dentre diversas outras.

Dentre algumas de suas principais vantagens, podem ser citadas a ampla variedade de métodos de computação numérica para análise de dados, desenvolvimento de algoritmos e criação de modelos matemáticos, pela alta capacidade de processamento de cálculos complexos sem perdas de desempenho, por utilizar bibliotecas otimizadas para vetores e matrizes, além de utilizar uma abordagem de cálculo iterativo e vários autores implementaram e desenvolveram algoritmos em MATLAB nos estudos de avaliação de incerteza e seus métodos de cálculo.

Reis (2022) avaliou a incerteza associada ao módulo de elasticidade a partir de ensaios de tração em corpos de prova de seção transversal cilíndrica, com leitura direta dos arquivos gerados pelo equipamento de teste, utilizados como base dos cálculos implementados, obtendo valores de incerteza expandida condizentes com aqueles encontrados na literatura.

Leal *et al.* (2020) desenvolveram uma abordagem para avaliar o desempenho de convergência do método de Monte Carlo Adaptativo, denominada como Monte Carlo Sequencial, fundamentado nos princípios dos métodos GUM e GUM S1, sendo aplicado para estimar a incerteza de medições efetuadas com paquímetro, micrômetro externo, projetor de perfil e rugosímetro. Seus resultados incluem a observação de maior repetibilidade e confiabilidade em relação ao Monte Carlo Adaptativo, além de uma nova forma de armazenamento de dados decorrentes de simulações, reduzindo significativamente o volume de dados em manipulação. Estes autores utilizaram o MATLAB® R2014b para gerar números aleatórios e propagar incertezas.

Valdés *et al.*, (2019) implementaram utilizando o MATLAB® R2014b os algoritmos de cálculo da incerteza de medição de três mensurandos, quais sejam: comprimento medido com régua, diâmetro externo medido com paquímetro e altura medida com micrômetro. Vale ressaltar que para os três mensurandos o método GUM e o de Monte Carlo foram aplicados.

O uso de rotinas de cálculo implementadas em MATLAB® também pode ser observado em outros campos de estudo. Si, Jin e Jin (2023) utilizaram os recursos do *software* na simulação do monitoramento de robôs industriais em ambientes aquáticos. Reis (2021), ao avaliar o balanceamento de máquinas rotativas utilizando metamodelos Kriging. Sreeraj,

Kannan e Maji (2013), na predição e otimização da geometria de cordões de solda em processos de soldagem a arco.

Diversos trabalhos da literatura utilizam os recursos disponíveis no MATLAB® para realizar análises matemáticas e de sistemas, o que ajuda a comprovar a eficácia, ampla empregabilidade e versatilidade do *software*.

Neste trabalho, foi utilizada a versão R2019b para implementar as rotinas de cálculo durante a avaliação da incerteza associada aos limites de escoamento e resistência a partir de ensaios de tração em corpos de prova de seção cilíndrica, fabricados em aço 4340.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia proposta para implementação em MATLAB®R2019a dos algoritmos de cálculo da incerteza de medição associada ao módulo de elasticidade e aos limites de escoamento e resistência. Vale ressaltar que os algoritmos foram elaborados por Antunes (2023) e que, no presente trabalho apenas, foi efetuada a implementação e validação dos algoritmos. Esta validação foi feita comparando os resultados obtidos via algoritmo MATLAB®R2019a àqueles obtidos via Excel por Antunes (2023). Entretanto, para um melhor entendimento, este capítulo foi dividido nas seguintes etapas: metodologia de ensaio de integral J para determinar a tenacidade a fratura do aço AISI 4340, o módulo de elasticidade e os limites de escoamento e de resistência; avaliação da incerteza associada ao módulo de elasticidade e aos limites de escoamento e resistência; e implementação e validação dos roteiros de cálculo em MATLAB®R2019a

3.1. Ensaio Integral J para determinar a tenacidade a fratura do aço AISI 4340, o módulo de elasticidade e os limites de escoamento e de resistência

A ASTM E1820 (ASTM, 2020) (integral J ou ensaio J_{ic}) padroniza os ensaios de tenacidade à fratura. Antunes (2023) calculou a incerteza associada ao valor de J obtido em conformidade com a norma citada para o aço AISI 4340 (28 HRC). Para a realização dos ensaios foi utilizada uma máquina de ensaio universal, fabricada pela Instron® modelo 8801, com faixa nominal de ± 100 kN. O equipamento foi calibrado seguindo as determinações de ISO 7500-1 (ISO, 2004), no laboratório de tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD). O certificado de calibração do equipamento, declara uma incerteza expandida de 0,09 kN, para um fator de abrangência de 95 % em um intervalo de força de 22,4745 kN a 100,1324 kN.

Os resultados foram obtidos ensaiando corpos de prova (CP) do tipo *Compact Tension*, C(T). A Figura 3.1 mostra o desenho técnico do corpo de prova C(T). Os quatro corpos de prova ensaiados foram retirados de chapas de aço AISI 4340, de dimensões $250 \text{ mm}^3 \times 25 \text{ mm}^3 \times 32 \text{ mm}^3$, por meio de uma máquina de eletroerosão a fio, da marca Agie Charmiles modelo FW2U, com um fio de molibdênio com diâmetro de 0,18 mm.

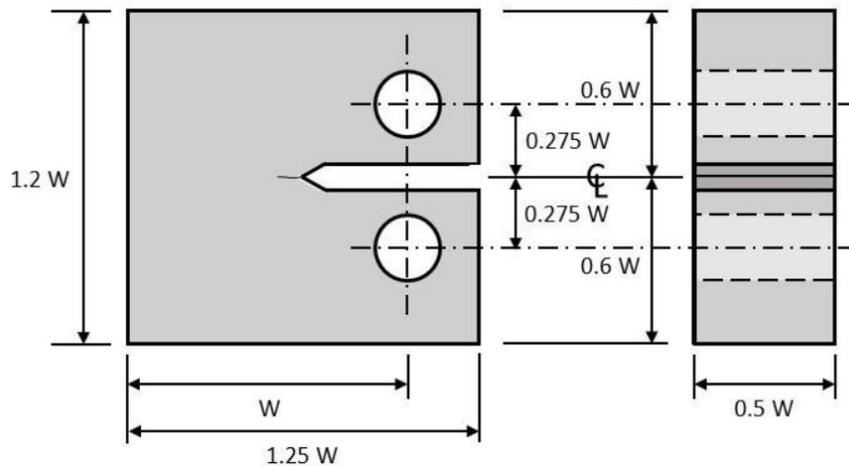


Figura 3.1 – Dimensões do corpo de prova C(T) especificados pela ASTM E1820 (ASTM, 2020).

Na Figura 3.1, W é a distância perpendicular entre a base do corpo de prova e a linha que atravessa o centro dos pontos de fixação das máquinas de ensaio, esse valor, baseia as verificações dimensionais dos corpos de prova que é focada na análise das dimensões e proporções determinada pela norma ASTM E1820 (ASTM, 2020).

O cálculo do J como determinado pela ASTM E1820 (ASTM, 2020) é bastante complexo uma vez que devem ser determinados previamente um conjunto de mensurandos. Dentre eles estão o módulo de elasticidade, o limite de resistência e o limite de escoamento. Vale ressaltar que o limite de escoamento está presente no equacionamento para cálculo de J e o módulo de elasticidade e o limite de resistência são parâmetros de entrada no ensaio.

O limite de escoamento, o limite de resistência e o módulo de elasticidade, objetos de estudo desse trabalho final de curso, do aço AISI 4340 foram determinados por meio de ensaios de tração, executados conforma a norma ASTM E8/E8M (ASTM, 2018). A geometria dos corpos de prova é mostrada na Fig. 3.2.

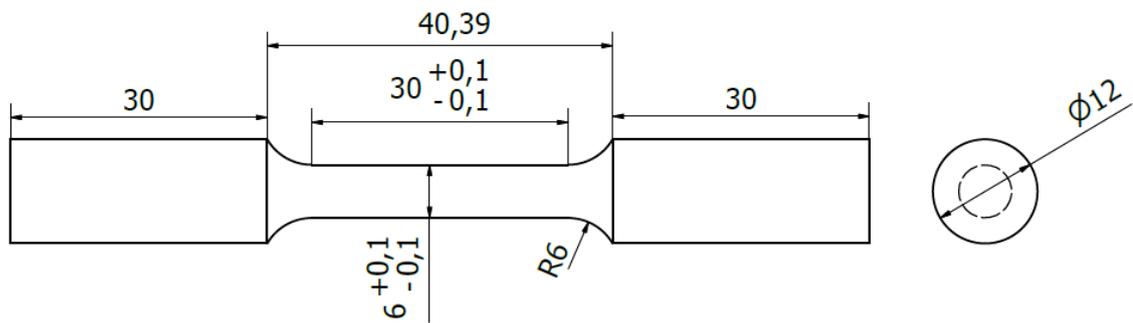


Figura 3.2 - Geometria e dimensões do corpo de prova para ensaio de tração, com dimensões em mm (ASTM E8, 2016).

Os corpos de prova utilizados no ensaio de tração, foram usinados em um torno de controle numérico por computador (CNC) fabricado pela Romi, modelo GL 240M. Para garantir as suas dimensões, após a usinagem, cada corpo de prova teve o diâmetro da seção útil medido em três posições ao longo do comprimento. Para tanto foi utilizado um paquímetro digital fabricado pela Mitutoyo, com resolução de 0,01 mm e faixa nominal de 150 mm.

O certificado de calibração do paquímetro, presente no Anexo 1 declara uma incerteza associada à calibração de 0,01 mm para a realização das medições externas. Já a incerteza expandida associada ao desvio de paralelismo entre as superfícies de medição externas é de 0,01 mm. O fator de abrangência (k) é igual a 2,00 e a probabilidade de abrangência de 95 %.

Os ensaios foram executados em uma máquina universal Instron® especificada anteriormente. O controle de deslocamento utilizado foi de 0,48 mm/min até 4 % de deformação e 2 mm/min para o restante do ensaio. Já a deformação na região elástica, foi determinada por um extensômetro eletromecânico axial, também fabricado pela Instron®, modelo 2620-604, com faixa nominal de ± 5 mm e resolução de 0,01 μm . O certificado de calibração, presente no Anexo 2, em que declara uma incerteza associada a calibração da célula de 0,09 kN, fator de abrangência (k) é igual a 2,00 e a probabilidade de abrangência de 95 %. Após a remoção do extensômetro eletromecânico, a deformação continuou a ser medida pelo RVDT (*Rotary 30 variable differential transformer*) com resolução de 0,0000001° e faixa nominal de $\pm 45^\circ$ (Anexo 3) integrado no equipamento, até a ruptura do corpo de prova.

Todos os ensaios, foram executados em temperatura ambiente de $(20 \pm 1,0)^\circ\text{C}$, que foi monitorada por um termo-higrômetro digital fabricado pela Instrutherm, com resolução de 0,1 $^\circ\text{C}$ e faixa nominal de $-20,0^\circ\text{C}$ a 60°C . O certificado de calibração desse equipamento (Anexo 4) declara uma incerteza expandida de 0,3 $^\circ\text{C}$ para (k) igual a 2,00 e infinitos graus de liberdade para a medição da temperatura, para garantir o equilíbrio térmico, todos os corpos

de prova e equipamentos, foram deixados doze horas a temperatura ambiente no local onde os ensaios foram realizados.

3.2 Avaliação da incerteza de medição associada ao módulo de elasticidade e aos limites de escoamento e resistência

Em seu trabalho, Antunes (2023) elaborou diagramas de Ishikawa, mostrado nas Figs. 3.3 a 3.5, que mostra quais são os fatores que devem ser considerados na determinação da incerteza associada ao módulo de elasticidade e aos limites de escoamento e resistência.

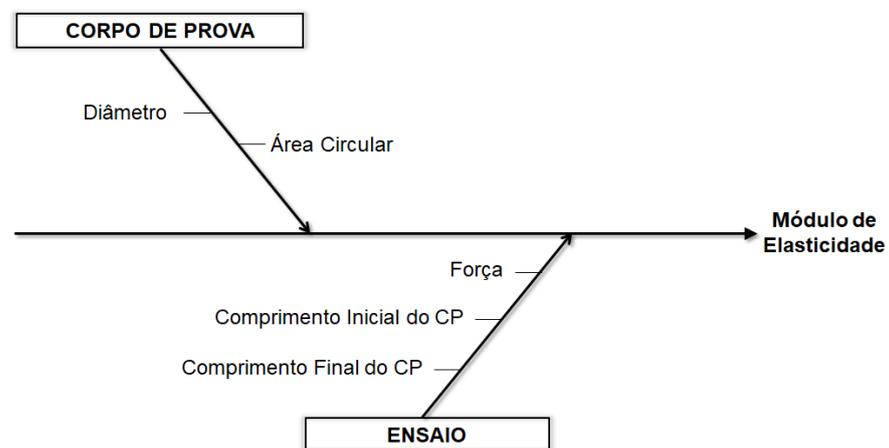


Figura 3.3 – Diagrama de Ishikawa com os fatores de influência associados ao módulo de elasticidade (ANTUNES, 2023).

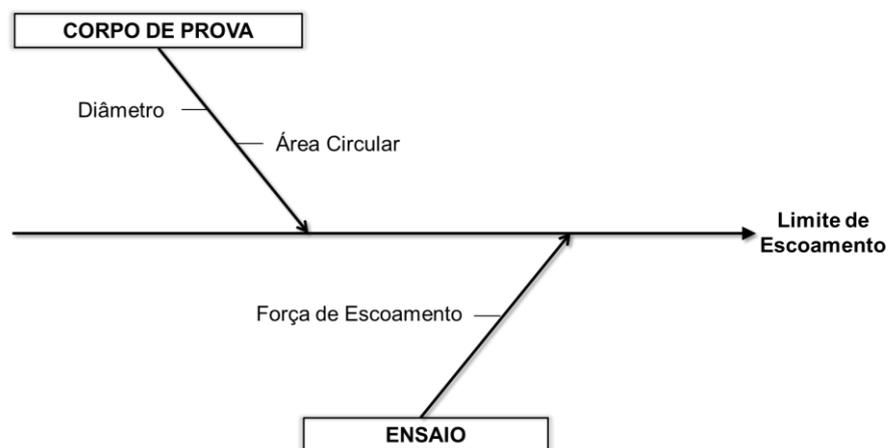


Figura 3.4 – Diagrama de Ishikawa com os fatores de influência associados ao limite de escoamento (ANTUNES, 2023).

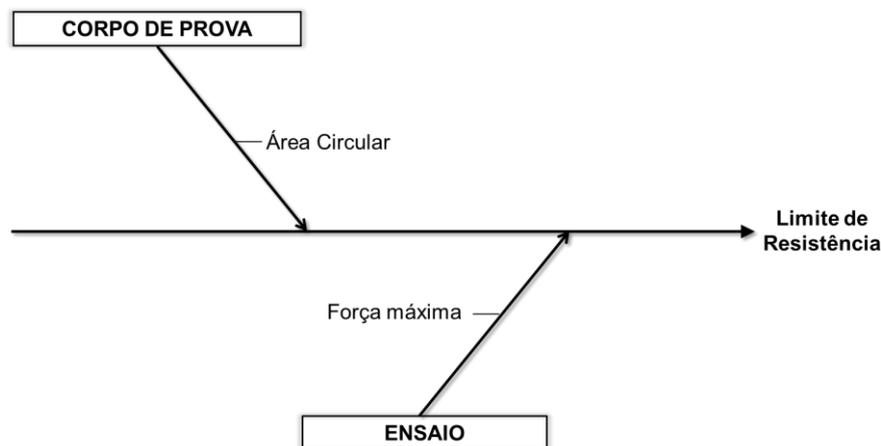


Figura 3.5 - Diagrama de Ishikawa com os fatores de influência associados ao limite de resistência (ANTUNES, 2023).

Na Tabela 3.1 são mostrados os mensurandos considerados para determinação do módulo de elasticidade, limites de escoamento e de resistência, bem como os sistemas de medição utilizados para obtenção de seus valores.

Tabela 3.1 – Sistemas de medição utilizados na determinação dos mensurandos de interesse (Modificado de ANTUNES, 2023).

Mensurando	Sistema de medição
Diâmetro do CP	Paquímetro digital Resolução 0,01 mm
Área da seção transversal do CP	Faixa nominal 150 mm Certificado de calibração (ANEXO 1)
Deformação	Extensômetro eletromecânico axial, Resolução 0,01 μm
Delta da deformação	Faixa nominal de ± 5 mm Certificado de calibração (ANEXO 3)
Força de escoamento	
Força do módulo de elasticidade	
Força máxima	Célula de carga da Instron® Resolução 0,01 kN
Limite de escoamento	Faixa nominal ± 100 kN
Módulo de elasticidade	Certificado de calibração (ANEXO 2)
Limite de resistência	

3.2.1. Definição dos modelos matemáticos

Os modelos matemáticos que foram utilizados por Antunes (2023) para avaliação da incerteza de medição dos diversos mensurandos são mostrados na Tab. 3.2.

Tabela 3.2 – Modelos matemáticos utilizados para avaliação da incerteza associada a todos os mensurandos considerados (Modificada de ANTUNES, 2023).

Mensurando	Sistema de medição	Modelos matemáticos
Diâmetro, D	Paquímetro digital	$M = \bar{X} + \Delta R + \Delta C + \Delta lme$
Área, A		$M = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$
Deformação, l	Extensômetro	
Força de escoamento, F_e		
Força do módulo de elasticidade, F	Célula de carga	$M = \bar{X} + \Delta R + \Delta C$
Força máxima, F_{max}		
Limite de escoamento, σ_y		$M = \frac{F_e}{A_n}$
Módulo de elasticidade, E	Instron®	$M = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F \cdot l}{A_n \cdot \Delta l}$
Limite de resistência, σ_r		$M = \frac{F_{máx}}{A_n}$

Na Tabela 3.2, M representa o mensurando, \bar{X} é a média aritmética dos valores que foram obtidos durante as medições, ΔR é a correção feita devido à calibração do sistema de medição que foi utilizado, já ΔC é a representação da correção necessário para o sistema de calibração. Δlme representa a incerteza associada ao desvio de paralelismo para medidas externas do paquímetro digital; F_e representa a força elástica, A_n é a área do corpo de prova utilizado no ensaio de tração, F é a força do módulo de elasticidade e l é o comprimento do corpo de prova antes do ensaio, já Δl é a diferença entre o comprimento final e o inicial, $F_{máx}$ é a força máxima do corpo de prova no ensaio de tração.

O método GUM e o método de Monte Carlo foram aplicados para a determinação da incerteza padrão combinada. Nos casos em que GUM foi aplicado, a lei de propagação de incertezas nos modelos matemáticos foi aplicada. Os resultados obtidos após o cálculo das derivadas parciais são mostrados na Tab. 3.3.

Tabela 3.3 – Modelos matemáticos após o cálculo das derivadas parciais (Modificada de ANTUNES, 2023).

Mensurando	Resultados da aplicação da lei de propagação de incertezas e o cálculo das derivadas parciais
Diâmetro, D	$u_c^2(M) = u^2(\bar{X}) + u^2(\Delta R) + u^2(\Delta C) + u^2(\Delta lme)$
Área, A	$u_c^2(M) = \left(\frac{\pi \cdot D}{2}\right)^2 \cdot u^2(D)$
Deformação, l	
Força de escoamento, F_e	$u_c^2(M) = u^2(\bar{X}) + u^2(\Delta R) + u^2(\Delta C)$
Força do módulo de elasticidade, F	
Força máxima, F_{max}	
Limite de escoamento	$u_c^2(M) = \left(\frac{F_e}{A_n}\right)^2 \cdot u^2(A_n) + \left(-\frac{F_e}{A_n^2}\right)^2 \cdot u^2(F_e)$
Módulo de elasticidade	$u_c^2(M) = \left(\frac{1}{Ac \cdot \Delta l}\right)^2 \cdot u^2(F) + \left(\frac{F}{Ac \cdot \Delta l}\right)^2 \cdot u^2(d) + \left(-\frac{F \cdot l}{Ac^2 \cdot \Delta l}\right)^2 \cdot u^2(Ac) + \left(-\frac{F \cdot l}{Ac \cdot \Delta l^2}\right)^2 \cdot u^2(\Delta l)$
Limite de resistência	$u_c^2(M) = \left(\frac{F_{máx}}{A_n}\right)^2 \cdot u^2(A_n) + \left(\frac{F_{máx}}{A_n^2}\right)^2 \cdot u^2(F_{máx})$

Para avaliar a incerteza associada à delta deformação (Δl) foi utilizado o método de Monte Carlo apresentado no JCGM 101 (BIPM et al., 2008). Para determinar a incerteza associada, neste caso, foram realizadas 1 000 000 iterações utilizando o MATLAB®R2019a. Para isso foram adotadas distribuições normais de probabilidade para todas as variações de entrada exceto para a resolução dos sistemas de medição. Para esse caso em especial, foi utilizada a distribuição retangular.

Os valores de *Skewness* e *Kurtosis* para os valores simulados de deformação foram determinados, assim como a média e o desvio padrão populacional. Além disso, foi construído um histograma para avaliar o formato da distribuição de probabilidades resultante da simulação. Por fim, considerando que a distribuição resultante é normal e simétrica determinou-se o valor da incerteza expandida associada por meio da Eq. (3.1), em que $U(x)$ é a incerteza expandida associada à delta deformação, $s(x)$ é o desvio padrão que foi determinado a partir dos valores simulados e 2,00 é o valor do fator de abrangência recomendado pelo JCGM 101 (BIPM et al., 2008). Nesse caso em específico, a probabilidade de abrangência é de 95,45 %.

$$U(x) = 2,00 \cdot s(x) \quad (3.1)$$

3.2.2. Cálculo da incerteza padrão associada às variáveis de entrada

Na Tabela 3.4 são mostradas as principais informações referentes ao cálculo da incerteza padrão associada às variáveis de entrada.

Tabela 3.4 – Resumo das informações utilizadas no cálculo da incerteza padrão associada às variáveis de entrada (Adaptada de ANTUNES, 2023).

Variável	Tipo de avaliação	Distribuição de probabilidades	Graus de liberdade efetivos	Equação
(\bar{X})	Tipo A	T-student	n-1	$u(\bar{X}) = \frac{s(X)}{\sqrt{n}}$
ΔR	Tipo B	Retangular	∞	$u(\Delta R) = \frac{R}{2\sqrt{3}}$
ΔC	Tipo B	Variam em função do certificado de calibração		$u(\Delta C) = \frac{U(C)}{kC}$
ΔI_{me}	Tipo B			$u(\Delta I_{me}) = \frac{U(I_{me})}{kI_{me}}$

3.2.3. Cálculo da incerteza padrão combinada e da expandida associada às variáveis de saída para o método GUM

A Equação (3.2) foi utilizada para calcular a incerteza expandida associada à variável de saída para aqueles casos em que o método GUM foi utilizado.

$$U(y) = k(y) \cdot u_c(y) \quad (3.2)$$

O fator de abrangência $k(y)$ é determinado Tab. G 2 do GUM em função dos graus de liberdade efetivos da medição e o fator de abrangência correspondente. O cálculo de $v_{ef}(med)$ é efetuado por meio da equação de Welch-Satterhwaite, Eq. (3.3).

$$v_{ef}(y) = \frac{u_c(y)^4}{\left[\sum_i^N \frac{(u(x_i) \cdot C(x_i))^4}{v_i} \right]} \quad (3.3)$$

Na Equação 3.3, N é o número de variáveis de entrada; v_{ef} é o número de graus de liberdade de cada variável de entrada; $u_c(y)$ é a incerteza-padrão combinada da variável de

saída; $u(x_i)$ é a incerteza-padrão de cada variável de entrada; e $C(x_i)$ é o coeficiente de sensibilidade do mensurando em relação a cada variável de entrada y_i .

Por fim o resultado da medição (RM) é apresentado como sendo $RM = \bar{x} \pm U$ acompanhado de uma unidade (SI), para a probabilidade de abrangência de 95 %.

Para o cálculo da contribuição de cada variável de entrada na incerteza final, utiliza-se a Eq. (3.4). Esta análise é importante para a identificação dos potenciais fontes de erros que possam comprometer a qualidade dos resultados de medição.

$$Cont(\bar{x}) = \frac{u^2(\bar{x}) \cdot 100 \%}{u_c^2(D)} \quad (3.4)$$

3.3. Implementação e validação dos roteiros de cálculo em MATLAB®R2019a

Os roteiros de cálculo desenvolvidos por Antunes (2023) para avaliação da incerteza de medição do módulo de elasticidade e dos limites de escoamento e de resistência foram implementados em MATLAB®R2019a. Para tanto, foram utilizados, como base, os dados gerados pela máquina de ensaio Instron e aqueles presentes nos certificados de calibração dos instrumentos e sistemas de medição utilizados, além dos modelos matemáticos definidos por Antunes (2023). Para facilitar o acesso, estes dados foram separados em planilhas eletrônicas distintas conforme as propriedades mecânicas às quais eram referentes. Os valores de força, por exemplo, foram convertidos da unidade de kN (kilonewton) para a unidade N (newton).

Para os limites de resistência e escoamento, os roteiros foram desenvolvidos conforme as etapas de cálculo definidas pelo método GUM. Nestes casos, inicialmente, definiu-se, como padrão, utilizar as funções *clearvars* e *clc*, nativas da linguagem MATLAB. Esta prática foi adotada com o objetivo de limpar a memória cache do *software*, além de possíveis resíduos presentes na janela de comando, de modo a evitar a ocorrência de erros pela substituição de valores das variáveis.

Em seguida, os dados foram incorporados aos roteiros de cálculo com auxílio da função *readmatrix()*. Esta função cria vetores a partir da leitura de arquivos de dados orientados em colunas e separados em *structure arrays*, uma estrutura que agrupa dados correlatos em compartimentos denominados de campos (*fields*). Esta prática foi adotada para facilitar o tratamento dos mesmos durante os cálculos.

Posteriormente, análises estatísticas descritivas iniciais foram implementadas com as funções *mean()*, *std()* e *length()*, que determinam, respectivamente, a média, o desvio-

padrão e o tamanho da amostra, com o objetivo de identificar a distribuição de probabilidade dos dados. Apesar de o tamanho da amostra ter sido definido previamente, o uso da função *length()* possibilita que o algoritmo seja utilizado em outras análises, de modo que não seja necessário alterar qualquer parâmetro no roteiro, e sim que seja ele adaptável a quaisquer conjuntos de dados a serem analisados.

De modo a garantir uma boa confiabilidade aos roteiros desenvolvidos e calculados, Antunes (2023) adotou 21 valores de força durante a avaliação das três propriedades mecânicas. Conforme determinação do BIPM et al. (2008), para amostras com menos de 30 dados, deve-se utilizar uma distribuição do tipo *t-Student*, implementado nos roteiros por meio da função *tinv()*. Por sua vez, os valores dos fatores de abrangência das incertezas expandidas dos limites de escoamento e resistência foram adotados como sendo 95 %.

Para a avaliação da incerteza associada ao módulo de elasticidade, seguiu-se a estrutura definida pelo método GUM, com implementação do método de Monte Carlo para avaliação da incerteza associada ao mensurando ΔL . Durante a simulação foram realizadas 1 000 000 de iterações para as variáveis de entrada presentes no modelo matemático. Estas simulações foram realizadas considerando a média e o desvio-padrão ou incerteza padrão associada às diferentes variáveis de entrada.

Para o roteiro de cálculo do módulo de elasticidade, as etapas de importação e separação de dados, e as análises estatísticas descritivas dos mensurandos seguiram a mesma estrutura utilizada nos roteiros de cálculo dos limites de escoamento e resistência.

Durante a implementação do método de Monte Carlo, as Funções de Densidade de Probabilidade (FDP) foram geradas com base em valores aleatórios, nas distribuições de cada uma das variáveis de entrada analisadas, sendo que, para a deformação e o deslocamento, os valores simulados foram gerados em distribuições do tipo Normal, centralizadas nos valores médios e variados em torno das incertezas padrão. Para a resolução do sistema de medição, foram gerados em uma distribuição retangular, com base em uma perturbação dos valores, para que eles se mantenham em um intervalo de interesse conforme apresentado por Valdés *et al.* (2019).

Após o cálculo das incertezas de medição, foram calculados os parâmetros da distribuição de valores, a Skewness, por meio da função *skewness()*, e Curtose, com a função *kurtosis()*, e, de modo a caracterizar e visualizar a distribuição final. Também foi utilizada a função *histogram()*, para gerar a distribuição de 1 000 000 de valores do mensurando obtidos via simulação de Monte Carlo.

Vale ressaltar que os roteiros de cálculo, tanto para os limites de escoamento e resistência, quanto para o módulo de elasticidade, foram implementados com o objetivo de minimizar a interferência por parte dos usuários. Desta forma, as etapas de cálculo são

referenciadas e instanciadas em si mesmas e a única participação ativa do usuário é durante a fase de preparação da base de dados. Esta base também foi padronizada em planilhas, para eliminar a possibilidade de ocorrências de erros de manipulação, erros de cálculo ou até mesmo a inutilização do algoritmo, por alterações de funções, referências, parâmetros ou outras informações essenciais para o pleno funcionamento dos roteiros.

Alguns exemplos que podem ser citados dessa abordagem são a utilização da função *length()* para possibilitar que o algoritmo seja adaptável a quaisquer conjuntos de dados a serem analisados, apesar dos tamanhos das amostras terem sido definidos previamente neste trabalho; o uso da função *tinv()* para o cálculo dos fatores de abrangência, com base direta nos graus de liberdade efetivos calculados; e o uso da função *readmatrix()* para importação dos dados e a utilização de *structure arrays* para armazenamento dos valores das variáveis.

Ao final da realização de todos cálculos e obtenção dos resultados, as validações dos roteiros foram feitas com base nos valores obtidos via Excel por Antunes (2023).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos neste trabalho. Inicialmente, é apresentado o algoritmo implementado para cálculo da incerteza associada ao limite de escoamento. Os diferentes blocos que compõem o algoritmo são detalhados. Vale ressaltar que os outros dois algoritmos não serão apresentados aqui por possuírem estrutura similar. Em um segundo momento, a validação dos algoritmos foi feita por meio da comparação dos resultados obtidos neste trabalho e aqueles encontrados por Antunes (2023) utilizando o Excel.

4.1 Algoritmo implementado em MATLAB para o limite de escoamento

A seguir, é mostrado e detalhado o algoritmo implementado em MATLAB®R2019a para cálculo da incerteza associada ao limite de escoamento e, para um melhor entendimento, este foi dividido em 6 blocos.

O primeiro bloco mostrado abaixo, é destinado à importação dos dados, sendo um arquivo composto por planilhas eletrônicas, uma contendo as leituras de diâmetro do corpo de prova, informações dos certificados de calibração, e outra com as leituras de força e as informações do certificado de calibração da máquina Instron. Vale lembrar que os valores de força foram gerados durante o ensaio pela máquina universal de ensaio e todas as informações foram levantadas, outrora, por Antunes (2023). A função *readmatrix* é responsável pela leitura e importação desses dados para o MATLAB®R2019a.

```

%% Entrada de dados

% Variáveis de influência relacionadas ao CP
dataCP = readmatrix('CORPOCILINDRICO_LE.xlsx', 'Sheet', '2');

% Valores de análise da força de escoamento
dataForca = readmatrix('CORPOCILINDRICO_LE.xlsx', 'Sheet', '1');

```

Bloco 1 - Importação de dados

O segundo bloco, apresenta a separação dos dados em *fields* específicos do mensurando, cada qual em sua estrutura adequada e, em seguida, é gerada uma tabela, pela função *table*, para melhor visualização dos resultados estatísticos descritivos mais relevantes, sendo eles a média, o desvio-padrão e as dimensões do corpo de prova.

```

%% Incerteza associada ao diâmetro
% Dados

diam.leituras = dataCP(:,1);
diam.resol = dataCP(1,2);
diam.abrang_calib = dataCP(1,3);
diam.inc_exp.calib = dataCP(1,4);
diam.inc_exp.paral = dataCP(1,5);
diam.abrang_ext = dataCP(1,6);

diam_estat = table(mean(diam.leituras), std(diam.leituras),
length(diam.leituras),
'VariableNames', ["Media", "DesvioPadrao", "TamanhoAmostra"]);

```

Bloco 2 - Separação e visualização dos dados

O próximo bloco, é destinado à realização dos cálculos seguindo o método GUM. Para tanto, inicialmente, todos os resultados foram armazenados em uma tabela, referenciada pela variável *diam_incPad* e, em seguida, foram inseridos todos os modelos matemáticos definidos por Antunes (2023). Estes modelos são utilizados para calcular a incerteza padrão e incerteza padrão combinada associadas às variáveis de entrada, os graus de liberdade efetivos, a incerteza expandida associada à variável de saída, a contribuição das variáveis de entrada e, por fim, o resultado de medição é apresentado pela função *fprintf*, com quatro algarismos significativos.

```

%% Incerteza associada ao diâmetro
% Dados
diam.leituras = dataCP(:,1);
diam.resol = dataCP(1,2);
diam.abrang_calib = dataCP(1,3);
diam.inc_exp.calib = dataCP(1,4);
diam.inc_exp.paral = dataCP(1,5);
diam.abrang_ext = dataCP(1,6);

diam_estat = table(mean(diam.leituras), std(diam.leituras), length(diam.leituras),
'VariableNames', ["Media", "DesvioPadrao", "TamanhoAmostra"]);

% Incerteza padrão
diam.inc_pd.var = std(diam.leituras)/sqrt(length(diam.leituras)); % Variabilidade
das leituras
diam.inc_pd.res = diam.resol/(2*sqrt(length(diam.leituras))); % Resolução
diam.inc_pd.calib = diam.inc_exp.calib/diam.abrang_calib; % Calibração
diam.inc_pd.paral = diam.inc_exp.paral/diam.abrang_ext; % Desvio de paralelismo

diam_incPad = table(diam.inc_pd.var, diam.inc_pd.res, diam.inc_pd.calib,
diam.inc_pd.paral, 'VariableNames',
["IncertezaVariabilidadeLeituras", "IncertezaResolucao", "IncertezaCalibracao", "Incer
tezaDesvioParalelismosExternas"]);
disp(diam_incPad);

% Incerteza padrão combinada
diam.inc_pd.comb = sqrt(diam.inc_pd.var^2 + diam.inc_pd.res^2 + diam.inc_pd.calib^2
+ diam.inc_pd.paral^2);
fprintf('Incerteza-padrão combinada associada ao diâmetro: %.4f mm\n',
diam.inc_pd.comb);

% Graus de liberdade efetivos
diam.inc_comb.prob = dataCP(1,7);
diam.lib = (diam.inc_pd.comb^4)/(((diam.inc_pd.var)^4)/(length(diam.leituras) -
1)); % Graus de liberdade efetivos
diam.abrang.exp = tinv(1 - (1 - diam.inc_comb.prob)/2, diam.lib);

% Incerteza expandida
diam.inc_exp = diam.abrang.exp*diam.inc_pd.comb;
fprintf('Incerteza expandida associada ao diâmetro: %.4f mm\n\n', diam.inc_exp);

% Contribuição das incertezas
diam.cont.var = (diam.inc_pd.var^2/diam.inc_pd.comb^2)*100; % Variabilidade das
leituras
diam.cont.res = (diam.inc_pd.res^2/diam.inc_pd.comb^2)*100; % Resolução
diam.cont.calib = (diam.inc_pd.calib^2/diam.inc_pd.comb^2)*100; % Calibração
diam.cont.paral = (diam.inc_pd.paral^2/diam.inc_pd.comb^2)*100; % Desvio de
paralelismo
contTab = table(diam.cont.var, diam.cont.res, diam.cont.calib, diam.cont.paral,
'VariableNames', ["ContVar", "ContRes", "ContCalib", "ContParal"]);

disp(contTab);

% Resultado de medição
fprintf('RM = %.4f \x00B1 %.4f mm\n\n', mean(diam.leituras), diam.inc_exp);

```

Bloco 3 – Determinação dos valores referentes ao diâmetro

O quarto bloco, é destinado à determinação de todos os resultados referentes a área circular do corpo de prova, conforme a lógica e estrutura apresentadas anteriormente, porém a média deste parâmetro é calculada a partir da média das leituras de diâmetro e associada à sua incerteza padrão.

```

%% Incerteza associada à área circular
% Utiliza-se a incerteza padrão combinada associada ao diâmetro, uma
vez
% que é calculada com base no valor médio

% Média e incerteza padrão combinada
area.media = (pi/4)*(mean(diam.leituras))^2;
area.inc_pd.comb =
sqrt(((pi*mean(diam.leituras)/2)^2)*diam.inc_pd.comb^2);
fprintf('Incerteza-padrão combinada associada à área: %.4f mm²\n',
area.inc_pd.comb);

% Incerteza expandida
area.lib =
(area.inc_pd.comb^4)/(((diam.inc_pd.comb*(pi*mean(diam.leituras)/2))^
^4)/diam.lib); % Graus de liberdade efetivos
area.abrang = tinv(1 - (1 - diam.inc_comb.prob)/2, area.lib);
area.inc_exp = area.abrang*area.inc_pd.comb;
fprintf('Incerteza expandida: %.4f mm²\n', area.inc_exp);

% Contribuição
area.cont = (area.inc_pd.comb^2/area.inc_exp^2)*100;
fprintf('Contribuição: %.4f %\n', area.cont);

% Resultado de medição
fprintf('RM = %.4f \x00B1 %.4f mm²\n\n', area.media, area.inc_exp);

```

Bloco 4 – Determinação da incerteza associada a área circular

O próximo bloco, apresenta o cálculo da incerteza associada à força de escoamento, utilizando os dados de ensaio, também separados em *fields* de um *structure array* e, em seguida, os modelos matemáticos definidos por Antunes (2023) para cálculo da incerteza padrão, incerteza padrão combinada, dos graus de liberdade efetivos, da incerteza expandida e da contribuição das variáveis de entrada na incerteza final e, por fim, o resultado de medição é apresentado por meio da função *fprintf*.

```

%% Incerteza associada à força de escoamento
% São utilizados os valores de força na zona de escoamento do aço 4340

forcaLE.leituras = dataForca(:,1);
forcaLE.res = dataForca(1,2);
forcaLE.abrang_calib = dataForca(1,3);
forcaLE.inc_exp.calib = dataForca(1,4);

% Incerteza padrão
forcaLE.inc_pd.var = std(forcaLE.leituras)/sqrt(length(forcaLE.leituras)); %
Variabilidade das leituras
forcaLE.inc_pd.res = forcaLE.res/(2*sqrt(3)); % Resolução
forcaLE.inc_pd.calib = forcaLE.inc_exp.calib/forcaLE.abrang_calib; % Calibração

forcaLE_incPad = table(forcaLE.inc_pd.var, forcaLE.inc_pd.res,
forcaLE.inc_pd.calib, 'VariableNames',
["IncertezaVariabilidadeLeituras", "IncertezaResolucao", "IncertezaCalibracao"]);
disp(forcaLE_incPad);

% Incerteza padrão combinada
forcaLE.inc_pd.comb = sqrt(forcaLE.inc_pd.var^2 + forcaLE.inc_pd.res^2 +
forcaLE.inc_pd.calib^2);
fprintf('Incerteza-padrão combinada associada à força de escoamento: %.4f N\n\n',
forcaLE.inc_pd.comb);

% Incerteza expandida
forcaLE.inc_comb.prob = dataForca(1,5); % Probabilidade de abrangência
forcaLE.lib =
(forcaLE.inc_pd.comb^4)/(((forcaLE.inc_pd.var)^4)/(length(forcaLE.leituras) - 1));
% Graus de liberdade efetivos
forcaLE.abrang.exp = tinvs(1 - (1 - forcaLE.inc_comb.prob)/2, forcaLE.lib); % Fator
de abrangência
forcaLE_Graus = table(forcaLE.lib, forcaLE.abrang.exp, 'VariableNames',
["GrausLiberdadeEfetivos", "FatorAbrangencia"]);
disp(forcaLE_Graus);

forcaLE.inc_exp = forcaLE.abrang.exp*forcaLE.inc_pd.comb;
fprintf('Incerteza expandida: %.4f N\n\n', forcaLE.inc_exp);

% Contribuição das incertezas
forcaLE.cont.var = (forcaLE.inc_pd.var^2*100)/forcaLE.inc_pd.comb^2; %
Variabilidade das leituras
forcaLE.cont.res = (forcaLE.inc_pd.res^2*100)/forcaLE.inc_pd.comb^2; % Resolução
forcaLE.cont.calib = (forcaLE.inc_pd.calib^2*100)/forcaLE.inc_pd.comb^2; %
Calibração
forcaLEContTab = table(forcaLE.cont.var, forcaLE.cont.res, forcaLE.cont.calib,
'VariableNames', ["ContVar", "ContRes", "ContCalib"]);
disp(forcaLEContTab);

% Resultado de medição
fprintf('RM = %.4f \x00B1 %.4f N\n\n', mean(forcaLE.leituras), forcaLE.inc_exp);

```

Bloco 5 - Determinação da incerteza associada força de escoamento

Por fim, no sexto bloco, foi calculada a incerteza associada ao limite de escoamento, seguindo a metodologia proposta por Antunes (2023).

```

%% Incerteza associada ao Limite de Escoamento
limEsc.media = mean(forcaLE.leituras)/area.media;
fprintf('Limite de escoamento médio: %.4f MPa \n', limEsc.media);

limEsc.inc_pd.comb = sqrt(((
mean(forcaLE.leituras)/area.media^2)^2*diam.inc_pd.comb^2)+((1/area.
media)^2*(forcaLE.inc_pd.var)^2));
fprintf('Incerteza-padrão combinada associada ao limite de
escoamento: %.4f MPa\n\n', limEsc.inc_pd.comb);

% Incerteza expandida
limEsc.inc_comb.prob = forcaLE.inc_comb.prob; % Probabilidade de
abrangência
limEsc.lib = limEsc.inc_pd.comb^4/(((
mean(forcaLE.leituras)/area.media^2)*diam.inc_pd.comb)^4/(length(dia
m.leituras)-
1))+((1/area.media)*forcaLE.inc_pd.var)^4/(length(forcaLE.leituras)
-1)); % Graus de liberdade efetivos
limEsc.abrang = tinv(1 - (1 - limEsc.inc_comb.prob)/2, limEsc.lib);
% Fator de abrangência
limEsc_Graus = table(limEsc.lib, limEsc.abrang, 'VariableNames',
["GrausLiberdadeEfetivos", "FatorAbrangencia"]);
disp(limEsc_Graus);

% Contribuição das incertezas
limEsc.cont.area = (((
mean(forcaLE.leituras)/area.media^2)*diam.inc_pd.comb)^2*100)/limEsc
.inc_pd.comb^2;
limEsc.cont.forcaLE =
(((1/area.media)*forcaLE.inc_pd.var)^2*100)/limEsc.inc_pd.comb^2;
limEscContTab = table(limEsc.cont.area, limEsc.cont.forcaLE,
'VariableNames', ["ContArea", "ContForcaLE"]);
disp(limEscContTab);

limEsc.inc_exp = limEsc.abrang*limEsc.inc_pd.comb;
fprintf('Incerteza expandida: %.4f MPa\n\n', limEsc.inc_exp);

% Resultado de medição
fprintf('RM = %.4f \x00B1 %.4f MPa\n\n', limEsc.media,
limEsc.inc_exp);

```

Bloco 6 – Determinação da incerteza associada ao limite de escoamento médio.

Nos Apêndices A a C, são mostrados os algoritmos completos para o módulo de elasticidade e os limites de escoamento e de resistência.

4.2. Valores de incerteza obtidos via MATLAB, para validação dos algoritmos desenvolvidos

Nas Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3, são apresentados os valores calculados para as incertezas padrão combinadas, incertezas expandidas e fatores de abrangência das três propriedades mecânicas avaliadas neste trabalho, respectivamente, limite de escoamento, limite de resistência e módulo de elasticidade. Nesta tabela são também apresentados os valores encontrados por Antunes (2023) usados Microsoft Excel.

Tabela 4.1 – Resultados obtidos pelos algoritmos de cálculo para a avaliação da incerteza associada ao limite de escoamento, em comparação com os encontrados por Antunes (2023).

Parâmetro	Roteiro desenvolvido em MATLAB®R2019a	Antunes (2023)	Erro
Incerteza padrão combinada [MPa]	1,0707	1,0706	0,01 %
Incerteza expandida [MPa]	2,2507	2,2482	0,11 %
Fator de abrangência	2,1021	2,1000	0,10 %

Tabela 4.2 – Resultados obtidos pelos algoritmos de cálculo para avaliação da incerteza associada ao limite de resistência, em comparação com os encontrados por Antunes (2023).

Parâmetro	Roteiro desenvolvido em MATLAB®R2019a	Antunes (2023)	Erro
Incerteza padrão combinada [MPa]	0,6096	0,6111	0,25 %
Incerteza expandida [MPa]	2,6044	2,6278	0,89 %
Fator de abrangência	4,2722	4,3000	0,65 %

Tabela 4.3 – Resultados obtidos pelos algoritmos de cálculo para a avaliação da incerteza associada ao módulo de elasticidade, em comparação com os encontrados por Antunes (2023).

Parâmetro	Roteiro desenvolvido em MATLAB®R2019a	Antunes (2023)	Erro
Incerteza padrão combinada [MPa]	1,5182	1,5181	0,01 %
Incerteza expandida [MPa]	4,9184	5,0248	2,12 %
Fator de abrangência	3,2397	3,3100	2,22 %

A partir das Tabs. 4.1 a 4.3 se conclui que os algoritmos desenvolvidos em MATLAB®R2019a apresentam valores de incerteza padrão combinada e expandida associados aos três mensurandos considerados. Como esperado os valores de incerteza padrão combinada obtidos no presente trabalho e aqueles encontrados por Antunes (2023) são similares com diferenças menores ou iguais a 0,25 %. Diferenças de até 2,12 % foram observados entre os valores de incerteza expandida associada ao módulo de elasticidade. Vale ressaltar que, possivelmente, os maiores valores de diferença observados para a incerteza expandida e ao fator de abrangência associados ao módulo de elasticidade são decorrentes do fato de ter sido utilizado o método de Monte Carlo para determinação da incerteza do mensurando ΔL .

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizada a implementação de algoritmos de cálculo em MATLAB®R2019a para a determinação da incerteza associada ao módulo de elasticidade, limites de escoamento e de resistência. Contribuindo para um trabalho mais amplo de avaliação de incerteza associada a tenacidade a fratura obtida via ensaio integral J utilizando os métodos GUM e Monte Carlo. Para tanto, foi estudada e metodologia utilizada para os cálculos que haviam sido desenvolvidos utilizando o Microsoft Excel® 2019, após essa parte inicial, foram implementadas as rotinas de cálculo com o auxílio das ferramentas disponíveis no *software* MATLAB®2019a e após essa etapa, todos os resultados foram validados. A seguir estão as principais conclusões desse trabalho:

- a) Foram implementadas e validadas três metodologias de cálculo da incerteza de medição associada ao módulo de elasticidade, e aos limites de escoamento e de resistência, utilizando o *software* MATLAB®2019a.
- b) Os algoritmos resultantes possibilitam a popularização do cálculo da incerteza associada ao módulo de elasticidade, e aos limites de escoamento e resistência além de servir como roteiro para a expansão dessas rotinas para outros mensurandos.
- c) A partir da comparação dos valores de incerteza padrão combinada. Incerteza expandida e fator de abrangência obtidos via algoritmos implementados em MATLAB e aqueles encontrados por Antunes (2013), pode-se concluir que os algoritmos implementados foram validados.
- d) Para a incerteza padrão combinada as diferenças observadas foram menores ou iguais a 0,25 %. Por outro lado, diferenças de até 2,12 % foram observados entre os valores de incerteza expandida associada ao módulo de elasticidade.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, propõe-se a criação de uma interface gráfica, na qual o usuário fará a inserção de todos os valores necessários para as avaliações de incerteza que desejar realizar, sem que fosse necessário inserir e organizar os dados em planilhas eletrônicas, de modo a diminuir ainda mais a interação do usuário com a estrutura e referências dos roteiros, para diminuir a possibilidade de ocorrência de erros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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

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

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

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

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

CALLISTER, W. D., *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. John Wiley & Sons, Inc., 2002.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

LEAL, J.E.S., DA SILVA, J.A. & ARENCIBIA, R.V. Contributions to the adaptive Monte Carlo method. *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* **42**, 462 (2020). <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02548-3>

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

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

REIS, M. F. S. Balanceamento de máquinas rotativas utilizando metamodelos Kriging. 2021. 40 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Uberlândia, 2021.

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

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

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

VALDÉS, R.A.; PIRATELLI-FILHO, A.; S. LEAL, J.E.S.; DE OLIVEIRA ROSA, V.A. “Incerteza de medição - Metodologia de cálculo, conceitos e aplicações”. **Editora Interciência**, ISBN: 9788571934269, 1a. Edição, 2019. 248p. ISBN 978-85-7193-426-9

```

clearvars;
clc;

% Entrada de dados

% Variáveis de influência relacionadas ao CP
dataCP = readmatrix('CORPOCILINDRICO_ME.xlsx', 'Sheet', '2');

% Valores de análise da força
dataForca = readmatrix('CORPOCILINDRICO_ME.xlsx', 'Sheet', '1');

% Valores de deslocamento do CP
dataDesloc = readmatrix('CORPOCILINDRICO_ME.xlsx', 'Sheet', '3');

% Valores de tensão x deformação do ensaio
dataDeform = readmatrix('CORPOCILINDRICO_ME.xlsx', 'Sheet', '4');

% Incerteza associada ao diâmetro
fprintf('Diâmetro\n-----\n');

% Dados
diam.leituras = dataCP(:,1);
diam.res = dataCP(1,2);
diam.abrang_calib = dataCP(1,3);
diam.inc_exp.calib = dataCP(1,4);
diam.inc_exp.paral = dataCP(1,5);
diam.abrang_ext = dataCP(1,6);

diam_estat = table(mean(diam.leituras), std(diam.leituras),
    length(diam.leituras), 'VariableNames',
    ["Media", "DesvioPadrao", "TamanhoAmostra"]);

% Incerteza padrão
diam.inc_pd.var = std(diam.leituras)/sqrt(length(diam.leituras)); %
    Variabilidade das leituras
diam.inc_pd.res = diam.res/(2*sqrt(length(diam.leituras))); %
    Resolução
diam.inc_pd.calib = diam.inc_exp.calib/diam.abrang_calib; % Calibração
diam.inc_pd.paral = diam.inc_exp.paral/diam.abrang_ext; % Desvio de
    paralelismo

diam_incPad = table(diam.inc_pd.var, diam.inc_pd.res,
    diam.inc_pd.calib, diam.inc_pd.paral, 'VariableNames',
    ["IncertezaVariabilidadeLeituras", "IncertezaResolucao", "IncertezaCalibracao", "Inc
disp(diam_incPad);

% Incerteza padrão combinada
diam.inc_pd.comb = sqrt(diam.inc_pd.var^2 + diam.inc_pd.res^2 +
    diam.inc_pd.calib^2 + diam.inc_pd.paral^2);
fprintf('Incerteza-padrão combinada associada ao diâmetro: %.6f mm\n',
    diam.inc_pd.comb);

```

```

% Graus de liberdade efetivos
diam.inc_comb.prob = dataCP(1,7);
diam.lib = (diam.inc_pd.comb^4)/(((diam.inc_pd.var)^4)/
(length(diam.leituras) - 1)); % Graus de liberdade efetivos
diam.abrang.exp = tinv(1 - (1 - diam.inc_comb.prob)/2, diam.lib);

% Incerteza expandida
diam.inc_exp = diam.abrang.exp*diam.inc_pd.comb;
fprintf('Incerteza expandida associada ao diâmetro: %.6f mm\n\n',
diam.inc_exp);

% Contribuição das incertezas
diam.cont.var = (diam.inc_pd.var^2/diam.inc_pd.comb^2)*100; %
Variabilidade das leituras
diam.cont.res = (diam.inc_pd.res^2/diam.inc_pd.comb^2)*100; %
Resolução
diam.cont.calib = (diam.inc_pd.calib^2/diam.inc_pd.comb^2)*100; %
Calibração
diam.cont.paral = (diam.inc_pd.paral^2/diam.inc_pd.comb^2)*100; %
Desvio de paralelismo
contTab = table(diam.cont.var, diam.cont.res,
diam.cont.calib, diam.cont.paral, 'VariableNames',
["ContVar", "ContRes", "ContCalib", "ContParal"]);
disp(contTab);

% Resultado de medição
fprintf('RM = %.6f \x00B1 %.6f mm\n\n', mean(diam.leituras),
diam.inc_exp);

% Incerteza associada à área circular
% Utiliza-se a incerteza padrão combinada associada ao diâmetro, uma
vez
% que é calculada com base no valor médio
fprintf('Área circular\n-----\n');

% Média e incerteza padrão combinada
area.media = (pi/4)*(mean(diam.leituras))^2;
area.inc_pd.comb =
sqrt(((pi*mean(diam.leituras)/2)^2*diam.inc_pd.comb^2);
fprintf('Incerteza-padrão combinada associada à área: %.6f mm²\n',
area.inc_pd.comb);

% Incerteza expandida
area.lib = (area.inc_pd.comb^4)/
(((diam.inc_pd.comb*(pi*mean(diam.leituras)/2))^4)/diam.lib); % Graus
de liberdade efetivos
area.abrang = tinv(1 - (1 - diam.inc_comb.prob)/2, area.lib);
area.inc_exp = area.abrang*area.inc_pd.comb;
fprintf('Incerteza expandida: %.6f mm²\n', area.inc_exp);

% Contribuição
area.cont = (area.inc_pd.comb^2/area.inc_exp^2)*100;
fprintf('Contribuição: %.6f %%\n', area.cont);

```

```

% Resultado de medição
fprintf('RM = %.6f \x00B1 %.6f mm²\n\n', area.media, area.inc_exp);

% Incerteza associada à força
fprintf('Força\n-----\n');

forcaME.leituras = dataForca(:,1); % Leituras de força, zona elástica
forcaME.res = dataForca(1,2);
forcaME.abrang_calib = dataForca(1,3);
forcaME.inc_exp.calib = dataForca(1,4);
forcaME.prob_abrang = dataForca(1,5);

% Ajuste da zona elástica
desloc.leituras = dataDesloc(:,1); % Leituras de deslocamento, zona
    elástica
ajusteForca = polyfit(desloc.leituras, forcaME.leituras, 1); %
    Regressão linear Força-Deslocamento
fprintf('y = %.6dx + %.6d\n', ajusteForca(1), ajusteForca(2));
forcaEq = polyval(ajusteForca, desloc.leituras);

% Incerteza-padrão
forcaME.inc_pd.var = std(forcaME.leituras - forcaEq)/
    sqrt(length(forcaME.leituras));
forcaME.inc_pd.res = forcaME.res/(2*sqrt(3));
forcaME.inc_pd.calib = forcaME.inc_exp.calib/forcaME.abrang_calib;

forcaME_incPad = table(forcaME.inc_pd.var,
    forcaME.inc_pd.res, forcaME.inc_pd.calib, 'VariableNames',
    ["IncertezaVariabilidadeLeituras", "IncertezaResolucao", "IncertezaCalibracao"]);
disp(forcaME_incPad);

% Incerteza-padrão combinada
forcaME.inc_pd.comb = sqrt(forcaME.inc_pd.var^2 + forcaME.inc_pd.res^2
    + forcaME.inc_pd.calib^2);
fprintf('Incerteza-padrão combinada associada à força: %.6f kN\n\n',
    forcaME.inc_pd.comb);

% Incerteza expandida
forcaME.lib = forcaME.inc_pd.comb^4/((forcaME.inc_pd.var^4/
    (length(forcaME.leituras) - 1)) + (forcaME.inc_pd.res^4/1e30) +
    (forcaME.inc_pd.calib^4/1e16));
forcaME.abrang.exp = tinv(1 - (1 - forcaME.prob_abrang)/2,
    forcaME.lib); % Fator de abrangência
forcaLE_Graus = table(forcaME.lib,
    forcaME.abrang.exp, 'VariableNames',
    ["GrausLiberdadeEfetivos", "FatorAbrangencia"]);
disp(forcaLE_Graus);

forcaME.inc_exp = forcaME.abrang.exp*forcaME.inc_pd.comb;
fprintf('Incerteza expandida da força: %.6f kN\n\n', forcaME.inc_exp);

% Contribuição das incertezas
forcaME.cont.var = (forcaME.inc_pd.var^2*100)/forcaME.inc_pd.comb^2; %
    Variabilidade das leituras

```

```

forcaME.cont.res = (forcaME.inc_pd.res^2*100)/forcaME.inc_pd.comb^2; %
  Resolução
forcaME.cont.calib = (forcaME.inc_pd.calib^2*100)/
forcaME.inc_pd.comb^2; % Calibração
forcaLEContTab = table(forcaME.cont.var,
  forcaME.cont.res, forcaME.cont.calib, 'VariableNames',
  ["ContVar", "ContRes", "ContCalib"]);
disp(forcaLEContTab);

% Incerteza associada ao deslocamento
fprintf('Deslocamento\n-----\n');

desloc.media = 25.0;
desloc.res = 0.001/100; % conversão para mm/mm
desloc.inc_calib = 0.012/100; % conversão para mm/mm
desloc.abrang_calib = 2.0; % Fator de abrangência
desloc.prob_abrang = 0.95; % Probabilidade de abrangência

desloc.inc_exp = desloc.abrang_calib*desloc.inc_calib;
fprintf('Incerteza expandida do deslocamento: %.6f mm\n\n',
  desloc.inc_exp);

% Incerteza associada à deformação
fprintf('Deformação corrigida\n-----\n');

tensao.leituras = dataDeform(:,1);
deform.leituras = dataDeform(:,2);

% Ajuste da zona elástica
ajusteDeform = polyfit(tensao.leituras, deform.leituras, 1);
fprintf('\x03b5= %.6e\x03c3 %.6e\n\n', ajusteDeform(1),
  ajusteDeform(2));
deformEq = polyval(ajusteDeform, deform.leituras);

% Incerteza-padrão
deform.inc_pd.var = std(deform.leituras - deformEq)/
sqrt(length(deform.leituras));
deform.inc_pd.res = desloc.res/(2*sqrt(3));
deform.inc_pd.calib = desloc.inc_calib;

deform_incPad = table(deform.inc_pd.var,
  deform.inc_pd.res, deform.inc_pd.calib, 'VariableNames',
  ["IncertezaVariabilidadeLeituras", "IncertezaResolucao", "IncertezaCalibracao"]);
disp(deform_incPad);

% Incerteza-padrão combinada
deform.inc_pd.comb = sqrt(deform.inc_pd.var^2 + deform.inc_pd.res^2 +
  deform.inc_pd.calib^2);
fprintf('Incerteza-padrão combinada associada à deformação: %.6f mm/mm
\n\n', deform.inc_pd.comb);

% Incerteza expandida

```

```

deform.lib = deform.inc_pd.comb^4/((deform.inc_pd.var^4/
(length(deform.leituras) - 1)) + (deform.inc_pd.res^4/1e30) +
(deform.inc_pd.calib^4/1e16));
deform.abrang.exp = tinv(1 - (1 - desloc.prob_abrang)/2,
deform.lib); % Fator de abrangência
deform_Graus = table(deform.lib, deform.abrang.exp, 'VariableNames',
["GrausLiberdadeEfetivos", "FatorAbrangencia"]);
disp(deform_Graus);

deform.inc_exp = desloc.abrang_calib*deform.inc_pd.comb;
fprintf('Incerteza expandida da deformação: %.6f mm/mm\n\n',
deform.inc_exp);

% Contribuição das incertezas
deform.cont.var = (deform.inc_pd.var^2*100)/deform.inc_pd.comb^2; %
Variabilidade das leituras
deform.cont.res = (deform.inc_pd.res^2*100)/deform.inc_pd.comb^2; %
Resolução
deform.cont.calib = (deform.inc_pd.calib^2*100)/
deform.inc_pd.comb^2; % Calibração
deformContTab = table(deform.cont.var,
deform.cont.res, deform.cont.calib, 'VariableNames',
["ContVar", "ContRes", "ContCalib"]);
disp(deformContTab);

% Incerteza de DeltaL pelo método de Monte Carlo
fprintf('\x0394L\n-----\n');

% Geração das Funções de Densidade e de Probabilidade
forcaME_media = 14.235528; % Linha 297 dos resultados
deform_media = 0.0023498; % Linha 297 dos resultados do ensaio [mm/mm]

deformMC = norminv(rand(1e6,1),deform_media,deform.inc_pd.var); %
Distribuição normal
deslocMC = norminv(rand(1e6,1),desloc.media,desloc.inc_calib); %
Distribuição normal
resMC = ((rand(1e6,1)>0.5) * 2 - 1)*desloc.res/2.*rand(1e6,1); %
Distribuição retangular

% Resultado de medição
deltaL.fdp = (deformMC/100).*deslocMC;

% Incertezas
deltaL.inc_comb = std(deltaL.fdp, 1); % Combinada
deltaL.inc_exp = 2*deltaL.inc_comb; % Expandida

% Skewness e Kurtosis
deltaL.skewness = skewness(sort(deltaL.fdp));
deltaL.curtose = kurtosis(sort(deltaL.fdp));

fprintf('Incerteza-padrão combinada de \x0394L: %.6f mm\nIncerteza
expandida: %.6f mm\nSkewness: %.6f\nCurtose: %.6f\n\n',
deltaL.inc_comb, deltaL.inc_exp, deltaL.skewness, deltaL.curtose);

```

```

% Histograma
histogram(deltaL.fdp,
  ceil(sqrt(1e6)), 'EdgeColor', 'none', 'FaceColor', 'b');
xlabel('\DeltaL [mm]');
ylabel('Frequência');
saveas(gcf, 'histograma_MC.png');

% Incerteza associada ao módulo de elasticidade
fprintf('Módulo de elasticidade\n-----\n');

% Incerteza-padrão combinada
modElast.inc_pd.comb = sqrt(((-(forcaME_media*desloc.media)/
(area.media^2*(mean(deltaL.fdp)*100)))^2*area.inc_pd.comb^2) +
  ((desloc.media/
(area.media*(mean(deltaL.fdp))*100))^2*forcaME.inc_pd.comb^2) +
  ((forcaME_media/
(area.media*(mean(deltaL.fdp)*100)))^2*deform.inc_pd.comb^2) + ((-
(forcaME_media*desloc.media)/
(area.media*(mean(deltaL.fdp)*100)^2))^2*deltaL.inc_comb^2));
fprintf('Incerteza-padrão combinada: %.6f GPa\n',
  modElast.inc_pd.comb);

% Incerteza expandida
modElast.lib = modElast.inc_pd.comb^4/((((desloc.media/
(area.media*(mean(deltaL.fdp))*100))*forcaME.inc_pd.comb)^4/
(length(forcaME.leituras) - 1)) + (((forcaME_media/
(area.media*(mean(deltaL.fdp)*100))*deform.inc_pd.comb)^4/2) + (((-
(forcaME_media*desloc.media)/
(area.media^2*(mean(deltaL.fdp)*100))*area.inc_pd.comb)^4/2) + (((-
(forcaME_media*desloc.media)/
(area.media*(mean(deltaL.fdp)*100)^2))*deltaL.inc_comb)^4/
(length(deform.leituras) - 1)));
modElast.abrang_exp = 3.2397;
modElast_Graus = table(modElast.lib,
  modElast.abrang_exp, 'VariableNames',
  ["GrausLiberdadeEfetivos", "FatorAbrangencia"]);
disp(modElast_Graus);
modElast.inc_exp = modElast.abrang_exp*modElast.inc_pd.comb;

fprintf('Incerteza expandida: %.6f GPa\n\n', modElast.inc_exp);

% Contribuições
modElast.cont.forca = (((desloc.media/
(area.media*(mean(deltaL.fdp))*100))^2*forcaME.inc_pd.comb^2)*100)/
modElast.inc_pd.comb^2; % Força
modElast.cont.desloc = (((forcaME_media/
(area.media*(mean(deltaL.fdp)*100)))^2*deform.inc_pd.comb^2)*100)/
modElast.inc_pd.comb^2; % Deslocamento
modElast.cont.area = (((-(forcaME_media*desloc.media)/
(area.media^2*(mean(deltaL.fdp)*100)))^2*area.inc_pd.comb^2)*100)/
modElast.inc_pd.comb^2; % Área
modElast.cont.deltaL = (((-(forcaME_media*desloc.media)/
(area.media*(mean(deltaL.fdp)*100)^2))^2*deltaL.inc_comb^2)*100)/
modElast.inc_pd.comb^2; % Delta L

```

```
modElastContSum = modElast.cont.forca + modElast.cont.desloc +
    modElast.cont.area + modElast.cont.deltaL;
modElastContTab = table(modElast.cont.forca,
    modElast.cont.desloc, modElast.cont.area,
    modElast.cont.deltaL, modElastContSum, 'VariableNames',
    ["ContForca", "ContDesloc", "ContArea", "ContDeltaL", "Total"]);
disp(modElastContTab);

% Módulo de elasticidade
modElast.calculo = (forcaME_media*desloc.media)/
    (area.media*(mean(deltaL.fdp)*1e2));
fprintf('Cálculo do módulo de elasticidade: %.6f GPa\n',
    modElast.calculo);
```

Published with MATLAB® R2019a

```

clearvars;
clc;

% Entrada de dados

% Variáveis de influência relacionadas ao CP
dataCP = readmatrix('CORPOCILINDRICO_LE.xlsx', 'Sheet', '2');

% Valores de análise da força de escoamento
dataForca = readmatrix('CORPOCILINDRICO_LE.xlsx', 'Sheet', '1');

% Incerteza associada ao diâmetro

% Dados
diam.leituras = dataCP(:,1);
diam.resol = dataCP(1,2);
diam.abrang_calib = dataCP(1,3);
diam.inc_exp.calib = dataCP(1,4);
diam.inc_exp.paral = dataCP(1,5);
diam.abrang_ext = dataCP(1,6);

diam_estat = table(mean(diam.leituras), std(diam.leituras),
    length(diam.leituras), 'VariableNames',
    ["Media", "DesvioPadrao", "TamanhoAmostra"]);

% Incerteza padrão
diam.inc_pd.var = std(diam.leituras)/sqrt(length(diam.leituras)); %
    Variabilidade das leituras
diam.inc_pd.res = diam.resol/(2*sqrt(length(diam.leituras))); %
    Resolução
diam.inc_pd.calib = diam.inc_exp.calib/diam.abrang_calib; % Calibração
diam.inc_pd.paral = diam.inc_exp.paral/diam.abrang_ext; % Desvio de
    paralelismo

diam_incPad = table(diam.inc_pd.var, diam.inc_pd.res,
    diam.inc_pd.calib, diam.inc_pd.paral, 'VariableNames',
    ["IncertezaVariabilidadeLeituras", "IncertezaResolucao", "IncertezaCalibracao", "Ince
disp(diam_incPad);

% Incerteza padrão combinada
diam.inc_pd.comb = sqrt(diam.inc_pd.var^2 + diam.inc_pd.res^2 +
    diam.inc_pd.calib^2 + diam.inc_pd.paral^2);
fprintf('Incerteza-padrão combinada associada ao diâmetro: %.4f mm\n',
    diam.inc_pd.comb);

% Graus de liberdade efetivos
diam.inc_comb.prob = dataCP(1,7);
diam.lib = (diam.inc_pd.comb^4)/(((diam.inc_pd.var)^4)/
    (length(diam.leituras) - 1)); % Graus de liberdade efetivos
diam.abrang.exp = tinv(1 - (1 - diam.inc_comb.prob)/2, diam.lib);

% Incerteza expandida

```

```

diam.inc_exp = diam.abrang.exp*diam.inc_pd.comb;
fprintf('Incerteza expandida associada ao diâmetro: %.4f mm\n\n',
    diam.inc_exp);

% Contribuição das incertezas
diam.cont.var = (diam.inc_pd.var^2/diam.inc_pd.comb^2)*100; %
    Variabilidade das leituras
diam.cont.res = (diam.inc_pd.res^2/diam.inc_pd.comb^2)*100; %
    Resolução
diam.cont.calib = (diam.inc_pd.calib^2/diam.inc_pd.comb^2)*100; %
    Calibração
diam.cont.paral = (diam.inc_pd.paral^2/diam.inc_pd.comb^2)*100; %
    Desvio de paralelismo
contTab = table(diam.cont.var, diam.cont.res,
    diam.cont.calib, diam.cont.paral, 'VariableNames',
    ["ContVar", "ContRes", "ContCalib", "ContParal"]);
disp(contTab);

% Resultado de medição
fprintf('RM = %.4f \x00B1 %.4f mm\n\n', mean(diam.leituras),
    diam.inc_exp);

% Incerteza associada à área circular
% Utiliza-se a incerteza padrão combinada associada ao diâmetro, uma
    vez
% que é calculada com base no valor médio

% Média e incerteza padrão combinada
area.media = (pi/4)*(mean(diam.leituras))^2;
area.inc_pd.comb =
    sqrt(((pi*mean(diam.leituras)/2)^2*diam.inc_pd.comb^2);
fprintf('Incerteza-padrão combinada associada à área: %.4f mm²\n',
    area.inc_pd.comb);

% Incerteza expandida
area.lib = (area.inc_pd.comb^4)/
    (((diam.inc_pd.comb*(pi*mean(diam.leituras)/2))^4)/diam.lib); % Graus
    de liberdade efetivos
area.abrang = tinv(1 - (1 - diam.inc_comb.prob)/2, area.lib);
area.inc_exp = area.abrang*area.inc_pd.comb;
fprintf('Incerteza expandida: %.4f mm²\n', area.inc_exp);

% Contribuição
area.cont = (area.inc_pd.comb^2/area.inc_exp^2)*100;
fprintf('Contribuição: %.4f %\n', area.cont);

% Resultado de medição
fprintf('RM = %.4f \x00B1 %.4f mm²\n\n', area.media, area.inc_exp);

% Incerteza associada à força de escoamento
% São utilizados os valores de força na zona de escoamento do aço 4340

forcaLE.leituras = dataForca(:,1);
forcaLE.res = dataForca(1,2);

```

```

forcaLE.abrang_calib = dataForca(1,3);
forcaLE.inc_exp.calib = dataForca(1,4);

% Incerteza padrão
forcaLE.inc_pd.var = std(forcaLE.leituras)/
sqrt(length(forcaLE.leituras)); % Variabilidade das leituras
forcaLE.inc_pd.res = forcaLE.res/(2*sqrt(3)); % Resolução
forcaLE.inc_pd.calib = forcaLE.inc_exp.calib/forcaLE.abrang_calib; %
  Calibração

forcaLE_incPad = table(forcaLE.inc_pd.var,
  forcaLE.inc_pd.res, forcaLE.inc_pd.calib, 'VariableNames',
  ["IncertezaVariabilidadeLeituras", "IncertezaResolucao", "IncertezaCalibracao"]);
disp(forcaLE_incPad);

% Incerteza padrão combinada
forcaLE.inc_pd.comb = sqrt(forcaLE.inc_pd.var^2 + forcaLE.inc_pd.res^2
+ forcaLE.inc_pd.calib^2);
fprintf('Incerteza-padrão combinada associada à força de escoamento:
  %.4f N\n\n', forcaLE.inc_pd.comb);

% Incerteza expandida
forcaLE.inc_comb.prob = dataForca(1,5); % Probabilidade de abrangência
forcaLE.lib = (forcaLE.inc_pd.comb^4)/(((forcaLE.inc_pd.var)^4)/
(length(forcaLE.leituras) - 1)); % Graus de liberdade efetivos
forcaLE.abrang.exp = tinv(1 - (1 - forcaLE.inc_comb.prob)/2,
  forcaLE.lib); % Fator de abrangência
forcaLE_Graus = table(forcaLE.lib,
  forcaLE.abrang.exp, 'VariableNames',
  ["GrausLiberdadeEfetivos", "FatorAbrangencia"]);
disp(forcaLE_Graus);

forcaLE.inc_exp = forcaLE.abrang.exp*forcaLE.inc_pd.comb;
fprintf('Incerteza expandida: %.4f N\n\n', forcaLE.inc_exp);

% Contribuição das incertezas
forcaLE.cont.var = (forcaLE.inc_pd.var^2*100)/forcaLE.inc_pd.comb^2; %
  Variabilidade das leituras
forcaLE.cont.res = (forcaLE.inc_pd.res^2*100)/forcaLE.inc_pd.comb^2; %
  Resolução
forcaLE.cont.calib = (forcaLE.inc_pd.calib^2*100)/
forcaLE.inc_pd.comb^2; % Calibração
forcaLEContTab = table(forcaLE.cont.var,
  forcaLE.cont.res, forcaLE.cont.calib, 'VariableNames',
  ["ContVar", "ContRes", "ContCalib"]);
disp(forcaLEContTab);

% Resultado de medição
fprintf('RM = %.4f \x00B1 %.4f N\n\n', mean(forcaLE.leituras),
  forcaLE.inc_exp);

% Incerteza associada ao Limite de Escoamento
limEsc.media = mean(forcaLE.leituras)/area.media;
fprintf('Limite de escoamento médio: %.4f MPa \n', limEsc.media);

```

```

limEsc.inc_pd.comb = sqrt((( -mean(forcaLE.leituras)/
area.media^2)^2*diam.inc_pd.comb^2)+((1/
area.media)^2*(forcaLE.inc_pd.var)^2));
fprintf('Incerteza-padrão combinada associada ao limite de escoamento:
%.4f MPa\n\n', limEsc.inc_pd.comb);

% Incerteza expandida
limEsc.inc_comb.prob = forcaLE.inc_comb.prob; % Probabilidade de
abrangeência
limEsc.lib = limEsc.inc_pd.comb^4/(((( -mean(forcaLE.leituras)/
area.media^2)*diam.inc_pd.comb)^4/(length(diam.leituras)-1))+((1/
area.media)*forcaLE.inc_pd.var)^4/(length(forcaLE.leituras)-1)); %
Graus de liberdade efetivos
limEsc.abrang = tinv(1 - (1 - limEsc.inc_comb.prob)/2, limEsc.lib); %
Fator de abrangência
limEsc_Graus = table(limEsc.lib, limEsc.abrang, 'VariableNames',
["GrausLiberdadeEfetivos", "FatorAbrangencia"]);
disp(limEsc_Graus);

% Contribuição das incertezas
limEsc.cont.area = ((( -mean(forcaLE.leituras)/
area.media^2)*diam.inc_pd.comb)^2*100)/limEsc.inc_pd.comb^2;
limEsc.cont.forcaLE = (((1/area.media)*forcaLE.inc_pd.var)^2*100)/
limEsc.inc_pd.comb^2;
limEscContTab = table(limEsc.cont.area,
limEsc.cont.forcaLE, 'VariableNames', ["ContArea", "ContForcaLE"]);
disp(limEscContTab);

limEsc.inc_exp = limEsc.abrang*limEsc.inc_pd.comb;
fprintf('Incerteza expandida: %.4f MPa\n\n', limEsc.inc_exp);

% Resultado de medição
fprintf('RM = %.4f \x00B1 %.4f MPa\n\n', limEsc.media,
limEsc.inc_exp);

```

Published with MATLAB® R2019a

```

clearvars;
clc;

% Entrada de dados

% Variáveis de influência relacionadas ao CP
dataCP = readmatrix('CORPOCILINDRICO_LR.xlsx', 'Sheet', '2');

% Valores de análise da força de escoamento
dataForca = readmatrix('CORPOCILINDRICO_LR.xlsx', 'Sheet', '1');

% Incerteza associada ao diâmetro

% Dados
diam.leituras = dataCP(:,1);
diam.resol = dataCP(1,2);
diam.abrang_calib = dataCP(1,3);
diam.inc_exp.calib = dataCP(1,4);
diam.inc_exp.paral = dataCP(1,5);
diam.abrang_ext = dataCP(1,6);

diam_estat = table(mean(diam.leituras), std(diam.leituras),
    length(diam.leituras), 'VariableNames',
    ["Media", "DesvioPadrao", "TamanhoAmostra"]);

% Incerteza padrão
diam.inc_pd.var = std(diam.leituras)/sqrt(length(diam.leituras)); %
    Variabilidade das leituras
diam.inc_pd.res = diam.resol/(2*sqrt(length(diam.leituras))); %
    Resolução
diam.inc_pd.calib = diam.inc_exp.calib/diam.abrang_calib; % Calibração
diam.inc_pd.paral = diam.inc_exp.paral/diam.abrang_ext; % Desvio de
    paralelismo

diam_incPad = table(diam.inc_pd.var, diam.inc_pd.res,
    diam.inc_pd.calib, diam.inc_pd.paral, 'VariableNames',
    ["IncertezaVariabilidadeLeituras", "IncertezaResolucao", "IncertezaCalibracao", "Ince
disp(diam_incPad);

% Incerteza padrão combinada
diam.inc_pd.comb = sqrt(diam.inc_pd.var^2 + diam.inc_pd.res^2 +
    diam.inc_pd.calib^2 + diam.inc_pd.paral^2);
fprintf('Incerteza-padrão combinada associada ao diâmetro: %.4f mm\n',
    diam.inc_pd.comb);

% Graus de liberdade efetivos
diam.inc_comb.prob = dataCP(1,7);
diam.lib = (diam.inc_pd.comb^4)/(((diam.inc_pd.var)^4)/
    (length(diam.leituras) - 1)); % Graus de liberdade efetivos
diam.abrang.exp = tinv(1 - (1 - diam.inc_comb.prob)/2, diam.lib);

% Incerteza expandida

```

```

diam.inc_exp = diam.abrang.exp*diam.inc_pd.comb;
fprintf('Incerteza expandida associada ao diâmetro: %.4f mm\n\n',
    diam.inc_exp);

% Contribuição das incertezas
diam.cont.var = (diam.inc_pd.var^2/diam.inc_pd.comb^2)*100; %
    Variabilidade das leituras
diam.cont.res = (diam.inc_pd.res^2/diam.inc_pd.comb^2)*100; %
    Resolução
diam.cont.calib = (diam.inc_pd.calib^2/diam.inc_pd.comb^2)*100; %
    Calibração
diam.cont.paral = (diam.inc_pd.paral^2/diam.inc_pd.comb^2)*100; %
    Desvio de paralelismo
contTab = table(diam.cont.var, diam.cont.res,
    diam.cont.calib, diam.cont.paral, 'VariableNames',
    ["ContVar", "ContRes", "ContCalib", "ContParal"]);
disp(contTab);

% Resultado de medição
fprintf('RM = %.4f \x00B1 %.4f mm\n\n', mean(diam.leituras),
    diam.inc_exp);

% Incerteza associada à área circular
% Utiliza-se a incerteza padrão combinada associada ao diâmetro, uma
    vez
% que é calculada com base no valor médio

% Média e incerteza padrão combinada
area.media = (pi/4)*(mean(diam.leituras))^2;
area.inc_pd.comb =
    sqrt(((pi*mean(diam.leituras)/2)^2)*diam.inc_pd.comb^2);
fprintf('Incerteza-padrão combinada associada à área: %.4f mm²\n',
    area.inc_pd.comb);

% Incerteza expandida
area.lib = (area.inc_pd.comb^4)/
    (((diam.inc_pd.comb*(pi*mean(diam.leituras)/2))^4)/diam.lib); % Graus
    de liberdade efetivos
area.abrang = tinv(1 - (1 - diam.inc_comb.prob)/2, area.lib);
area.inc_exp = area.abrang*area.inc_pd.comb;
fprintf('Incerteza expandida: %.4f mm²\n', area.inc_exp);

% Contribuição
area.cont = (area.inc_pd.comb^2/area.inc_exp^2)*100;
fprintf('Contribuição: %.4f % \n', area.cont);

% Resultado de medição
fprintf('RM = %.4f \x00B1 %.4f mm²\n\n', area.media, area.inc_exp);

% Incerteza associada à força máxima
% São utilizados os valores máximos de força do aço 4340

forcaLR.leituras = dataForca(:,1);
forcaLR.res = dataForca(1,2);

```

```

forcaLR.abrang_calib = dataForca(1,3);
forcaLR.inc_exp.calib = dataForca(1,4);

% Incerteza padrão
forcaLR.inc_pd.var = std(forcaLR.leituras)/
sqrt(length(forcaLR.leituras)); % Variabilidade das leituras
forcaLR.inc_pd.res = forcaLR.res/(2*sqrt(3)); % Resolução
forcaLR.inc_pd.calib = forcaLR.inc_exp.calib/forcaLR.abrang_calib; %
  Calibração

forcaLR_incPad = table(forcaLR.inc_pd.var,
  forcaLR.inc_pd.res, forcaLR.inc_pd.calib, 'VariableNames',
  ["IncertezaVariabilidadeLeituras","IncertezaResolucao","IncertezaCalibracao"]);
disp(forcaLR_incPad);

% Incerteza padrão combinada
forcaLR.inc_pd.comb = sqrt(forcaLR.inc_pd.var^2 + forcaLR.inc_pd.res^2
+ forcaLR.inc_pd.calib^2);
fprintf('Incerteza-padrão combinada associada à força de escoamento:
  %.4f N\n\n', forcaLR.inc_pd.comb);

% Incerteza expandida
forcaLR.inc_comb.prob = dataForca(1,5); % Probabilidade de abrangência
forcaLR.lib = (forcaLR.inc_pd.comb^4)/(((forcaLR.inc_pd.var)^4)/
(length(forcaLR.leituras) - 1)); % Graus de liberdade efetivos
forcaLR.abrang.exp = tinvs(1 - (1 - forcaLR.inc_comb.prob)/2,
  forcaLR.lib); % Fator de abrangência
forcaLE_Graus = table(forcaLR.lib,
  forcaLR.abrang.exp, 'VariableNames',
  ["GrausLiberdadeEfetivos", "FatorAbrangencia"]);
disp(forcaLE_Graus);

forcaLR.inc_exp = forcaLR.abrang.exp*forcaLR.inc_pd.comb;
fprintf('Incerteza expandida: %.4f N\n\n', forcaLR.inc_exp);

% Contribuição das incertezas
forcaLR.cont.var = (forcaLR.inc_pd.var^2*100)/forcaLR.inc_pd.comb^2; %
  Variabilidade das leituras
forcaLR.cont.res = (forcaLR.inc_pd.res^2*100)/forcaLR.inc_pd.comb^2; %
  Resolução
forcaLR.cont.calib = (forcaLR.inc_pd.calib^2*100)/
forcaLR.inc_pd.comb^2; % Calibração
forcaLEContTab = table(forcaLR.cont.var,
  forcaLR.cont.res, forcaLR.cont.calib, 'VariableNames',
  ["ContVar", "ContRes", "ContCalib"]);
disp(forcaLEContTab);

% Resultado de medição
fprintf('RM = %.4f \x00B1 %.4f N\n\n', mean(forcaLR.leituras),
  forcaLR.inc_exp);

% Incerteza associada ao Limite de Resistência
limRes.media = mean(forcaLR.leituras)/area.media;
fprintf('Limite de resistência médio: %.4f MPa \n', limRes.media);

```

```

limRes.inc_pd.comb = sqrt((( -mean(forcaLR.leituras) /
area.media^2)^2*diam.inc_pd.comb^2) + ((1 /
area.media)^2*(forcaLR.inc_pd.var)^2));
fprintf('Incerteza-padrão combinada associada ao limite de
resistência: %.4f MPa\n\n', limRes.inc_pd.comb);

% Incerteza expandida
limRes.inc_comb.prob = forcaLR.inc_comb.prob; % Probabilidade de
abrangência
limRes.lib = limRes.inc_pd.comb^4 / ((( -mean(forcaLR.leituras) /
area.media^2)*diam.inc_pd.comb)^4 / (length(diam.leituras)-1)) + ((1 /
area.media)*forcaLR.inc_pd.var)^4 / (length(forcaLR.leituras)-1)); %
Graus de liberdade efetivos
limRes.abrang = tinv(1 - (1 - limRes.inc_comb.prob)/2, limRes.lib); %
Fator de abrangência
limEsc_Graus = table(limRes.lib, limRes.abrang, 'VariableNames',
["GrausLiberdadeEfetivos", "FatorAbrangencia"]);
disp(limEsc_Graus);

% Contribuição das incertezas
limRes.cont.area = ((( -mean(forcaLR.leituras) /
area.media^2)*diam.inc_pd.comb)^2*100) / limRes.inc_pd.comb^2;
limRes.cont.forcaLR = (((1/area.media)*forcaLR.inc_pd.var)^2*100) /
limRes.inc_pd.comb^2;
limResContTab = table(limRes.cont.area,
limRes.cont.forcaLR, 'VariableNames', ["ContArea", "ContForcaLR"]);
disp(limResContTab);

limRes.inc_exp = limRes.abrang*limRes.inc_pd.comb;
fprintf('Incerteza expandida: %.4f MPa\n\n', limRes.inc_exp);

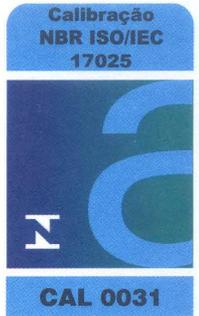
% Resultado de medição
fprintf('RM = %.4f \x00B1 %.4f MPa\n\n', limRes.media,
limRes.inc_exp);

```

Published with MATLAB® R2019a

LABORATÓRIO DE METROLOGIA

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO



Pag.: 1 / 2

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº. 07625/13

Cliente : " UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA."

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

Ordem de serviço: 068.189

1 - Objeto Calibrado

PAQUÍMETRO DIGITAL

Fabricante: Mitutoyo

Código: 500-196-20B

Nº. de Série: 10901281

Faixa nominal : 150 mm

Resolução : 0,01 mm

Identificação do proprietário : Não consta

2 - Padrões utilizados na Calibração:

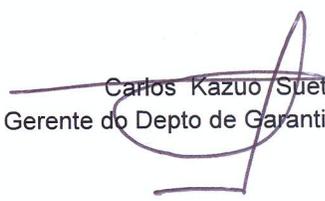
Blocos padrão	Número: 00112
Certificado N.º 00199/13 - RBC - Mitutoyo	Validade: 01/2014
Relógio apalpador	Número: LCF233
Certificado N.º 00997/13 - RBC - Mitutoyo	Validade: 08/2013
Padrão escalonado para paquímetro	Número : 010259
Certificado N.º 05825/13 - RBC - Mitutoyo	Validade: 12/2013

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


Gerente do Depto de Garantia da Qualidade

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	

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

Fator de abrangência (k)	2,00
Graus de liberdade (V _{eff})	infinito

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.

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

EMITENTE: LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO INSTRON

DATA DE EMISSÃO:
24-jun-2022

NÚMERO DO CERTIFICADO:
22062402MC



INSTRON Brasil Equipamentos Científicos Ltda

Rua Quirino Zagonel, 257 - Vila Braga
São José dos Pinhais, PR CEP 83020-250
Telefone: +55 41 3035-9400
E-mail: servicebrasil@instron.com

Página 1 de 4 páginas

SIGNATÁRIO APROVADO

SILVIO OYAMA
25489838892

Digitally signed by SILVIO OYAMA:25489838892
DN: cn=BR, o=ICP-Brasil, ou=Array, cn=SILVIO
OYAMA:25489838892
Reason: Certificação Instron
Location: Rua Quirino Zagonel, 257 - São José
dos Pinhais - PR - Brasil
Date: 19.07.2022 14:51:39 -0300

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

* * * RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO * * *

ID do sistema: 8801MTU6168

Número Série Transdutor: 2527-111/302718

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

PASSOU Classe 1: 100% da Faixa no modo Tração (20.1075 to 100.7163)

PASSOU Classe 1: 100% da Faixa no modo Compressão (-20.1567 to -100.6263)

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

Cliente

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

Temperatura

Temperatura Mínima: 21.2 °C
Temperatura Máxima: 21.3 °C

Máquina

Fabricante: INSTRON
Tipo: Servo-Hidráulica
Intervalo único
Ano de fabr.: 2015

Transdutor

Fabricante: INSTRON
Capacidade: 100 kN
Sentido: Tração/Compressão

Metodologia

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

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

Instron CalproCR Version 3.50

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

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

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

NÚMERO DO CERTIFICADO:

22062402MC

Página 2 de 4 páginas

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

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

Classificação do Sistema

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

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

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

TRAÇÃO

% do intervalo	Erro Relativo (%)			Repetitividade Erro (%)	Classe de Erro	Resolução (+/- kN)	Classe Padrão
	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	0.020	1	0.001	0.5
80	-0.671	-0.684	-0.689	0.018	1	0.001	0.5
100	-0.702	-0.688	-0.701	0.014	1	0.001	0.5

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

COMPRESSÃO

% do intervalo	Erro Relativo (%)			Repetitividade Erro (%)	Classe de Erro	Resolução (+/- kN)	Classe Padrão
	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 pior resolução: 0.5 para 100 Intervalo % (indicador 1: Tração), 0.5 para 100 Intervalo % (indicador 1: Compressão).

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

TRAÇÃO

% do intervalo	Execução 1		Execução 2		Execução 3		Incerteza da medição*	
	Indicado (kN)	Aplicado (kN)	Indicado (kN)	Aplicado (kN)	Indicado (kN)	Aplicado (kN)	Relativa %	(+/- 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)

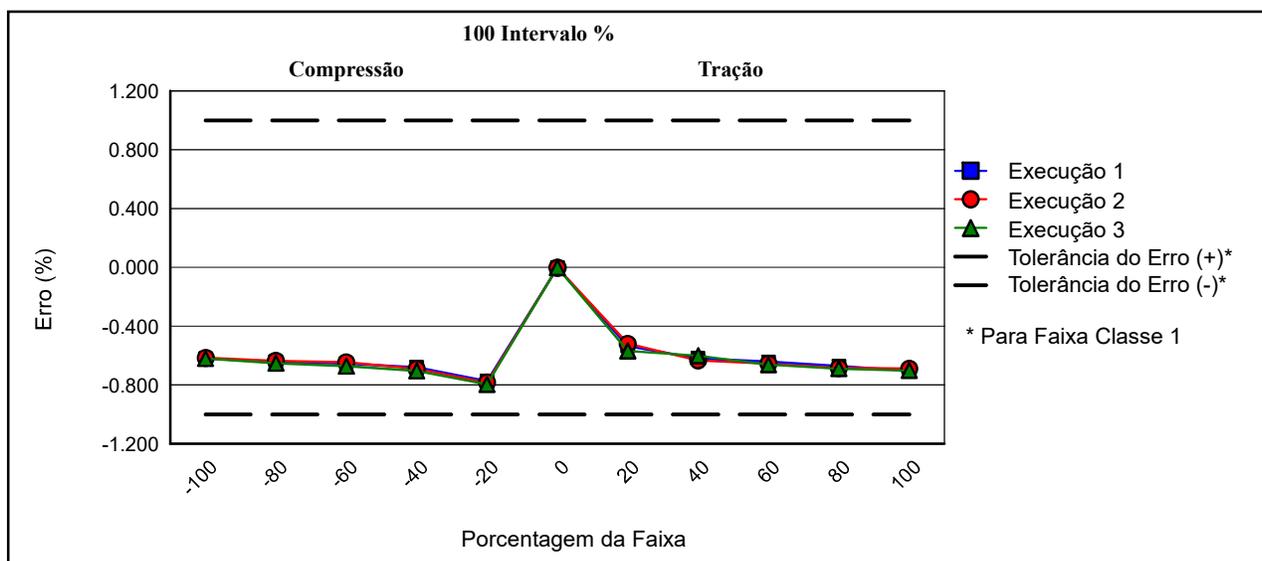
COMPRESSÃO

% 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 levadas 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:
22062402MC

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, Inmetro, etc.).

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

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

Equipamentos Usados na Calibração

Intervalo

Escala

completa

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

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

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

Comentários

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

Verificado por: Marcio Campolina
Service Technician

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

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

EMITENTE: LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO INSTRON

DATA DE EMISSÃO:
24-jun-2022

NÚMERO DO CERTIFICADO:
22062401MC



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

Página 1 de 4 páginas

SIGNATÁRIO APROVADO

SILVIO OYAMA
25489838892

Digitally signed by SILVIO OYAMA:25489838892
DN: cn=BR, o=ICP-Brasil, ou=Array, cn=SILVIO
OYAMA:25489838892
Reason: Certificação Instron
Location: Rua Quirino Zagonel, 257 - São José
dos Pinhais - PR - Brasil
Date: 19.07.2022 14:51:03 -0300

Tipo de calibração: Deformação
Norma relevante: ASTM E83-16
Data da calibração: 24-jun-2022

* * * RESULTADO DA CALIBRAÇÃO * * *

ID do sistema: 8801MTU6168

Número Série Transdutor: 2620-601/301432

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

APROVADO Classe B-2: 100 Intervalo % no modo Tração

Cliente

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

Máquina

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

Transdutor

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

Metodologia

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

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

Classificação do Sistema

Instron Calpro Versão 3.50

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

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

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

NÚMERO DO CERTIFICADO:

22062401MC

Página 2 de 4 páginas

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

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

Resumo dos resultados

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

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

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

Medição e classificação do comprimento do gabarito

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

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

Resumo de Dados

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

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

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

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

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

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

NÚMERO DO CERTIFICADO:

22062401MC

Página 3 de 4 páginas

Dados

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

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

Equipamentos de Calibração

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

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

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

Equipamentos Usados na Calibração

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

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

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

Comentários

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

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

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

NÚMERO DO CERTIFICADO:

22062401MC

Página 4 de 4 páginas

Verificado por: Marcio Campolina
Service Technician

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

CONTRATANTE : Universidade Federal de Uberlândia - UFU
ENDEREÇO : Av. João N. de Ávila, 2121, Bl. 1M - Campus Sta. Mônica - Uberlândia - MG
INTERESSADO : O mesmo
ENDEREÇO : O mesmo

INSTRUMENTO : Termohigrômetro Digital
FABRICANTE : Instrutherm
MODELO : HT-260
IDENTIFICAÇÃO : Não especificado
NÚMERO DE SÉRIE : 06120362

DATA DA CALIBRAÇÃO : 19/06/2013 **LOCAL DA CALIBRAÇÃO:** Laboratório Elus
PRÓXIMA CALIBRAÇÃO : Determinado pelo cliente **TEMPERATURA DO AR :** 23°C ± 5°C
DATA DA EMISSÃO : 20/06/2013 **UMIDADE RELATIVA AR :** 45%UR a 70%UR

PADRÕES UTILIZADOS :
Termohigrômetro Digital identificação EL-225 rastreado por Laboratório RBC - CAL 0439 em 28/02/2013 sob certificado R1678/13 válido até fevereiro/2014.

PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO :
- A calibração foi realizada pelo método comparativo contra padrões de referência, seguindo os procedimentos internos: PCT-003 rev. 01 / PCT-012 rev. 02.

OBSERVAÇÕES :
- Este certificado atende aos requisitos de acreditação pelo CGCRE, o qual avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida.
- A calibração foi realizada em 3 medições por ponto. O Valor Verdadeiro foi herdado pela média de 3 medições obtidas pelo padrão em cada ponto.
- Os valores de temperatura apresentados estão em conformidade com a Escala Internacional de Temperatura de 1990.
- k = fator de abrangência (fator multiplicativo adimensional) / V_{eff} = graus de liberdade efetivo. / I.M. = Incerteza de Medição.

TÉCNICO EXECUTANTE: CAIO CESAR SILVA

Julio Cesar Pereira de Souza
Gerente Técnico Substituto

RODRIGO BOMES CORDEIRO
GERENTE TÉCNICO

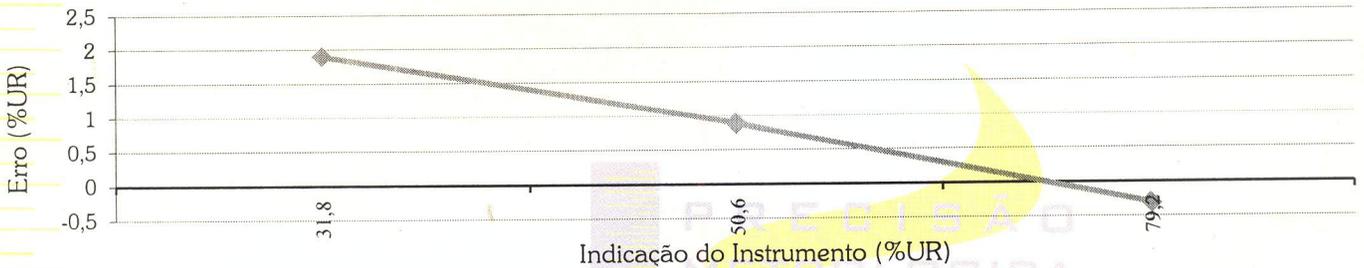
Laboratório de Calibração acreditado pelo CGCRE de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 0439.

RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO :

UMIDADE RELATIVA DO AR SENSOR EXTERNO : TEMPERATURA DA CALIBRAÇÃO - 20°C

Sensor - Fabricante: Não especificado; Modelo: Não especificado; Id.: Não especificado; n°.s.: Não especificado
 Faixa de medição: 0 ~ 100 %UR, divisão de escala: 0,1 %UR.

Indicação do Instrum. (%UR)	Valor Verdadeiro (%UR)	Erro (%UR)	I.M. (%UR)	k	Veff
31,8	29,9	1,9	1,0	2,00	∞
50,6	49,7	0,9	1,0	2,00	∞
79,2	79,5	-0,3	1,3	2,00	∞



TEMPERATURA SENSOR EXTERNO :

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

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

