

FILIPPE SOARES REIS

**AVALIAÇÃO DA INCERTEZA ASSOCIADA AO
MÓDULO DE ELASTICIDADE NO ENSAIO DE
TRAÇÃO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2022

FILIPPE SOARES REIS

**AVALIAÇÃO DA INCERTEZA ASSOCIADA AO MÓDULO DE
ELASTICIDADE NO ENSAIO DE TRAÇÃO**

Projeto de Conclusão de Curso apresentado ao
corpo docente do curso de Graduação em Engenharia
Aeronáutica da Universidade Federal de Uberlândia,
como parte dos requisitos para a obtenção do título de
BACHAREL EM ENGENHARIA AERONÁUTICA.

Orientadora: Profa. Dra. Rosenda Valdés Arencibia

**UBERLÂNDIA - MG
2022**

FILIPPE SOARES REIS

**AVALIAÇÃO DA INCERTEZA ASSOCIADA AO MÓDULO DE
ELASTICIDADE NO ENSAIO DE TRAÇÃO**

Projeto de Conclusão de Curso **APROVADO** pelo
corpo docente do Curso de Graduação da
Universidade Federal de Uberlândia.

Orientadora: Profa. Dra. Rosenda Valdés Arencibia

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Rosenda Valdés Arencibia

Prof. Dr. Luciano José Arantes

Eng. Dr. José Eduardo Silveira Leal

Uberlândia, 25 de Fevereiro de 2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Universidade Federal de Uberlândia e a Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar o curso de Engenharia Aeronáutica.

À coordenação do curso de Engenharia Aeronáutica, durante todos esses anos, Leandra, Odenir, Roberto e Giuliano que me guiaram em etapas difíceis da minha vida.

Aos professores como Tobias, Núbia e tantos outros mestres que me incentivaram a continuar evoluindo diariamente.

Ao Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD) pelo grande apoio ao projeto.

À minha orientadora, Rosenda Valdés Arencibia, pela dedicação no acompanhamento do projeto e pela excelente equipe de apoio engajada como Larissa, Joyce e Gabriel.

Aos meus amigos por fazerem meus dias melhores.

À minha equipe da Embraer, principalmente meu gestor Marc e mentor Adilson, pelos conselhos, companheirismo e por me ajudaram a flexibilizar o estágio, sendo possível completar essa etapa desafiadora da vida.

À minha família pelo apoio incondicional aos meus sonhos. Principalmente a minha mãe, Sirlene, por seu exemplo e amor infinito, meu pai, Willian, por me dar a base para seguir em frente, e meu irmão, Bruno, por me inspirar a sonhar e alegrar minha vida.

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.

RESUMO

O conhecimento do módulo de elasticidade dos aços e ligas é importante em diversos setores profissionais, desde produtores e consumidores de materiais até organizações de pesquisa e agências governamentais, com necessidades e aplicações diferentes. Este trabalho 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. Foram considerados um corpo de prova (CP) de seção transversal cilíndrica, fabricado em aço 4340 e um CP de seção transversal retangular, fabricado em aço 304. As rotinas de cálculo da incerteza foram implementadas utilizando o Matlab®R2018b para evitar erros de cálculo e realizar a leitura direta do arquivo Excel® gerado pela máquina de teste. Para a probabilidade de abrangência de 95 % e fator de abrangência de 12,71, o resultado de medição para o CP cilíndrico é de $214,55 \pm 2,97$ GPa, enquanto para o CP retangular é de $163,66 \pm 2,53$ GPa. A incerteza expandida associada ao módulo de elasticidade do CP cilíndrico representa 1,38 % da média, enquanto que ao CP retangular é 1,55 %. Estes resultados podem ser considerados adequados tendo em vista que quando comparados com os encontrados na literatura são similares.

Palavras-chave: Incerteza de medição. Método GUM. Módulo de elasticidade.

REIS, F.S. **ASSESSMENT OF UNCERTAINTY ASSOCIATED WITH THE ELASTICITY MODULE OBTAINED VIA TENSILE TEST**. 2022. 72 p. Projeto de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

ABSTRACT

Knowledge of the elasticity modulus of steels and alloys is important in many professional sectors, from material producers and consumers to research organizations and government agencies, with different needs and applications. This study evaluated the uncertainty associated with the modulus of elasticity provided by a tensile test performed by the Instron® model 8801 universal testing machine using the GUM method. A cylindrical cross-section specimen made of 4340 steel and a rectangular cross-section specimen made of 304 steel were considered. The uncertainty calculation routines were implemented using Matlab®R2018b to avoid calculation errors and perform the direct reading of the Excel® file generated by the testing machine. For the 95 % coverage probability and coverage factor of 12.71, the measurement result for cylindrical specimen is 214.55 ± 2.97 GPa, while for rectangular specimen it is 163.66 ± 2.53 GPa. The expanded uncertainty associated with the modulus of elasticity of cylindrical specimen represents 1.38 % of the mean value, whereas for rectangular specimen is 1.55 %. These results can be considered adequate since they are similar to those found in the literature.

Keywords: Uncertainty of Measurement. GUM Method. Modulus of Elasticity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Diagrama esquemático da tensão-deformação (CALISTER, 2012). ...	06
Figura 2.2 – Diagrama correlacionando a densidade e o módulo de elasticidade para alguns tipos de materiais (adaptado de ASBHY, 2012)	07
Figura 2.3 – Representação esquemática de um equipamento para ensaios de tração (CALLISTER, 2007).....	09
Figura 2.4 – Forma geral da curva tensão x deformação (NETO, 2006)	09
Figura 2.5 – Distribuição Retangular (BIPM et al., 2008)	14
Figura 2.6 – Distribuição Triangular (BIPM et al., 2008).....	16
Figura 3.1 – Máquina de teste universal Instron® modelo 8801	19
Figura 3.2 – CP retangular(esquerda) e CP cilíndrico(direita) durante o ensaio na máquina de teste universal.....	20
Figura 3.3 – Medidas das seções dos corpos de prova utilizados.....	20

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Composição química do aço 4340 (NBR NM 87/2000, 2000).....	21
Tabela 3.2 – Propriedades mecânicas do aço 4340 (AÇOS NOBRE, 2021).....	21
Tabela 3.3 – Composição química do aço 304 conforme ASTM A276/A276M (ASTM, 2017)	21
Tabela 3.4 – Propriedades mecânicas do aço 340 (SID AÇO INOX, 2021)	22
Tabela 3.5 – Relação entre mensurandos, sistemas de medição e certificados de calibração.....	23
Tabela 3.6 – Modelos matemáticos para cada mensurando	24
Tabela 3.7 – Aplicação da lei de propagação de incertezas nos modelos matemáticos.....	25
Tabela 3.8 – Modelos matemáticos após o cálculo das derivadas parciais.....	26
Tabela 4.1 – Valores obtidos durante a medição do diâmetro do CP cilíndrico com paquímetro digital.....	31
Tabela 4.2 – Tabela resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada ao diâmetro do CP cilíndrico.....	32
Tabela 4.3 – Tabela resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada à área da secção transversal do CP cilíndrico.....	33
Tabela 4.4 – Leituras da força geradas pela máquina de teste universal durante o ensaio do CP cilíndrico.....	33
Tabela 4.5 – Tabela resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada à força aplicada ao CP cilíndrico	34
Tabela 4.6 – Leituras da variação do deslocamento geradas pela máquina de teste universal durante o ensaio do CP cilíndrico	35
Tabela 4.7 – Tabela resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associado à variação do deslocamento do CP cilíndrico	36
Tabela 4.8 – Tabela resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada ao módulo de elasticidade do CP cilíndrico	37
Tabela 4.9 – Valores obtidos durante a medição da altura do CP retangular com paquímetro digital.....	38

Tabela 4.10 – Tabela resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada à altura do CP retangular.....	39
Tabela 4.11 – Valores obtidos durante a medição da base da secção transversal do CP retangular	40
Tabela 4.12 – Tabela resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associados à base do CP retangular	41
Tabela 4.13 – Tabela resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada à área do CP retangular.....	42
Tabela 4.14 – Leituras da força geradas pela máquina de teste universal durante o ensaio do CP retangular.....	42
Tabela 4.15 – Tabela resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada à força aplicada ao CP retangular	43
Tabela 4.16 – Leituras da variação do deslocamento geradas pela máquina de teste universal durante o ensaio do CP retangular	44
Tabela 4.17 – Tabela resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada à variação do deslocamento CP retangular	45
Tabela 4.18 – Tabela resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada ao módulo de elasticidade CP retangular	46

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

Lista de símbolos:

A_c	Área da seção transversal do corpo de prova cilíndrico
A_r	Área da seção transversal do corpo de prova retangular
C	Calibração
E	Módulo de elasticidade
F	Força
l_{me}	Incerteza associada ao erro de paralelismo para medidas externas
K	Fator de abrangência
l	Deslocamento de referência inicial
Δl	Variação de deslocamento
n	Número de repetições
R	Resolução
s	Desvio padrão
u_c	Incerteza padrão
U	Incerteza expandida
ν_{ef}	Graus de liberdade efetivos
$\bar{x}$	Variabilidade das leituras
σ	Tensão aplicada
ε	Deformação elástica

Lista de siglas:

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CP	Corpo de prova
GUM	<i>Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement</i>
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
NBR	Norma Técnica
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	01
1.1 Objetivo principal	01
1.2 Objetivos específicos	02
1.3 Justificativa	02
1.4 Estrutura do trabalho	03
 CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	 05
2.1 Módulo de elasticidade	05
2.2 Método quase estático de caracterização do módulo de elasticidade	08
2.2.1 Método experimental	08
2.3 Incerteza de medição	11
 CAPÍTULO III – METODOLOGIA	 19
3.1 Máquina de ensaio, corpos de prova e o material ensaiado	19
3.2 Identificação dos mensurandos e dos sistemas de medição	22
3.3 Identificação dos fatores de influência ou variáveis de entrada para cada mensurando	24
3.4 Definição dos modelos matemáticos	24
3.5 Cálculo da incerteza padrão associada às variáveis de entrada	26
3.5.1 Cálculo da incerteza padrão associada à variabilidade das leituras	26
3.5.2 Cálculo da incerteza padrão associada à resolução do sistema de medição ..	27
3.5.3 Cálculo da incerteza padrão associada à calibração do sistema de medição ..	27
3.6 Cálculo da incerteza expandida associada a cada uma das variáveis de saída	28
3.7 Implementação dos roteiros de cálculo	28
 CAPÍTULO IV – RESULTADOS	 30
4.1 Resultados associados ao corpo de prova cilíndrico	30
4.1.1 Resultados do cálculo da incerteza associada ao diâmetro do CP cilíndrico ...	30
4.1.2 Resultados do cálculo da incerteza associada à área da secção transversal do corpo de prova cilíndrico	32
4.1.3 Resultados do cálculo da incerteza associada à força aplicada para o corpo de prova cilíndrico.....	33

4.1.4 Resultados do cálculo da incerteza associada aos deslocamentos para o corpo de prova cilíndrico	34
4.1.5 Resultados do cálculo da incerteza associada ao módulo de elasticidade do corpo de prova cilíndrico	36
4.2 Resultados associados ao corpo de prova retangular	38
4.2.1 Resultados do cálculo da incerteza associada à altura da secção transversal do corpo de prova retangular	38
4.2.2 Resultados do cálculo da incerteza associada à base da secção transversal do corpo de prova retangular	40
4.2.3 Resultados do cálculo da incerteza associada à área da secção transversal do corpo de prova retangular	41
4.2.4 Resultados do cálculo da incerteza associada à força aplicada para o CP retangular	42
4.2.5 Resultados associados aos deslocamentos para o corpo de prova retangular	44
4.2.6 Resultados associados ao módulo de elasticidade do corpo de prova retangular	45
4.3 Considerações finais	47
CAPÍTULO V – CONCLUSÕES	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
ANEXO A Certificado de Calibração da máquina de teste universal instron	52
ANEXO B Certificado de Calibração do paquímetro digital	56
ANEXO C Certificado de Calibração do extensômetro	58
ANEXO D Certificado de Calibração da célula de carga	59
ANEXO E Certificado de Calibração do termo-higrômetro digital	60

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O conhecimento do módulo de elasticidade dos materiais é importante em diversos setores profissionais, desde produtores e consumidores de materiais até organizações de pesquisa e agências governamentais, com necessidades e aplicações diferentes. À medida que a tecnologia se desenvolve, surgem novos materiais e necessidades estruturais e, conseqüentemente, fraturas e comportamentos estruturais tornam-se mais difíceis de serem previstos. O módulo de elasticidade tem estreita relação com a durabilidade da estrutura, pois está associado às deformações estruturais que devem se manter dentro de limites estabelecidos, caso contrário, em excesso podem causar fissuras em alvenarias e gerar outros problemas. Portanto, o conhecimento do módulo de elasticidade dos materiais de uma estrutura é imprescindível para estimar a vida útil da mesma (PEDROSO, 2007).

Cupertino (2007) afirma que o ensaio realizado para determinação do módulo de elasticidade depende da qualidade da equipe, da máquina de ensaio devidamente calibrada, dos medidores de deformação e reafirma a importância do tratamento estatístico dos resultados para garantir a confiabilidade da pesquisa. Segundo Battagin (2007), a estimativa do módulo de elasticidade tem se tornado muito relevante, pois esta propriedade fornece informações sobre a reação de uma estrutura sob aplicação de carga a curto ou a longo prazo. O módulo de elasticidade é um dos diversos mensurandos que devem ser avaliados para obtenção da tenacidade à fratura dos materiais.

1.1 Objetivo principal

Avaliar a incerteza associada ao módulo de elasticidade dos aços dos corpos de prova (CP) de seção transversal retangular e circular, obtido por meio de ensaio de tração.

1.2. Objetivos específicos

Desdobrando esse objetivo geral, definiram-se os seguintes objetivos específicos:

- Identificar as fontes de erros ou fatores de influência presentes nas medições realizadas dos mensurandos que são avaliados para determinação do módulo de elasticidade com a máquina de ensaio universal;
- Avaliar a contribuição dos fatores de influência na incerteza final associada ao módulo de elasticidade e propor boas práticas de medição para reduzir seus efeitos;
- Desenvolver e implementar em Matlab®R2018b a metodologia de cálculo da incerteza associada ao módulo de elasticidade com a máquina de teste universal, aplicando o método GUM;
- Contribuir para a rastreabilidade dos valores do módulo de elasticidade, visando o atendimento da NBR ISO/IEC 17025 (2017).

1.3. Justificativa

De acordo com Anderson (2005), um estudo econômico estimou que em 1978 o custo oriundo de fraturas nas estruturas fabricadas nos Estados Unidos era de \$119 bilhões de dólares, o que naquela época correspondia a aproximadamente 4 % do produto interno bruto do país. Portanto, somente com os estudos existentes sobre a mecânica da fratura, seria possível minimizar o valor de custo com fraturas em \$28 bilhões. Este autor citou duas causas como as principais responsáveis pela maioria das fraturas estruturais: negligência durante o projeto, construção ou operação da estrutura; e aplicação de um processo ou material novo, o que implica em comportamentos imprevisíveis ou até mesmo indesejáveis.

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

A rastreabilidade metrológica é definida como a propriedade de um resultado de medição pela qual tal resultado pode ser relacionado a uma referência através de uma cadeia

ininterrupta e documentada de calibrações, cada uma contribuindo para a incerteza de medição (INMETRO, 2012). A avaliação e declaração da incerteza de medição é tão importante quanto a apresentação do resultado de medição (DÉSEFANT e PRIEL, 2017).

No caso particular dos ensaios que visam a determinação da tenacidade à fratura poucos trabalhos abordam a avaliação da incerteza de medição. Rodrigues (2020) avaliou a incerteza associada à tenacidade à fratura obtida por meio de ensaios SNTT. Devido à complexidade dos modelos matemáticos, este autor, utilizou os métodos de Monte Carlo e GUM (*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*). Como resultado deste estudo foi elaborada e documentada uma metodologia que permite o cálculo da incerteza.

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 o limite de escoamento e o limite de resistência, respectivamente. Os valores da incerteza eram independentes das propriedades mecânicas dos materiais, mas variavam com as condições ambientais, com os equipamentos de ensaio e os operadores.

Este trabalho tem como proposta, colaborar com um projeto maior intitulado “Avaliação da tenacidade à fratura e da vida remanescente à fadiga através da técnica de indentação instrumentada”, que visa avaliar a incerteza associada à tenacidade a fratura a partir de dados de força e profundidade decorrentes de indentações. Dentre os diversos mensurandos que devem ser avaliados na longa cadeia de realização do ensaio está o módulo de elasticidade. Neste contexto, o presente Projeto de Conclusão de Curso visa avaliar a incerteza associada ao cálculo do módulo de elasticidade de CP fabricados com aço SAE (*Society of Automotive Engineers*) 4340 e 304. Estes CP podem ter seção transversal retangular ou circular e serão ensaiados em uma máquina de teste universal da fabricante Instron® modelo 8801, com transdutor de deslocamento embutido. Os ensaios serão realizados conforme recomenda a norma ASTM E8/E8M (ASTM, 2013).

1.5. Estrutura do trabalho

Este trabalho é constituído de mais quatro capítulos organizados da seguinte maneira:

Capítulo 2: Revisão bibliográfica sobre o módulo de elasticidade, que aborda os conceitos e definições relacionados ao processo de medição, bem como os parâmetros utilizados para avaliação do módulo de elasticidade e as normas vigentes sobre o assunto. Ainda é apresentada a metodologia de cálculo de incerteza de medição.

Capítulo 3: Metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho de avaliação da incerteza de medição associada ao cálculo do módulo de elasticidade.

Capítulo 4: São apresentados e discutidos os resultados obtidos.

Capítulo 5: São apresentadas as conclusões e considerações finais bem como as propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordados os fundamentos teóricos relacionados ao módulo de elasticidade e à incerteza de medição.

2.1 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade permite avaliar a resistência do material à deformação elástica, constituindo uma forma de medida da rigidez de um elemento estrutural. Desta maneira, materiais cujos módulos de elasticidade são baixos se deformam com facilidade quando submetidos a solicitações mecânicas. Tais materiais não despertam muito interesse para uso em elementos estruturais que exijam pequenas deformações. Em materiais compostos, como o concreto, a relação entre tensão e a deformação não segue o padrão linear esperado e a determinação do módulo de elasticidade apresenta particularidades (VOGT, 2006). Em todos os casos, a compatibilidade metrológica da medição é obtida mediante o uso de técnicas de ensaio padronizadas. O estabelecimento e a publicação dessas normas padrão são frequentemente coordenados por sociedades profissionais. No Brasil a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) e nos Estados Unidos a ASTM (*American Society for Testing and Materials*), entre outras, são responsáveis pela padronização dos ensaios de materiais. Suas publicações são atualizadas anualmente e uma série de normas está relacionada à determinação do módulo de elasticidade (COSSOLINO; PEREIRA, 2010).

Para Mehta e Monteiro (2008), as características elásticas de qualquer material são uma medida de sua rigidez. Ainda que o aço apresenta um alto grau de não linearidade e endurecimento, é necessária uma estimativa do módulo de elasticidade (relação entre tensão

aplicada e a deformação instantânea, dentro de um limite proporcional adotado), para que se possa, além de conhecer as tensões induzidas pelas deformações associadas aos efeitos ambientais, também calcular as tensões de projeto sob carga.

Callister (2012) define que o módulo de elasticidade é a rigidez ou a resistência do material à deformação elástica. Quanto maior for este módulo de elasticidade mais rígido será o material e menor será a deformação elástica resultante de uma tensão. Para aços esta propriedade mecânica é próxima de 207 GPa e para o alumínio de 69 GPa. Segundo Santos et al. (2006), o módulo de elasticidade baseia-se no comportamento linear das deformações sob carregamento nos materiais, e isto somente ocorre para valores limitados de tensões aplicadas.

De acordo com Garcia et. al. (2012), o módulo de elasticidade pode ser determinado por meio das forças de ligação entre os átomos de um metal. Como essas forças são constantes, o módulo de elasticidade é considerado uma propriedade constante nos materiais, apesar de ser levemente afetado por adições de elementos de liga, ou por variações alotrópicas, tratamentos térmicos ou trabalho a frio que alterem a estrutura metálica.

A lei de Hooke estabelece que o módulo de elasticidade é a razão entre a tensão e a deformação relativa, dentro do limite elástico, onde a deformação é proporcional à tensão representada pelo ângulo θ (CALLISTER, 2012), de acordo com a Fig. 2.1.

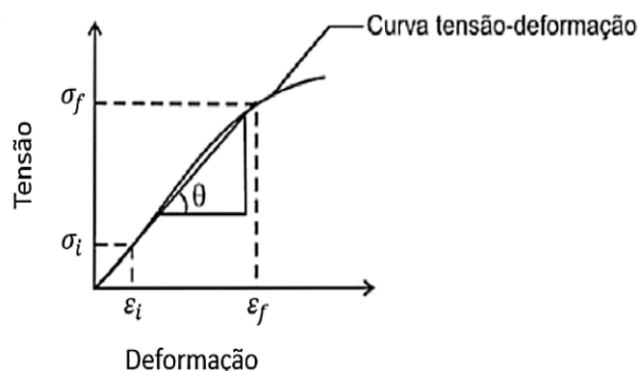


Figura 2.1 – Diagrama esquemático da tensão-deformação (CALISTER, 2012).

No caso de materiais isotrópicos, em que as propriedades não dependem da direção em que são medidas, o módulo de elasticidade ou módulo de Young (uniaxial), E ou Y , pode ser definido como uma grandeza proporcional à rigidez de um material quando este é submetido a uma tensão externa de tração ou compressão. Basicamente, é a razão entre a tensão aplicada e a deformação observada no CP, quando o comportamento for linear, como mostrado na Eq. (2.1).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.1)$$

Na Equação (2.1), E é o módulo de elasticidade ou módulo de Young (Pa), σ é a tensão aplicada (Pa) e ε é a deformação elástica longitudinal do CP (adimensional).

Nota-se pela Eq. (2.1), uma relação linear entre a tensão e a deformação, logo um gráfico de tensão por deformação será representado pela tangente da curva. Essa curva pode ser obtida por meio de ensaios de tração, compressão ou flexão do material.

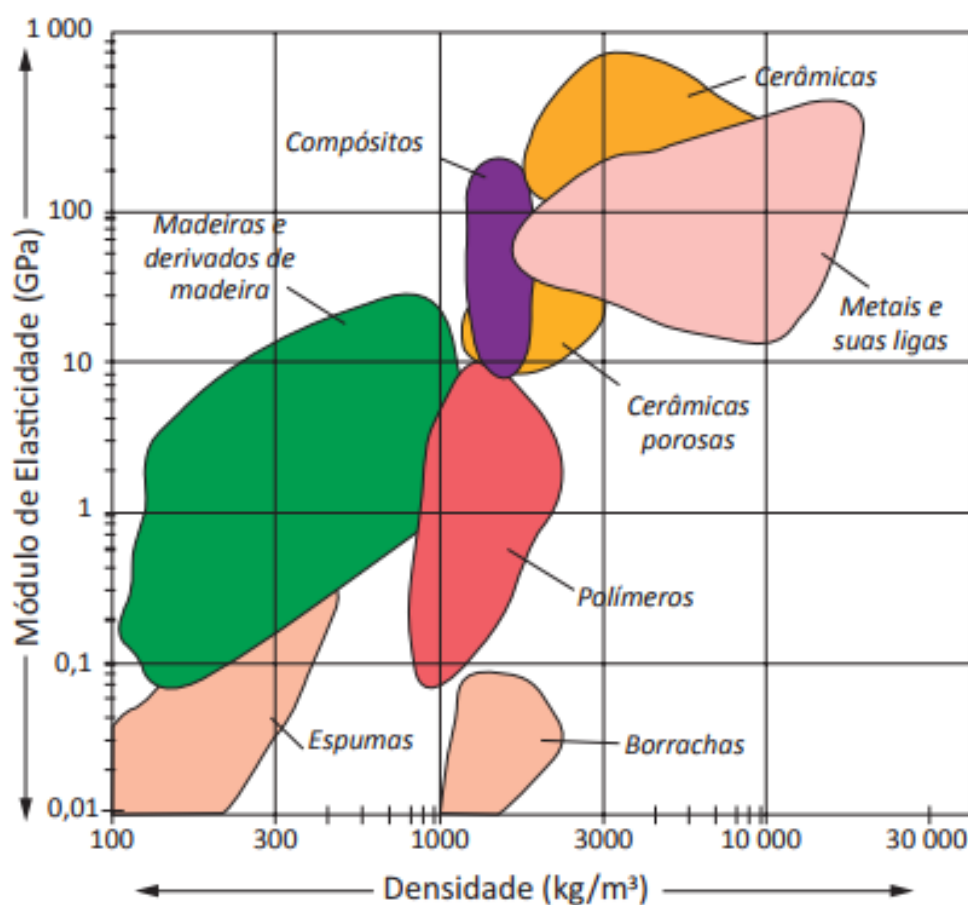


Figura 2.2 – Diagrama correlacionando a densidade e o módulo de elasticidade para alguns tipos de materiais (adaptado de ASBHY, 2012).

Os valores típicos da correlação da densidade do material com o módulo de elasticidade de alguns materiais são apresentados na Fig. 2.2. Para o caso dos aços citados no capítulo anterior, o 4340 e 340, possuem uma densidade aproximada de 8,00 g/m³ e o módulo de elasticidade de 200 GPa. Isso mostra como é fundamental conhecer o comportamento dos materiais quando se deseja aperfeiçoar um projeto.

2.2 Método quase-estático de determinação do módulo de elasticidade

Os módulos de elasticidade podem ser caracterizados por métodos quase-estáticos, métodos dinâmicos ou por ultrassom. Nesse capítulo, será abordado o método quase estático ou isotérmico que é baseado em ensaios mecânicos usualmente destrutivos nos quais os CP ficam inutilizados após a realização dos mesmos. Estes consistem na aplicação lenta de uma força, simultaneamente com o monitoramento da deformação induzida.

No método estático, os materiais quando submetidos a uma tensão podem apresentar dois tipos de deformação: plástica e/ou elástica. A primeira ocorre quando há o deslocamento dos planos cristalográficos do material. Neste caso, quando a tensão é suspensa, o material não retorna à forma inicial. O segundo tipo representa o alongamento ou compactação das células unitárias na direção da tensão. Já nesta circunstância, após a suspensão da tensão, o material retorna à posição inicial, ou seja, a deformação desaparece.

A deformação produz um ajuste ou acomodação na estrutura cristalina quando um CP está submetido a uma força de compressão ou tração, ou seja, na direção perpendicular à força atuante no material. A acomodação da estrutura dependerá da força de ligação interatômica, da composição química, da microestrutura, da presença ou não de discordâncias, de defeitos, e da estrutura cristalográfica do material.

2.2.1 Método experimental

O comportamento mecânico dos materiais é descrito por sua deformação e características de fratura sob tensão. O comportamento mecânico reflete a relação entre sua resposta ou deformação a uma força que esteja sendo aplicada. Algumas propriedades mecânicas importantes são a resistência, a dureza, a ductibilidade e a rigidez.

Nos métodos quase-estáticos, o CP é submetido a uma tensão mecânica (σ), seja ela compressão, tração ou cisalhamento; e as deformações sofridas pelo CP em função da tensão aplicada podem ser mensuradas. Na Figura 2.3 é possível visualizar um equipamento para ensaios de tração, no qual o CP é submetido a uma força de tração e responde com um alongamento.

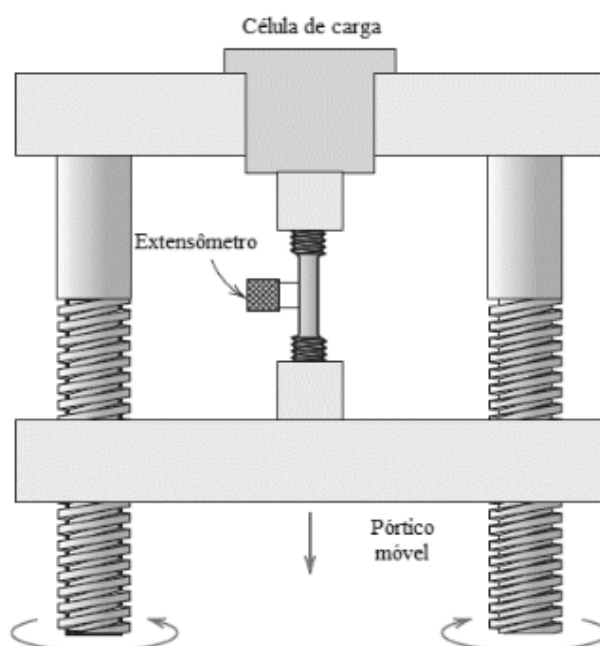


Figura 2.3 - Representação esquemática de um equipamento para ensaios de tração (CALLISTER, 2007).

Independentemente do tipo de ensaio, Goularte (2014) diz que a força que atuará sobre o CP será na direção axial e provocará a deformação do material até a sua ruptura. De modo a quantificar a força aplicada utiliza-se uma célula de carga, que neste caso são transdutores de força que convertem os esforços em um sinal elétrico. Com as informações provenientes da célula de carga e do extensômetro, o gráfico de tensão x deformação do ensaio para um material genérico é apresentado na Fig. 2.4. A partir do gráfico é possível determinar o módulo de elasticidade do material em análise pela equação da lei de Hooke, ou seja, a curva tangente do regime elástico.

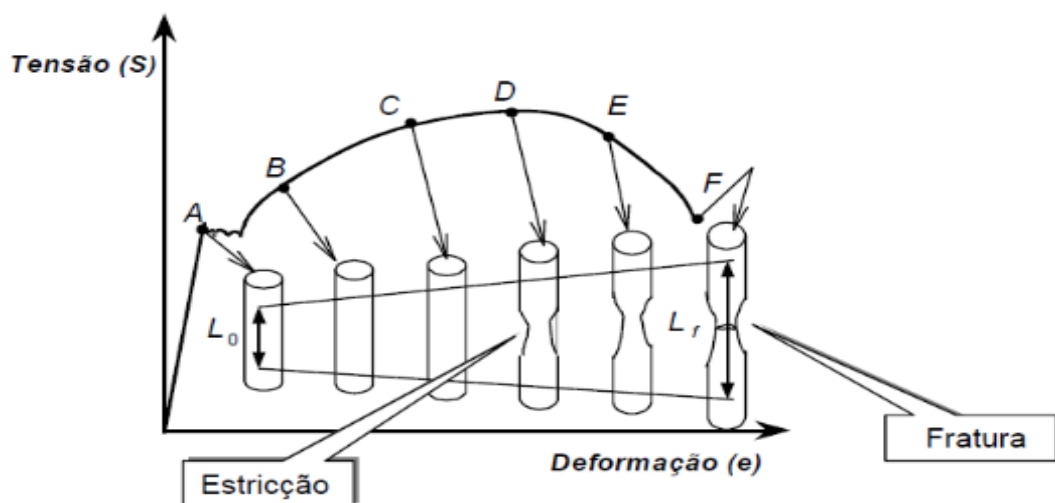


Figura 2.4 – Forma geral da curva tensão x deformação (NETO, 2006).

Até que se alcance o ponto A, a tensão é linearmente proporcional à deformação, seguindo uma relação conhecida como lei de Hooke, também conhecida como região elástica. Nesta região, se a força aplicada for removida o corpo retoma suas dimensões iniciais. O ponto A também marca o limite de escoamento do material, a partir do qual as deformações sofridas serão definitivas, o que caracteriza o início da região de deformação plástica. Para conformação mecânica esta é a região mais importante (SCHAEFFER, 1999). A região de deformação plástica pode ser dividida em duas regiões: aquela onde ocorre a deformação plástica uniforme (A-D), onde o volume é mantido constante durante a deformação, e aquela onde se observa a deformação plástica não uniforme (D-F), devido à redução na área da seção transversal do CP (pescoço). O ponto D representa o local de tensão máxima de resistência à tração do material e o F demarca a tensão onde ocorre sua ruptura (NETO, 2006).

Segundo os Laboratórios Tork (2016), durante este processo, os dados de força ou tensão, uma medida quantitativa da forma como o CP deforma-se sob a força de tração aplicada, geralmente são monitorados e registrados. Quando adequadamente realizado, o ensaio de tração fornece dados que podem quantificar várias propriedades mecânicas importantes de um material, estas incluem, mas não estão limitadas a: Resistência à tração; Módulo de elasticidade; Ductilidade; Tensão de escoamento; Tensão de ruptura; Alongamento; Estricção; Fadiga; Dureza; e Tenacidade.

Desse modo as propriedades são muito importantes nas estruturas dos materiais, e elas são alvo da atenção e estudo de vários grupos de pessoas. O ensaio de tração é caracterizado por ser um método capaz de verificar se o material é adequado para a propriedade que ele virá a servir e quais são seus limites. Este ensaio fornece dados qualitativos e muito precisos das características mecânicas dos materiais ensaiados, as deformações geradas no material são uniformemente distribuídas em todo o CP praticamente até ser ascendida a uma força máxima aproximada do final do ensaio.

A tensão nominal no diagrama tensão-deformação não revela o verdadeiro comportamento da tensão em alguns materiais mais dúcteis, devido a um grande estrangulamento ou estricção na área de ruptura. Na hora da realização do ensaio é muito importante observar a aplicação das forças nos ensaios de tração, pois ela pode ficar desalinhada, causando uma não uniformidade das tensões ao colocar o CP nas garras. Outro cuidado que deve ser tomado no ensaio é com a velocidade da aplicação da força, caso utilizada uma maior rapidez, será produzido um aumento da resistência e a diminuição da ductilidade. Outra desvantagem é que o CP deve ter forma e dimensões indicadas para o ensaio e obedecer às normas específicas da ABNT método MB-4 (GONÇALEZ et al., 2016).

Além disso, muitos equipamentos que realizam os ensaios de tração geralmente não disponibilizam o valor imediato de algumas propriedades mecânicas, como por exemplo a tenacidade, definida como a energia necessária para a ruptura (SOUZA, 1982), obrigando o próprio usuário a calcular os valores das propriedades não fornecidas. Entretanto, todos esses fatores têm grande influência na obtenção do módulo de elasticidade, gerando incertezas de medição ocasionando um grande problema que ainda é mal compreendido.

2.3 Incerteza de medição

No contexto de competitividade pelo mercado mundial, empresas necessitam garantir a qualidade de seus produtos, reduzir custos e buscar constantemente a melhoria de seus processos. Ferramentas para melhoria da qualidade e da produtividade, como sistemas de gerenciamento da qualidade ou controle automático de processos, estão sendo aplicadas para garantir esses requisitos. Entretanto para determinar se o produto está dentro das especificações de qualidade é necessário realizar medições dessas variáveis. Em virtude disso, a metrologia tem crescido em importância nas mais diversas áreas de conhecimento (SOARES JÚNIOR, 1999).

Por outro lado, a BS EM ISO 5198 (ISO, 1999) estabelece que todo sistema de medição possui imperfeições que influenciam nos resultados, levando à obtenção de valores diferentes do valor verdadeiro do mensurando. A incerteza desse afastamento é quantificada por meio do erro sistemático. Existe ainda uma dispersão dos resultados de medição decorrente dos efeitos aleatórios. Vale ressaltar que os erros sistemáticos podem ser corrigidos, entretanto essa correção não é perfeita. Somando o erro sistemático residual e os erros aleatórios obtém-se o que se conhece como incerteza de medição. A notoriedade dela aumenta à medida que a magnitude da incerteza tende a aproximar-se da tolerância de processo de fabricação. Nesses casos, o não conhecimento da incerteza pode levar a ações incorretas que podem ter consequências desastrosas.

Atualmente, para que os resultados dos ensaios tenham validade legal, o resultado de uma medição deve estar obrigatoriamente associado a uma incerteza. Em 1993, com a finalidade de uniformizar e nortear a declaração da incerteza de medição, foi publicada a primeira versão do Guia para a expressão da incerteza de medição, o GUM. Desde então, diversos trabalhos e artigos relacionados ao assunto estão disponíveis para estudo. O cálculo da incerteza é relativamente simples, mas, dependendo do propósito de uso e do nível de exatidão requerido para uma análise, a definição do mensurando e a obtenção da sua inerente incerteza padrão combinada pode se tornar bastante complexa (DIAS, 2016).

Seja qual for o mensurando e o sistema de medição utilizado todo processo de medição está sujeito a erros. Assim sendo o BIPM et al., (2008) indica que todas as grandezas que influenciam o resultado de medição devem ser identificadas na etapa inicial do cálculo da incerteza. Para tanto, deve-se realizar uma análise crítica a fim de identificar estas componentes de incerteza. A quantidade e o tipo de componentes variam de acordo com o sistema de medição, com o tipo de mensurando analisado e com o nível de exatidão requerido. De forma geral, tais componentes podem estar atreladas às condições ambientais, ao operador, aos equipamentos e aos padrões utilizados, ao método de medição, à amostragem, dentre outros fatores. Em muitos casos, a incerteza de medição não é avaliada porque enfrenta-se dificuldades na compreensão e aplicação do método GUM. De acordo com Valdés et al. (2019), uma das etapas mais complexas na avaliação da incerteza está relacionada à identificação das variáveis de entrada ou fatores de influência que afetam o resultado da medição.

O erro de medição pode ser de dois tipos: sistemático e aleatório. Um erro sistemático (cuja estimativa é conhecida como tendência) está associado ao fato de que, o valor medido de uma grandeza contém um desvio; o cálculo da tendência é a diferença da média dos valores e o valor conhecido do mensurando. Um erro aleatório está associado ao fato de que quando uma medição é repetida, fornecerá, geralmente, um valor medido diferente do valor anterior. Essa dispersão dos dados observada para repetidas medidas de uma mesma grandeza é o erro aleatório e é calculado com o desvio padrão da média desses valores (JCGM, 2009).

Couto (2002) define que a avaliação da estimativa da incerteza de medição pelo método clássico definido pelo guia ISO GUM pode ser feita a partir das etapas básicas: avaliação das fontes de incertezas padrão das grandezas de entrada; determinação da incerteza padrão combinada; cálculo dos graus de liberdade efetivos; determinação da incerteza expandida.

Uma vez identificados os fatores de influência ou variáveis de entrada um modelo matemático deve ser proposto, Eq. (2.2) (BIPM, et al., 2008). Este modelo é a base para aplicação da lei de propagação de incertezas.

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (2.2)$$

A partir da Eq. (2.2), obtém-se a estimativa do mensurando Y , designada como y , baseando-se em um conjunto de estimativas de entrada $x_1, x_2, \dots, x_N$ para os valores das N grandezas $X_1, X_2, \dots, X_N$. Assim a expressão resultante pode ser observada na Eq. (2.3)

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (2.3)$$

Então, supondo que as grandezas de entrada envolvidas sejam $x_1, x_2, \dots, x_N$ estatisticamente independentes entre si, a incerteza padrão combinada da grandeza dada pela Eq. (2.4) pode ser estimada por:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i) \cdot u(x_j) \cdot r(x_i, x_j) \quad (2.4)$$

Na Equação (2.4), $u(x_i)$ é a incerteza padrão de cada componente de incerteza que pode ser do tipo A ou B. Além disso, x_i e x_j são as estimativas de X_i e X_j e $u(x_i, x_j) = u(x_j, x_i)$ é a covariância estimada. O grau de correlação entre x_i e x_j é caracterizado pelo coeficiente de correlação estimado pela Eq. (2.5).

$$r(x_i, x_j) = \frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i)u(x_j)} \quad (2.5)$$

Conforme BIPM et al. (2008), a incerteza de medição associada com as estimativas das grandezas de entrada é avaliada de acordo com uma de duas formas distintas: avaliação tipo A ou avaliação tipo B. A avaliação da incerteza padrão do tipo A é o método de avaliar a incerteza por análise estatística de uma série de observações independentes para a mesma grandeza de entrada nas mesmas condições de medição. Neste caso a incerteza padrão é o desvio padrão experimental da média que resulta da determinação do seu valor médio. A avaliação da incerteza padrão do tipo B é o método de avaliar a incerteza por outros meios que não a análise estatística de uma série de observações, e são baseadas observações repetidas, tais como considerações de manuais, especificações de fabricantes, certificados de calibração ou a partir de experiências anteriores. Dependendo da quantidade de informação disponível e da forma como ela é apresentada, podem-se assumir diferentes distribuições de probabilidade para efetuar os cálculos.

Quando se dispõe de um conjunto de valores da variável de entrada x_i , em condições de repetibilidade, pode ser efetuada uma avaliação do tipo A da incerteza padrão, Eq. (2.6).

$$u(\bar{x}_i) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} \quad (2.6)$$

Na Equação (2.6), $s(x_i)$ é o desvio padrão dos valores do conjunto de repetições e n é o número de repetições.

É possível utilizar a distribuição retangular, Fig. 2.5, para estimar apenas os limites superior e inferior para X_i , definir que a probabilidade de que o valor X_i pertença ao intervalo $(a-, a+)$ é igual a um, e que a probabilidade para que o valor X_i esteja fora desse intervalo é zero. Caso não haja conhecimento específico dos possíveis valores de X_i dentro do intervalo, é possível assumir que é igualmente provável que X_i esteja em qualquer ponto do intervalo, e que, por consequência, o seu grau de liberdade é infinito. Neste caso a incerteza padrão é dada pela Eq. (2.7):

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (2.7)$$

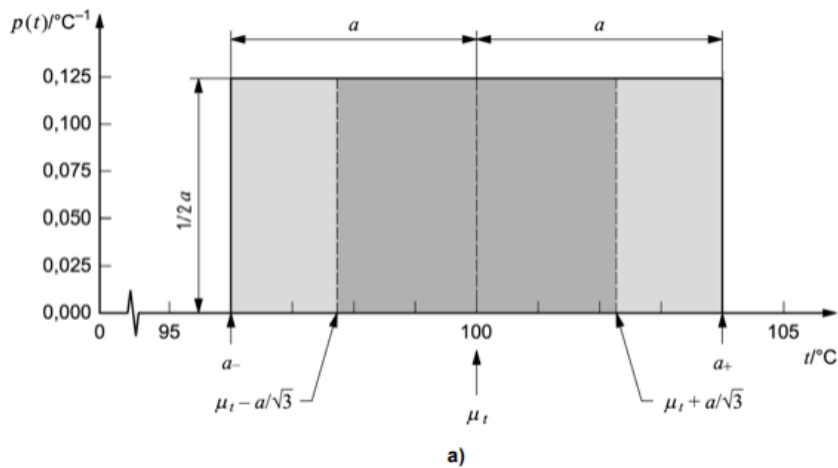


Figura 2.5 – Distribuição Retangular (BIPM et al., 2008).

A função densidade de probabilidade desta distribuição retangular é dada pelo sistema da Eq. (2.8):

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{2a}, & (\mu - a) \leq x \leq (\mu + a) \\ 0, & \text{restante } x \end{cases} \quad (2.8)$$

No caso de haver mais informações a respeito da distribuição dos valores possíveis da grandeza, a distribuição de probabilidade retangular passa para uma triangular (Fig. 2.6), com

infinitos graus de liberdade. Sabendo que x_i é uma distribuição triangular em um intervalo $\pm a$, a estimativa da incerteza-padrão pode ser descrita por meio da Eq. (2.9).

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{6}} \quad (2.9)$$

A função densidade de probabilidade para a distribuição triangular pode ser representada pelo sistema da Eq. (2.12):

$$f(x) = \begin{cases} \frac{x+a}{a^2}, & -a \leq x \leq 0 \\ \frac{a-x}{a^2}, & 0 \leq x \leq a \\ 0, & \text{restante } x \end{cases} \quad (2.10)$$

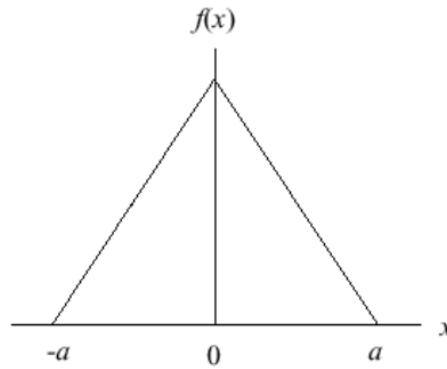


Figura 2.6 – Distribuição Triangular (BIPM et al., 2008).

Além disso, a fonte de entrada provém de um certificado de calibração, a estimativa da incerteza-padrão $u(x_i)$ deve ser definida como mostra a Eq. (2.11). Onde, $U(x_i)$ é a incerteza expandida de x_i e k é o fator de abrangência declarados no certificado de calibração. Neste caso, tanto a distribuição de probabilidades quanto o número de graus de liberdade devem estar disponíveis no certificado de calibração.

$$u(x_i) = \frac{U(x_i)}{k} \quad (2.11)$$

Para determinar o valor de k deve-se calcular o número de graus de liberdade efetivos (v_{ef}). O método GUM recomenda o cálculo de v_{ef} através da Eq. (2.12), equação de Welch-Satterhwaite:

$$v_{ef} = \frac{u_c(y)^4}{\left[\sum_i^N \frac{(u(x_i) \cdot C(x_i))^4}{v_i} \right]} \quad (2.12)$$

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

$$Cont(\bar{x}) = \frac{u^2(\bar{x}) \cdot 100 \% }{u_c^2(D)} \quad (2.13)$$

Rodrigues et al., (2021) avaliaram de forma pioneira a incerteza associada à tenacidade à fratura (K_{IC}) obtida via ensaios SNTT usando os métodos GUM e Monte Carlo. Durante a simulação de Monte Carlo, 10^6 iterações são 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 ($102,2 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$).

Em seu trabalho 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) com um extensômetro e em um pequeno equipamento de ensaio de tração de laboratório (SLTTD) 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.

John Nunn (2015) calculou as incertezas associadas ao módulo de elasticidade para o alumínio pela densidade e velocidade do som em um sólido e encontrou uma diferença de cerca de 4% em relação aos valores teóricos, sendo que o valor encontrado foi $74,33 \text{ GPa}$, enquanto a literatura indica 69 a 70 GPa . Este autor observou a incerteza dominante estava

associada à espessura da barra, sendo de 12 GPa, enquanto que a incerteza associada a todos os outros mensurandos foi igual a 1 GPa. O resultado de medição foi apresentado como 74 ± 13 GPa, sendo que a incerteza representou em torno de 17,5 % do valor médio observado. Este resultado é semelhante ao encontrado no trabalho de Jeon et al., (2009).

Roberto Cagliero et al., (2015) utilizaram o método GUM para o cálculo da incerteza associada ao módulo de elasticidade que é um dos parâmetros mais importantes avaliados no ensaio de indentação instrumentada, realizado em seu trabalho. Os valores de incerteza encontrados foram de 3,24 % para um nível de confiança de 95 %, sendo mais próximo aos trabalhos de Kostic et al., (2021) e Rodrigues et al., (2021).

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Neste capítulo é desenvolvida uma metodologia para o cálculo da incerteza associada ao módulo de elasticidade e aos mensurandos que são variáveis de entrada para o cálculo deste. Inicialmente são identificados todos os mensurandos envolvidos no cálculo do módulo de elasticidade e os sistemas de medição utilizados para a medição destes. Em seguida são identificados os fatores de influência ou variáveis de entrada que podem afetar a incerteza destes mensurandos. Além disso são definidos os modelos matemáticos necessários para avaliação da incerteza pelo método GUM e, por fim, a incerteza é calculada. Vale destacar que todos os roteiros de cálculo foram implementados no Matlab®R2018b visando reduzir os erros de cálculo.

3.1. Máquina de ensaio, corpos de prova e o material ensaiado

O módulo de elasticidade foi determinado por meio de ensaios de tração que foram executados conforme a norma ASTM E8/E8M (ASTM, 2013). Durante os ensaios foi utilizada uma máquina de teste universal (Fig. 3.1), da fabricante Instron® modelo 8801, com faixa nominal de ± 100 kN.



Figura 3.1 - Máquina de teste universal Instron® modelo 8801

A calibração do equipamento foi realizada no Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste, seguindo o padrão relevante ISO 7500-1 (ISO, 2004). O certificado de calibração da máquina de teste universal Instron®, anexo A, declara uma incerteza expandida de 0,09 kN para um fator de abrangência de aproximadamente 95 % dentro do intervalo de força de 22,4745 a 100,1324 kN.

Foram ensaiados CP com duas geometrias diferentes, sendo um com seção transversal retangular, fabricado em aço 304 e outro cilíndrica fabricado em aço 4340, como mostra a Fig. 3.2. A geometria e as dimensões destes CP são mostradas na Fig. 3.3.



Figura 3.2 – CP retangular(esquerda) e CP cilíndrico(direita) durante o ensaio na máquina de teste universal.

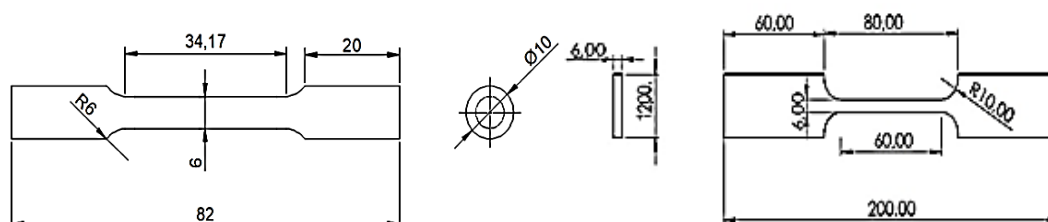


Figura 3.3 – Medidas das seções dos corpos de prova utilizados.

A temperatura ambiente foi mantida em $(20,0 \pm 1,0) ^\circ\text{C}$. Para todas as medições a temperatura foi monitorada por meio de um termo-higrômetro digital com resolução de $0,1 ^\circ\text{C}$ e faixa nominal de $(-20,0 \text{ a } 60,0) ^\circ\text{C}$. O certificado de calibração do termo-higrômetro (ANEXO E) 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. Tanto os corpos de prova quanto os dispositivos de medição foram deixados doze horas à temperatura ambiente para atingirem o equilíbrio térmico.

Com relação aos aços ensaiados, Scarparo (2010) diz que o aço SAE/AISI 4340 é tratável termicamente, sendo de baixa liga, contendo níquel, cromo e molibdênio, combina excelente temperabilidade com alta ductilidade, tenacidade e resistência, além de possuir alta resistência à fadiga e à fluência. Conforme a NBR NM 87 (ABNT, 2000), o aço 4340, objeto

de estudo deste trabalho, apresenta a composição química indicada na Tab. 3.1 e as propriedades na Tab. 3.2.

Tabela 3.1 – Composição química do aço 4340 (NBR NM 87/2000, 2000).

Quantidade	Elementos (% de peso)					
	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo
	0,38 – 0,43	0,60 – 0,80	0,15 – 0,35	1,65	0,70	0,20 – 0,30

Tabela 3.2 – Propriedades mecânicas do aço 4340 (AÇOS NOBRE, 2021).

Propriedades mecânicas	
Densidade (g/m ³)	7,70 – 8,03
Ponto de fusão (°C)	1427
Proporção de Poisson	0,27 – 0,30
Módulo Elástico (Gpa)	190 – 210
Limite de Resistência (Mpa)	744,6
Limite de Escoamento (Mpa)	470

Já os aços inoxidáveis austeníticos como o 304 possuem grande aplicabilidade industrial por serem altamente resistentes à corrosão e à oxidação em diversos meios corrosivos, alta resistência ao calor, boa tenacidade em baixas temperaturas e baixa fluência em temperaturas elevadas (MAKEITFROM, 2019). Esse aço é usado em uma variedade de aplicações domésticas e industriais, que inclui equipamentos de processamento e manuseio de alimentos, parafusos, peças de máquinas, utensílios e cabeçotes de automóveis. Esse aço tem aplicação também como revestimento em aços mais baratos, na fabricação de vasos de pressão de reatores em refinarias de petróleo.

Conforme a ASTM A276/A276M (ASTM, 2017), o aço 304 apresenta sua composição química (Tab. 3.3) que contribui para suas propriedades mecânicas mostradas na Tab. 3.4.

Tabela 3.3 – Composição química do aço 304 conforme ASTM A276/A276M (ASTM, 2017)

Quantidade	Elementos (% de peso)					
	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo
	0,08	2,0	1,0	18,0 – 20,0	8,50	–

Tabela 3.4 – Propriedades mecânicas do aço 340 (SID AÇO INOX, 2021).

Propriedades mecânicas	
Densidade (g/m ³)	8,00
Intervalo de fusão (°C)	1398 – 1454
Proporção de Poisson	0,30
Módulo Elástico (Gpa)	200
Limite de Resistência (Mpa)	530 – 770
Limite de Escoamento (Mpa)	240 – 350

3.2. Identificação dos mensurandos e dos sistemas de medição

Para efeitos de cálculo da incerteza associada ao módulo de elasticidade foi considerado apenas um CP de cada geometria apresentada. Isto porque a incerteza associada à determinação do módulo de elasticidade dos demais CP é feita de forma similar. A seguir é apresentado o equacionamento matemático utilizado para obtenção do módulo de elasticidade. A Equação (3.1) apresenta a relação do módulo de elasticidade com a tensão e a deformação.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.1)$$

Pode-se expandir a Eq. (3.1) considerando o apresentado nas Eqs. (3.2) até (3.5). Sendo a Eq. (3.2) associada a tensão.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3.2)$$

A relação da deformação é apresentada na Eq. (3.3).

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (3.3)$$

A área circular representada pela Eq. (3.4) e a área retangular Eq. (3.5).

$$A_c = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (3.4)$$

$$A_r = C_a \cdot C_b \quad (3.5)$$

Desta forma as Eqs. (3.6) e (3.7) são obtidas.

$$E_{0c} = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F \cdot l}{A_c \cdot \Delta l} \quad (3.6)$$

$$E_{0r} = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F \cdot l_r}{A_r \cdot \Delta l_r} \quad (3.7)$$

Nas Equações (3.1) até (3.7), F é a força, Ac é a área da secção transversal do CP cilíndrico, Ar é a área da secção transversal do CP retangular, L é o deslocamento, D é o diâmetro do CP cilíndrico e Cb e Ca são respectivamente a base e a altura do CP retangular. Portanto, para o cálculo da incerteza associada ao módulo de elasticidade serão calculadas as incertezas relacionadas aos mensurandos da Tab. 3.5 que apresenta os respectivos sistemas de medição e certificados de calibração que foram utilizados em cada caso.

Tabela 3.5 – Relação entre mensurandos, sistemas de medição e certificados de calibração

Mensurando	Sistema de medição	Certificado de calibração
Diâmetro	Paquímetro digital	ANEXO B
Base		
Altura		
Área circular		
Área retangular		
Força, CP cilíndrico	Célula de carga	ANEXO D
Força, CP retangular		
Deslocamento, CP cilíndrico	Extensômetro	ANEXO C
Deslocamento, CP retangular		
Módulo de elasticidade, CP cilíndrico	Máquina Universal Instron®	ANEXO A
Módulo de elasticidade, CP retangular		

O paquímetro digital utilizado é do fabricante Mitutoyo, com faixa nominal de 150 mm e resolução de 0,01 mm. O certificado de calibração, anexo B, declara uma incerteza expandida de 0,02 mm. O valor da incerteza expandida associada ao desvio de paralelismo das superfícies de medição para externas (Ime), é de 0,01 mm. Para todos os parâmetros citados o fator de abrangência k=2,00 e 95 % de probabilidade de abrangência.

Já a célula de carga utilizada na máquina de testes universal Instron® apresenta uma faixa nominal de 2 kN e resolução de 0,0001 kN. O certificado de calibração, anexo D, declara uma incerteza expandida de 0,032 kN.

Por fim, o extensômetro utilizado na máquina de testes universal Instron® apresenta uma faixa nominal de 25 mm e resolução de 0,0001 mm. Seu certificado de calibração, anexo C, apresenta os erros relacionados ao deslocamento e a incerteza considerada é 0,3 % da média.

3.3. Identificação dos fatores de influência ou variáveis de entrada para cada mensurando

Os principais fatores de influência na incerteza associadas à medição do diâmetro, base e altura medidos com o paquímetro digital são: a resolução do paquímetro (R), a variabilidade das leituras ($\bar{x}$), a incerteza associada a calibração do paquímetro (C) e a incerteza associada ao desvio de paralelismo para medidas externas (Ime), declarado no certificado de calibração.

A partir do certificado de calibração da célula de carga pode-se relacionar os fatores de influência para a medição da força: a variabilidade das leituras ($\bar{x}$), a resolução da célula de carga (R_{cc}) e a incerteza associada a calibração da célula de carga (C_{cc}).

Analogamente, pelo certificado de calibração do extensômetro, tem-se que as variáveis de entrada para o cálculo da incerteza associada a variação de deslocamento serão: a variabilidade das leituras ($\bar{x}$), a resolução do extensômetro (R_e) e a incerteza associada a calibração do extensômetro (C_e).

3.4. Definição dos modelos matemáticos

Nesta etapa são definidos os modelos matemáticos necessários para avaliação da incerteza associada ao módulo de elasticidade como mostra a Tab. 3.6.

Tabela 3.6 – Modelos matemáticos para cada mensurando

Mensurando	Modelo
Diâmetro	$D = \bar{X} + \Delta R + \Delta C + \Delta Ime$
Base	$Cb = \bar{X} + \Delta R + \Delta C + \Delta Ime$
Altura	$Ca = \bar{X} + \Delta R + \Delta C + \Delta Ime$
Força, CP cilíndrico	$F = \bar{X} + \Delta R_{cc} + \Delta C_{cc}$
Força, CP retangular	$Fr = \bar{X} + \Delta R_{cc} + \Delta C_{cc}$
Deslocamento, CP cilíndrico	$\Delta L = \bar{X} + \Delta R_e + \Delta C_e$
Deslocamento, CP retangular	$\Delta L_r = \bar{X} + \Delta R_e + \Delta C_e$
Área circular	$A_c = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$
Área retangular	$A_r = C_a \cdot C_b$
Módulo de elasticidade, CP cilíndrico	$E_{0c} = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F \cdot l}{A_c \cdot \Delta l}$
Módulo de elasticidade, CP retangular	$E_{0r} = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{Fr \cdot l_r}{A_r \cdot \Delta l_r}$

Para que a incerteza padrão combinada associada à variável de saída de cada modelo matemático possa ser calculada é preciso aplicar a lei de propagação de incertezas nos modelos matemáticos apresentados. Os resultados obtidos são mostrados na Tab. 3.7.

Tabela 3.7 – Aplicação da lei de propagação de incertezas nos modelos matemáticos

Mensurando	Resultado da aplicação da lei de propagação de incertezas
Diâmetro	$u_c^2(D) = \left(\frac{\partial D}{\partial \bar{x}}\right)^2 \cdot u^2(\bar{x}) + \left(\frac{\partial D}{\partial \Delta R}\right)^2 \cdot u^2(\Delta R) + \left(\frac{\partial D}{\partial \Delta C}\right)^2 \cdot u^2(\Delta C) + \left(\frac{\partial D}{\partial \Delta lmeD}\right)^2 \cdot u^2(\Delta lmeD)$
Base	$u_c^2(Cb) = \left(\frac{\partial Cb}{\partial \bar{x}}\right)^2 \cdot u^2(\bar{x}) + \left(\frac{\partial Cb}{\partial \Delta R}\right)^2 \cdot u^2(\Delta R) + \left(\frac{\partial Cb}{\partial \Delta C}\right)^2 \cdot u^2(\Delta C) + \left(\frac{\partial Cb}{\partial \Delta lmeB}\right)^2 \cdot u^2(\Delta lmeB)$
Altura	$u_c^2(Ca) = \left(\frac{\partial Ca}{\partial \bar{x}}\right)^2 \cdot u^2(\bar{x}) + \left(\frac{\partial Ca}{\partial \Delta R}\right)^2 \cdot u^2(\Delta R) + \left(\frac{\partial Ca}{\partial \Delta C}\right)^2 \cdot u^2(\Delta C) + \left(\frac{\partial Ca}{\partial \Delta lmeA}\right)^2 \cdot u^2(\Delta lmeA)$
Área circular	$u_c^2(A) = \left(\frac{\partial A}{\partial D}\right)^2 \cdot u^2(D)$
Área retangular	$u_c^2(Ar) = (Cb)^2 \cdot u^2(Ca) + (Ca)^2 \cdot u^2(Cb)$
Força, CP cilíndrico	$u_c^2(F) = \left(\frac{\partial F}{\partial \bar{x}}\right)^2 \cdot u^2(\bar{x}) + \left(\frac{\partial F}{\partial \Delta Rcc}\right)^2 \cdot u^2(\Delta Rcc) + \left(\frac{\partial F}{\partial \Delta Ccc}\right)^2 \cdot u^2(\Delta Ccc)$
Força, CP retangular	$u_c^2(Fr) = \left(\frac{\partial Fr}{\partial \bar{x}}\right)^2 \cdot u^2(\bar{x}) + \left(\frac{\partial Fr}{\partial \Delta Rcc}\right)^2 \cdot u^2(\Delta Rcc) + \left(\frac{\partial Fr}{\partial \Delta Ccc}\right)^2 \cdot u^2(\Delta Ccc)$
Deslocamento, CP cilíndrico	$u_c^2(\Delta l) = \left(\frac{\partial \Delta l}{\partial \bar{x}}\right)^2 \cdot u^2(\bar{x}) + \left(\frac{\partial \Delta l}{\partial \Delta Re}\right)^2 \cdot u^2(\Delta Re) + \left(\frac{\partial \Delta l}{\partial \Delta Ce}\right)^2 \cdot u^2(\Delta Ce)$
Deslocamento, CP retangular	$u_c^2(\Delta lr) = \left(\frac{\partial \Delta lr}{\partial \bar{x}}\right)^2 \cdot u^2(\bar{x}) + \left(\frac{\partial \Delta lr}{\partial \Delta Re}\right)^2 \cdot u^2(\Delta Re) + \left(\frac{\partial \Delta lr}{\partial \Delta Ce}\right)^2 \cdot u^2(\Delta Ce)$
Modulo de elasticidade, CP cilíndrico	$u_c^2(E_{0c}) = \left(\frac{\partial E_0}{\partial A}\right)^2 \cdot u^2(Ac) + \left(\frac{\partial E_0}{\partial F}\right)^2 \cdot u^2(F) + \left(\frac{\partial E_0}{\partial e}\right)^2 \cdot u^2(e) + \left(\frac{\partial E_0}{\partial \Delta l}\right)^2 \cdot u^2(\Delta l)$
Modulo de elasticidade, CP retangular	$u_c^2(E_{0r}) = \left(\frac{\partial E_0}{\partial A}\right)^2 \cdot u^2(Ar) + \left(\frac{\partial E_0}{\partial F}\right)^2 \cdot u^2(F) + \left(\frac{\partial E_0}{\partial e}\right)^2 \cdot u^2(e) + \left(\frac{\partial E_0}{\partial \Delta l}\right)^2 \cdot u^2(\Delta l)$

Calculando as derivadas parciais os modelos matemáticos resultantes são mostrados na Tab. 3.8.

Tabela 3.8 – Modelos matemáticos após o cálculo das derivadas parciais

Mensurando	Resultados do cálculo das derivadas parciais
Diâmetro	$u_c^2(D) = (1)^2 \cdot u^2(\bar{x}) + (1)^2 \cdot u^2(\Delta R) + (1)^2 \cdot u^2(\Delta C) + (1)^2 \cdot u^2(\Delta ImeD)$
Base	$u_c^2(Cb) = (1)^2 \cdot u^2(\bar{x}) + (1)^2 \cdot u^2(\Delta R) + (1)^2 \cdot u^2(\Delta C) + (1)^2 \cdot u^2(\Delta ImeB)$
Altura	$u_c^2(Ca) = (1)^2 \cdot u^2(\bar{x}) + (1)^2 \cdot u^2(\Delta R) + (1)^2 \cdot u^2(\Delta C) + (1)^2 \cdot u^2(\Delta ImeA)$
Área circular	$u_c^2(A) = \left(\frac{\pi \cdot D}{2}\right)^2 \cdot u^2(D)$
Área retangular	$u_c^2(Ar) = (Cb)^2 \cdot u^2(Ca) + (Ca)^2 \cdot u^2(Cb)$
Força, CP cilíndrico	$u_c^2(F) = (1)^2 \cdot u^2(\bar{x}) + (1)^2 \cdot u^2(\Delta Rcc) + (1)^2 \cdot u^2(\Delta Ccc)$
Força, CP retangular	$u_c^2(Fr) = (1)^2 \cdot u^2(\bar{x}) + (1)^2 \cdot u^2(\Delta Rcc) + (1)^2 \cdot u^2(\Delta Ccc)$
Deslocamento, CP cilíndrico	$u_c^2(\Delta l) = (1)^2 \cdot u^2(\bar{x}) + (1)^2 \cdot u^2(\Delta Re) + (1)^2 \cdot u^2(\Delta Ce)$
Deslocamento, CP retangular	$u_c^2(\Delta lr) = (1)^2 \cdot u^2(\bar{x}) + (1)^2 \cdot u^2(\Delta Re) + (1)^2 \cdot u^2(\Delta Ce)$
Modulo de elasticidade, CP cilíndrico	$u_c^2(E_{0c}) = \left(\frac{F \cdot l}{Ac^2 \cdot \Delta l}\right)^2 \cdot u^2(A) + \left(\frac{F^2 \cdot l}{Ac \cdot \Delta l}\right)^2 \cdot u^2(F) + \left(\frac{F \cdot l^2}{Ac \cdot \Delta l}\right)^2 \cdot u^2(e) + \left(\frac{F \cdot l}{Ac \cdot \Delta l^2}\right)^2 \cdot u^2(\Delta l)$
Modulo de elasticidade, CP retangular	$u_c^2(E_{0r}) = \left(\frac{Fr \cdot lr}{Ar^2 \cdot \Delta lr}\right)^2 \cdot u^2(Ar) + \left(\frac{Fr^2 \cdot lr}{Ar \cdot \Delta lr}\right)^2 \cdot u^2(Fr) + \left(\frac{Fr \cdot lr^2}{Ar \cdot \Delta lr}\right)^2 \cdot u^2(e) + \left(\frac{Fr \cdot lr}{Ar \cdot \Delta lr^2}\right)^2 \cdot u^2(\Delta lr)$

3.5. Cálculo da incerteza padrão associada às variáveis de entrada.

A seguir são apresentadas as informações sobre o cálculo da incerteza padrão associada às variáveis de entrada.

3.5.1 Cálculo da incerteza padrão associada à variabilidade das leituras

Para avaliar a incerteza padrão associada à variabilidade das leituras em todos os casos foi efetuada uma avaliação do Tipo A considerando uma distribuição *T-student* e n-1 graus de liberdade. Para tanto a Eq. (3.8) foi utilizada, onde s representa o desvio padrão e n o número de medições.

$$u(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} \quad (3.8)$$

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

Considerando que todos os sistemas de medição são digitais, a incerteza padrão associada à resolução (R) foi calculada por meio de uma avaliação do Tipo B como mostra a Eq. (3.9). Foram adotados uma distribuição retangular e infinitos graus de liberdade.

$$u(R) = \frac{R}{2\sqrt{3}} \quad (3.9)$$

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

A incerteza padrão associada à calibração dos sistemas de medição foi utilizada a Eq. (3.10). O cálculo foi efetuado por meio de uma avaliação do Tipo B considerando a distribuição e o número de graus de liberdade declarados no certificado de calibração correspondente.

$$u(C) = \frac{U(C)}{kC} \quad (3.10)$$

Na Equação (3.10), $U(C)$ é a incerteza expandida associada à calibração do sistema de medição em questão e kC o fator de abrangência correspondente. Ambos são declarados no certificado de calibração.

De forma similar é determinada a incerteza padrão associada ao desvio de paralelismo entre as superfícies de medição para externas do paquímetro (Ime). Para tanto é utilizada a Eq. (3.11).

$$u(Ime) = \frac{U(Ime)}{kIme} \quad (3.11)$$

Na Equação (3.11), $U(Ime)$ é a incerteza expandida associada ao erro de paralelismo para medição externa e $kIme$ o fator de abrangência correspondente. Ambos são declarados no certificado de calibração.

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

3.6. Cálculo da incerteza expandida associada a cada uma das variáveis de saída

A Equação (3.12) foi utilizada para calcular a incerteza expandida associada a variável de saída.

$$U(y) = k(y) \cdot u_c(y) \quad (3.12)$$

O método GUM recomenda o cálculo de $v_{ef}(med)$ através da Eq. (3.13), equação de Welch-Satterhwaite para posterior determinação do fator de abrangência da medição.:

$$v_{ef}(y) = \frac{u_c(y)^4}{\left[\sum_i^N \frac{(u(x_i) \cdot C(x_i))^4}{v_i} \right]} \quad (3.13)$$

Por meio da Tab. G 2 do GUM determina-se o fator de abrangência $k(y)$

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

Para o cálculo da contribuição de cada variável de entrada na incerteza final, utiliza-se a Eq. (3.14):

$$Cont(\bar{x}) = \frac{u^2(\bar{x}) \cdot 100 \%}{u_c^2(D)} \quad (3.14)$$

3.7. Implementação dos roteiros de cálculo

Todos os roteiros de cálculo desenvolvidos são implementados no Matlab®R2018b para minimizar erros de cálculo. A seguir é mostrado o código desenvolvido para cálculo da incerteza associada à medição do diâmetro do CP cilíndrico.

Código desenvolvido no Matlab® R2018b para cálculo da incerteza associada à medição do diâmetro do CP cilíndrico.

```
clear all
%MEDIDAS PAQUIMETRO DIGITAL
a1= 6.01%mm medida 1
a2= 6.05%mm medida 2
a3= 6.00%mm medida 3
%DADOS DE CALIBRAÇÃO DO PAQUIMETRO
R= 0.01%mm resolução do paquímetro
kC= 2%Fator de abrangência
Uc= 0.02%mm incerteza de medição do paquímetro
UImeD= 0.01%mm incerteza associada a medidas externas
kImeD= 2% Fator de abrangência associado a medidas externas
a= [a1 a2 a3]
b= mean(a)%Media
c= std(a)%Desvio padrão
uMean= c/sqrt(3)% incerteza associada a variabilidade das leituras
uR= R/(2*sqrt(3))% incerteza associada a resolução do paquímetro
uC= Uc/kC % incerteza associada a calibração do paquímetro
uIme= UImeD/kImeD % incerteza associada a medições externas do diâmetro
u2D= uMean^2 + uR^2 + uC^2 + uIme^2
uD= sqrt(u2D)% incerteza padrão associada à variável de saída
Veff= (uD^4)/(((uMean*1)^4)/2)% Graus de liberdade ef
%tabela t-student
kmed= 2.571%Substituir o valor encontrado na tabela para o Veff
UzaoD= kmed*uD% incerteza expandida associada à variável de saída
ContMean= ((uMean^2)*100)/uD^2% Contribuição da variabilidade das leituras
ContR= ((uR^2)*100)/uD^2% Contribuição da resolução do paquímetro
ContC= ((uC^2)*100)/uD^2% Contribuição da calibração do paquímetro
ContIme= ((uIme^2)*100)/uD^2% Contribuição da incerteza associada a medições
externas do diâmetro
disp('RM= '), disp(b), disp('+-'), disp(UzaoD)% resultado de medição
```

Por fim, uma tabela resumo é gerada com todas as informações e os resultados do cálculo para cada mensurando.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos. Para tanto o mesmo foi dividido em: resultados associados ao corpo de prova cilíndrico; resultados associados ao corpo de prova retangular e considerações finais.

4.1 Resultados associados ao corpo de prova cilíndrico

Para expressar os resultados de cada mensurando e as contribuições de suas respectivas variáveis de entrada, são apresentadas a seguir as rotinas de cálculo realizadas no Matlab®2018b e as tabelas com o resumo dos resultados da avaliação da incerteza associada ao módulo de elasticidade do CP cilíndrico.

Na Equação (4.1), observa-se que para determinação do módulo de elasticidade são consideradas quatro variáveis de entrada (VE), que incluem: área da seção transversal do CP cilíndrico, A_c , da força aplicada no teste, F , do deslocamento inicial l e sua variação Δl .

$$E_c = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F \cdot l}{A_c \cdot \Delta l} \quad (4.1)$$

4.1.1 Resultados do cálculo da incerteza associada ao diâmetro do CP cilíndrico

A Tabela 4.1 mostra os valores obtidos durante a medição do diâmetro do CP utilizando paquímetro digital. Nesta tabela são apresentados ainda a média aritmética e o desvio padrão (s) associado para um nível de confiança de 68,27 %. Vale ressaltar que todos os resultados de cálculos são apresentados com dois algarismos a mais do que a resolução exige para reduzir os erros devidos ao arredondamento.

Tabela 4.1 – Valores obtidos durante a medição do diâmetro do CP cilíndrico com paquímetro digital.

Leituras (mm)	Média (mm)	s (mm)
6,00	6,0200	0,0265
6,01		
6,05		

O procedimento desenvolvido para o cálculo da incerteza associada ao diâmetro do CP foi implementado no Matlab®R2018b como mostrado a seguir. Por sua vez a Tab. 4.2, mostra de forma resumida os dados utilizados durante o cálculo e os principais resultados.

Código para cálculo da incerteza associada ao diâmetro do CP cilíndrico.

```

a1= 6.01
a2= 6.05
a3= 6.00
R=0.01
kC= 2
uc= 0.02
ume= 0.01
uImeD=0.01
kImeD=2
a=[a1 a2 a3]
n=3
b=mean(a)
c=std(a)
uMean=c/sqrt(n)
uR=R/(2*sqrt(3))
uC=Uc/kC
uIme=UImeD/kImeD
u2D= uMean^2 + uR^2 + uC^2 + uIme^2
uD= sqrt(u2D)
Veff= (uD^4)/(((uMean*1)^4)/2)
kmed= 2.571
UzaoD= kmed*uD
ContMean= ((uMean^2)*100)/uD^2
ContR= ((uR^2)*100)/uD^2
ContC= ((uC^2)*100)/uD^2
ContIme= ((uIme^2)*100)/uD^2
disp('RM='), disp(b), disp('+-'), disp(UzaoD)

```

Tabela 4.2- Tabela resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada ao diâmetro do CP cilíndrico.

VE	Estimativa (mm)	GL	u (mm)	Contribuição (%)
$\bar{x}$	6,0200	2	0,015269	63,6
R	0,01	∞	0,002900	2,3
C	0,02	∞	0,010000	27,3
ImeD	0,01	∞	0,005000	6,8
Incerteza padrão combinada $u_c(D)$, mm			0,019144	
Graus de liberdade efetivos da medição $v_{\text{ef}}(D)$			5,000	
Fator de abrangência da medição $k(D)$			2,571	
Incerteza expandida $U(D)$, mm			0,0492	

O resultado da medição do diâmetro é $6,02 \pm 0,05$ mm para 95 % de probabilidade de abrangência e um fator de abrangência $k(D)=2,57$.

A partir da Tab. 4.2. se conclui que a variável que mais contribuiu para a incerteza final na medição do diâmetro foi a variabilidade das leituras, sendo responsável por 63,6 % da incerteza final. Uma maneira de reduzir esta parcela da incerteza poderia ser aumentando o número de medições do diâmetro para cinco. A incerteza expandida associada ao diâmetro é de 0,05 mm a que pode ser considerada adequada tendo em vista que somente três medições foram efetuadas.

4.1.2 Resultados do cálculo da incerteza associada à área da secção transversal do corpo de prova cilíndrico

Um único valor de área foi determinado utilizando o valor médio dos três diâmetros do CP, 6,02 mm, resultando em 28,4631 mm². Para o cálculo da incerteza associada à área da secção transversal do CP foi implementado uma rotina no Matlab®R2018b como mostrado a seguir.

Código para cálculo da incerteza associada à área do CP cilíndrico.

```
D=6.0200; uD=0.0191 ;Vd=5
media= pi*D^2/4
u2A=((pi*D/2)^2)*uD^2
coef=((pi*D/2)^2)
uA = sqrt(u2A)
Veff= (uA^4)/(((uD*1)^4)/Vd)
kmed= 1.96
UzaoA= kmed*uA
ContD= ((uD^2)*100)/uD^2
disp('RM='), disp(media), disp('+-'), disp(UzaoA)
```

Aplicando essa rotina de cálculo foram obtidos os resultados mostrados na Tab. 4.3.

Tabela 4.3 - Tabela resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada à área da secção transversal do CP cilíndrico.

VE	Estimativa (mm)	GL	CS	u(mm)	Contribuição (%)
D	6,0200	2	89,4196	0,019144	100,0
Incerteza padrão combinada $u_c(Ac)$, mm ²				0,180638	
Graus de liberdade efetivos da medição $\nu_{ef}(Ac)$				∞	
Fator de abrangência da medição $k(Ac)$				1,96	
Incerteza expandida $U(Ac)$, mm ²				0,3540	

O resultado da medição da área é de $28,46 \pm 0,36$ mm² com 95 % de probabilidade de abrangência e um fator de abrangência de $k(Ac) = 1,96$.

A partir da Tab. 4.3, observa-se que o diâmetro é a única variável de entrada que contribui para a incerteza associada ao cálculo da área, Ac . A incerteza expandida associada à área representa 1,26 % do valor desta e pode ser considerada adequada. Entretanto, uma maneira de reduzir esta incerteza é aumentar o número de medições para o diâmetro pois a variabilidade das leituras é a variável de entrada que mais contribui para a incerteza deste mensurando.

4.1.3 Resultados do cálculo da incerteza associada à força aplicada para o CP cilíndrico

A força aplicada durante o ensaio é medida pela célula de carga da máquina de teste universal da fabricante Instron® modelo 8801 e seus resultados são apresentados em um arquivo Excel® gerado durante o ensaio. As leituras dos 21 valores de força gerados pelo arquivo são apresentadas na Tab. 4.4.

Tabela 4.4- Leituras da força geradas pela máquina de teste universal durante o ensaio do CP cilíndrico.

Leituras (kN)							Média (kN)	s (kN)
8,2389	8,4675	8,5621	8,7635	8,8352	9,0115	9,1880		
8,2577	8,5016	8,6214	8,7879	8,8552	9,0915	9,1951		
8,3805	8,5269	8,7242	8,8096	8,8865	9,1524	9,2038	8,764809	0,305307

O código no Matlab®R2018b apresentado a seguir faz a leitura do arquivo Excel® com os valores de força gerados pela máquina universal de testes. Em seguida o cálculo da incerteza associada à medição da força aplicada ao CP cilíndrico é efetuado. Os resultados do cálculo da incerteza associada à força são resumidos na Tab. 4.5.

Código para cálculo da incerteza associada à força do CP cilíndrico.

```
F = xlsread('CorpoProva3Diametro.csv',1,'C185:C205')
media=mean(F)
desvio=std(F)
uMedia=desvio/sqrt(n)
Rcc=0.01 ; kC= 2 ; Uc= 0.09 ; n=21
uR=Rcc/(2*sqrt(3))
uC=Uc/kC
uF= sqrt(uMedia^2 + uR^2 + uC^2 )
u2F= uF^2
Veff= (uF^4)/(((uMedia*1)^4)/(n-1))
kmed= 2.02
UzaoF= kmed*uF
ContMean= ((uMedia^2)*100)/uF^2
ContR= ((uR^2)*100)/uF^2
ContC= ((uC^2)*100)/uF^2
disp('RM= '), disp(media), disp('+- '), disp(UzaoF)
```

Tabela 4.5 – Tabela resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada à força aplicada ao CP cilíndrico.

VE	Estimativa (kN)	GL	u (kN)	Contribuição (%)
$\bar{x}_{cc}$	8,764809	20	0,066666	68,6
Rcc	0,01	∞	0,002887	0,1
Ccc	0,09	∞	0,045000	31,3
Incerteza padrão combinada $u_c(F)$, kN			0,080484	
Graus de liberdade efetivos da medição $vef(F)$			43,0	
Fator de abrangência da medição $k(F)$			2,02	
Incerteza expandida $U(F)$, kN			0,1625	

O resultado da medição da força é de $8,76 \pm 0,17$ kN com 95 % de probabilidade de abrangência e um fator de abrangência de $k(F) = 2,02$.

Conclui-se pela Tab. 4.5 que a variabilidade das leituras foi o fator que mais contribuiu para a incerteza final na medição da força, sendo responsável por 68,6 % da incerteza. Como são avaliadas 21 leituras para a força pode-se considerar que a incerteza expandida de 0,17 kN é adequada e representa 1,94 % do valor da média.

4.1.4 Resultados do cálculo da incerteza associada aos deslocamentos para o corpo de prova cilíndrico

O deslocamento de referência inicial, l , é medido pelo extensômetro e apresentado no arquivo Excel® gerado durante o ensaio pela máquina de teste universal e seu valor é de

0,13939 mm. A incerteza padrão associada é 0,3 % do valor médio, portanto, $u_c(l)=0,00024$ mm.

Para avaliar a incerteza associada à variação de deslocamento, Δl , pelo certificado de calibração do extensômetro as variáveis de entrada que contribuem para a incerteza desse mensurando são respectivamente: a variabilidade das leituras ($\bar{x}_e$), a resolução do extensômetro (R_e) e a incerteza associada à calibração do extensômetro (C_e). O arquivo Excel® gerado durante o ensaio apresenta 9 leituras para a variação de deslocamento e elas são apresentadas na Tab. 4.6 assim como a média e o desvio padrão associados.

Tabela 4.6- Leituras da variação do deslocamento geradas pela máquina de teste universal durante o ensaio do CP cilíndrico.

Leituras (mm)							Média (mm)	s (mm)
0,1224	0,1254	0,1269	0,1301	0,1312	0,1339	0,1369		
0,1225	0,1259	0,1276	0,1305	0,1315	0,1351	0,1369		
0,1241	0,1263	0,1295	0,1307	0,1322	0,1357	0,1369	0,130104	0,004699

O código no Matlab®R2018b apresentado a seguir faz a leitura dos valores de deslocamento armazenados no arquivo Excel® e calcula a incerteza associada à medição da variação do deslocamento. Os resultados decorrentes são resumidos na Tab. 4.7.

Código para cálculo da incerteza associada à variação do deslocamento do CP cilíndrico.

```
deltaL = xlsread('CorpoProva3Diametro.csv',1,'B185:B205');
n=21
b=mean(deltaL)
E=0.003*0.13939
uCe=E/sqrt(3)
u2Ce= uCe^2
Rmaq=0.00001; kC= 2
c=std(deltaL)
uMedia=c/sqrt(n)
uRmaq=Rmaq/(2*sqrt(3))
udeltaL= sqrt(uMedia^2 + uRmaq^2 + uCe^2)
u2deltaL=udeltaL^2
Veff= (udeltaL^4)/(((uMedia*1)^4)/(n-1))
kmed2= 2.07
UzaodeltaL= kmed2*udeltaL
ContMean= ((uMedia^2)*100)/udeltaL^2
ContR= ((uR^2)*100)/udeltaL^2
ContC= ((uC^2)*100)/udeltaL^2
disp('RM= '), disp(b), disp('+-'), disp(UzaodeltaL)
```

Tabela 4.7 – Tabela resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associado à variação do deslocamento do CP cilíndrico.

VE	Estimativa (mm)	GL	u (mm)	Contribuição (%)
$\bar{x}_e$	0,130104	20	0,001005	94,8
Re	0,00001	∞	0,000004	0
Ce	0,00024	∞	0,000244	5,2
Incerteza padrão combinada $u_c(\Delta l)$, mm			0,001034	
Graus de liberdade efetivos da medição $\nu_{ef}(\Delta l)$			22,00	
Fator de abrangência da medição $k(\Delta l)$			2,070	
Incerteza expandida $U(\Delta l)$, mm			0,0022	

O resultado da medição da variação do deslocamento é de $0,130 \pm 0,003$ mm com 95 % de probabilidade de abrangência e um fator de abrangência de $k(\Delta l) = 2,07$.

A variabilidade das leituras foi o fator que mais contribuiu para a incerteza final do deslocamento, sendo responsável por 94,8 % da incerteza. A incerteza expandida de 0,003 mm que representa 2,31 % do valor médio pode ser considerada adequada pois o valor do desvio padrão das 21 leituras da variação do deslocamento geradas pela máquina universal de teste foi de 0,0047 mm, justificando o valor mais elevado da incerteza em relação aos demais mensurandos.

4.2 Resultados do cálculo da incerteza associada ao módulo de elasticidade do corpo de prova cilíndrico

Um único valor médio é fornecido pela máquina para o módulo de elasticidade do CP cilíndrico, 214,655 Gpa. Com os resultados anteriores, sabe-se que a média da força é $F = 8,7648$ kN e $u_c(F) = 0,0804$ kN, a média da área da secção transversal do CP cilíndrico é $A_c = 28,4631$ mm² e $u_c(A_c) = 0,1817$ mm, o deslocamento de referência inicial, $l = 0,13939$ mm e $u_c(l) = 0,00024$ mm, por fim, a média da variação de deslocamento é $\Delta l = 0,1301$ mm e $u_c(\Delta l) = 0,0011$ mm.

A rotina de cálculo no Matlab® R2018b apresentada a seguir é utilizada para o cálculo da incerteza associada ao módulo de elasticidade utilizando todos os resultados citados. A Tabela 4.8 apresenta o resumo dos resultados decorrentes do cálculo.

Código para cálculo da incerteza associada ao módulo de elasticidade do CP cilíndrico.

```
mod = xlsread('CorpoProva3Diametro.csv',1,'B1:B1');
media=mean(mod)
F= 8.7648
l= 0.13939
A= 28.4631
deltaL= 0.1301
a= (F*l) / (deltaL*A^2)
b= (l*F^2) / (deltaL*A)
c= (F*l^2) / (deltaL*A)
d= (F*l) / (A*deltaL^2)
u2A= 0.0326
u2F=0.0065
u2Ce = 5.8289e-08
u2deltaL = 1.1131e-06
pA = ((a^2)*(u2A))
pF = ((b^2)*(u2F))
p1 = ((c^2)*(u2Ce))
pdelta = ((d^2)*(u2deltaL))
uElast= sqrt(pA+pF+p1 + pdelta)
u2Elast = uElast^2
Vd=5
Vf=43
VdeltaL = 22
Veff= (u2Elast^2) / ( (((u2A)^2)/Vd) + (((u2F)^2)/Vf) +
(((u2deltaL)^2)/VdeltaL))
kmed= 12.706
UzaoElast= kmed*uElast
ContA= ((u2A)*100)/u2Elast
ContF= ((u2F)*100)/u2Elast
ContL= ((u2Ce)*100)/u2Elast
ContDeltaL= ((u2deltaL)*100)/u2Elast
disp('RM= '), disp(media), disp('+- '), disp(UzaoElast)
```

Tabela 4.8 – Tabela resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada ao módulo de elasticidade do CP cilíndrico.

VE	Estimativa	GL	CS	u	Contribuição (%)
Ac	28,4631 mm ²	1	0,0116	0,180638 mm ²	83,4
F	8,7648 kN	20	2,8917	0,080484 kN	16,6
l	0,13939 mm	1	0,0460	0,000241 mm	0
Δl	0,13010 mm	20	2,5359	0,001034 mm	0
Incerteza padrão combinada $u_c(E_c)$, GPa				0,233241	
Graus de liberdade efetivos da medição $vef(E_c)$				1	
Fator de abrangência da medição $k(E_c)$				12,706	
Incerteza expandida $U(E_c)$, GPa				2,9626	

O resultado da medição do módulo de elasticidade é de $214,66 \pm 2,97$ GPa com 95 % de probabilidade de abrangência e um fator de abrangência de $k(E_c) = 12,71$.

Observa-se pela Tab. 4.8 que a parcela associada à incerteza da área é a principal contribuinte para a incerteza padrão combinada associada ao módulo de elasticidade, representando 83,4 % do valor final tendo sendo este resultado esperado tendo em vista que somente três medições foram efetuadas para o diâmetro. O valor da incerteza expandida, 2,97 GPa, representa 1,38 % em relação à média e é coerente ao registrado por Já Kostic et al., (2021) para a incerteza associada ao módulo de elasticidade em ensaios de tração pelos métodos convencionais, 1,97 %, e SLTTD, 1,56 %. Roberto Cagliero et al., (2015) também utilizaram o método GUM para o cálculo da incerteza associada ao módulo de elasticidade e obtiveram como resultado uma incerteza de 3,24 % para um nível de confiança de 95 %, indicando que a metodologia utilizada apresentou resultados próximos aos encontrados na literatura e ligeiramente melhores.

4.3 Resultados associados ao corpo de prova retangular

Na Equação (4.2) é notável a necessidade de avaliar a incerteza associada à área da secção transversal do CP retangular, A_r , a força aplicada no teste, F_r , o deslocamento inicial l_r e sua variação Δl_r .

$$E_c = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F_r \cdot l_r}{A_r \cdot \Delta l_r} \quad (4.2)$$

4.3.1 Resultados do cálculo da incerteza associada à altura da secção transversal do corpo de prova retangular

A Tabela 4.9 mostra os valores obtidos durante a medição da altura da secção transversal do CP utilizando paquímetro digital. Nesta tabela são apresentados ainda a média aritmética e o desvio padrão associado para um nível de confiança de 68,27 %.

Tabela 4.9 – Valores obtidos durante a medição da altura do CP retangular com paquímetro digital.

Leituras (mm)	Média (mm)	s (mm)
6,95	6,9600	0,0265
6,99		
6,94		

O procedimento desenvolvido para o cálculo da incerteza associada à altura do CP foi implementado no Matlab®R2018b como mostrado a seguir. Por sua vez a Tab. 4.10, mostra de forma resumida os dados utilizados durante o cálculo e os principais resultados.

Código para cálculo da incerteza associada à altura da secção transversal do CP retangular.

```
a1= 6.95
a2= 6.99
a3= 6.94
R=0.01
kC= 2
uc= 0.02
ume= 0.01
uImeD=0.01
kImeD=2
a=[a1 a2 a3]
n=3
b=mean(a)
c=std(a)
uMean=c/sqrt(n)
uR=R/(2*sqrt(3))
uC=Uc/kC
uIme=UImeD/kImeD
uCa= sqrt(uMean^2 + uR^2 + uC^2 + uIme^2)
Veff= (uCa^4)/(((uMean*1)^4)/2)
kmed= 2.571
UzaoCa= kmed*uCa
ContMean= ((uMean^2)*100)/uCa^2
ContR= ((uR^2)*100)/uCa^2
ContC= ((uC^2)*100)/uCa^2
ContIme= ((uIme^2)*100)/uCa^2
disp('RM='), disp(b), disp('+-'), disp(UzaoCa)
```

Tabela 4.10- Tabela resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada à altura do CP retangular.

VE	Estimativa (mm)	GL	u (mm)	Contribuição (%)
$\bar{x}$	6,9600	2	0,015269	63,6
R	0,01	∞	0,002900	2,3
C	0,02	∞	0,010000	27,3
Ime	0,01	∞	0,005000	6,8
Incerteza padrão combinada $u_c(Ca)$, mm			0,019144	
Graus de liberdade efetivos da medição $vef(Ca)$			5,000	
Fator de abrangência da medição $k(Ca)$			2,571	
Incerteza expandida $U(Ca)$, mm			0,0492	

O resultado da medição da altura é de $6,96 \pm 0,05$ mm com 95 % de probabilidade de abrangência e um fator de abrangência de $k(Ca) = 2,57$.

Nota-se que os principais fatores de influência da incerteza associada à altura são a variabilidade das leituras com 63,6 % e a calibração do paquímetro digital com 27,3 %. Uma possibilidade de reduzir a incerteza é aumentar o número de medições para a altura. O valor da incerteza expandida de 0,05 mm pode ser considerado adequado sabendo que foram realizadas apenas três medições.

4.3.2 Resultados do cálculo da incerteza associada à base da secção transversal do corpo de prova retangular

A Tabela 4.11 mostra os valores obtidos durante a medição da base da secção transversal do CP utilizando paquímetro digital, sabendo que a média aritmética e o desvio padrão tem um nível de confiança de 68,27 %.

Tabela 4.11 – Valores obtidos durante a medição da base da secção transversal do CP retangular.

Leituras (mm)	Média (mm)	s (mm)
12,73	12,7333	0,0058
12,74		
12,73		

O procedimento desenvolvido para o cálculo da incerteza associada à base do CP foi implementado no Matlab®R2018b como mostrado a seguir. Por sua vez a Tab. 4.12, mostra de forma resumida os dados utilizados durante o cálculo e os principais resultados.

Código para cálculo da incerteza associada à base da secção transversal do CP retangular

```
a1= 12.73; a2= 12.74; a3= 12.73; R=0.01; kC= 2; Uc= 0.02; Ume= 0.01;
UImeD=0.01; kImeD=2; n =3
a=[a1 a2 a3]
b=mean(a); c=std(a)
uMean=c/sqrt(n)
uR=R/(2*sqrt(3)); uC=Uc/kC
uIme=UImeD/kImeD
uCb= sqrt(uMean^2 + uR^2 + uC^2 + uIme^2)
Veff= (uCb^4)/(((uMean*1)^4)/2); kmed= 1.97
UzaoCb= kmed*uCb
ContMean= ((uMean^2)*100)/uCb^2
ContR= ((uR^2)*100)/uCb^2
ContC= ((uC^2)*100)/uCb^2
ContIme= ((uIme^2)*100)/uCb^2
disp('RM= '), disp(b), disp('+-'), disp(UzaoCb)
```

Tabela 4.12- Tabela resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associados à base do CP retangular.

VE	Estimativa (mm)	GL	u (mm)	Contribuição (%)
$\bar{x}$	12,7333	2	0,003349	7,7
R	0,01	∞	0,002900	5,7
C	0,02	∞	0,010000	69,2
Ime	0,01	∞	0,005000	17,3
Incerteza padrão combinada $u_c(Cb)$, mm			0,012026	
Graus de liberdade efetivos da medição			338,000	
Fator de abrangência da medição			1,97	
Incerteza expandida $U(Cb)$, mm			0,0237	

O resultado da medição da base é de $12,73 \pm 0,03$ mm com 95 % de probabilidade de abrangência e um fator de abrangência de $k(Cb) = 1,97$.

Observa-se que o principal fator de influência da incerteza associada à base é a calibração do paquímetro digital com 69,2 %. Este fato e o valor da incerteza expandida de 0,03 mm podem ser considerados adequados tendo em vista o baixo desvio padrão de 0,0058 mm.

4.3.3 Resultados do cálculo da incerteza associada à área da secção transversal do corpo de prova retangular

Um único valor de área foi determinado utilizando o valor médio das três bases e três alturas, 12,73 mm e 6,96 mm, o valor médio da área é 88,6008 mm². Para o cálculo da incerteza associada à área da secção transversal do CP foi implementado uma rotina no Matlab®R2018b como mostrado a seguir.

Código para cálculo da incerteza associada à área do CP retangular.

```
mediaCa=6.96; mediaCb=12.73; media=mediaCa*mediaCb
uCa=0.0191; uCb=0.0120; total=uCa+uCb
Ca=(((mediaCb)^2)*(uCa)^2)
Cb=(((mediaCa)^2)*(uCb)^2)
u2Ar=(((mediaCb)^2)*(uCa)^2) + (((mediaCa)^2)*(uCb)^2)
uAr=sqrt(u2Ar)
Veff= (uAr^4)/((((uCa*1)^4)/5)+(((uCb*1)^4)/338)); kmed=1.96
UzaoAr=kmed*uAr
ContCa= ((uCa)*100)/total
ContCb= ((uCb)*100)/total
disp('RM='), disp(media), disp('+-'), disp(UzaoAr)
```

Os resultados do cálculo são apresentados na tabela resumo, Tab.4.13.

Tabela 4.13 – Tabela resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada à área do CP retangular.

VE	Estimativa (mm)	GL	CS	u (mm)	Contribuição (%)
<i>Ca</i>	6,9600	2	162,0529	0,019144	61,4
<i>Cb</i>	12,7330	2	48,4416	0,012026	38,6
Incerteza padrão combinada $u_c(Ar)$, mm ²				0,257108	
Graus de liberdade efetivos da medição $\nu_{ef}(Ar)$				∞	
Fator de abrangência da medição $k(Ar)$				1,960	
Incerteza expandida $U(Ar)$, mm ²				0,5039	

O resultado da medição da área é de $88,60 \pm 0,51$ mm² com 95 % de probabilidade de abrangência e um fator de abrangência de $k(Ar) = 1,96$.

Pelo resultado obtido para incerteza padrão da área Ar , a parcela associada à altura contribui com 61,4 % sendo a principal responsável pela incerteza. O valor da incerteza expandida de 0,51 mm² pode ser considerado adequado tendo em vista que representa 0,58 % da média e poderia ser reduzido com o aumento das medições da altura e da base para cinco.

4.3.4 Resultados do cálculo da incerteza associada à força aplicada para o CP retangular

A força aplicada é obtida pela célula de carga da máquina de teste universal da fabricante Instron® modelo 8801 e seus resultados são apresentados em um arquivo Excel® gerado durante o ensaio. As nove leituras geradas pelo arquivo são apresentadas na Tab.4.14 assim como a média e o desvio padrão.

Tabela 4.14 – Leituras da força geradas pela máquina de teste universal durante o ensaio do CP retangular.

Leituras (kN)			Média (kN)	s (kN)
6,3181	6,6107	7,0165		
6,4212	6,7819	7,0979		
6,5086	6,9124	7,2647	6,770222	0,326537

O Matlab®2018b é utilizado para o cálculo da incerteza associada à força. Os resultados são apresentados na Tab.4.14.

Código para cálculo da incerteza associada à força aplicada ao CP retangular

```
F = xlsread('CorpoProva3Retangular.csv',1,'C70:C78')
n=9
media=mean(F)
desvio=std(F)
uMedia=desvio/sqrt(n)
Rcc=0.01
uR=Rcc/(2*sqrt(3))
kC= 2
Uc= 0.09
uC=Uc/kC
uF= sqrt(uMedia^2 + uR^2 + uC^2 )
u2F= uF^2
Veff= (uF^4)/(((uMedia*1)^4)/(n-1))
kmed= 2.09
UzaoF= kmed*uF
ContMean= ((uMedia^2)*100)/uF^2
ContR= ((uR^2)*100)/uF^2
ContC= ((uC^2)*100)/uF^2
disp('RM='), disp(media), disp('+-'), disp(UzaoF)
```

Tabela 4.15 – Tabela resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada à força aplicada ao CP retangular.

VE	Estimativa (kN)	GL	u (kN)	Contribuição (%)
$\bar{x}_{cc}$	6,770222	8	0,108846	85,3
Rcc	0,01	∞	0,002900	0,1
Ccc	0,09	∞	0,045000	14,6
Incerteza padrão combinada $u_c(F_r)$, kN			0,117817	
Graus de liberdade efetivos da medição $vef(F_r)$			11,00	
Fator de abrangência da medição $k(F_r)$			2,20	
Incerteza expandida $U(F_r)$, kN			0,2592	

O resultado da medição da força é de $6,77 \pm 0,26$ kN com 95 % de probabilidade de abrangência e um fator de abrangência de $k(F_r) = 2,20$.

Observa-se que o principal contribuinte para a incerteza associada à força é a variabilidade das leituras com 85,3 %. A incerteza expandida, 0,26 kN, representa 3.84 % da média que pode ser considerada adequada tendo em vista que o desvio padrão das nove leituras geradas é de 0,3265 kN.

4.3.5 Resultados associados aos deslocamentos para o corpo de prova retangular

O deslocamento de referência inicial, l_r , é medido pelo extensômetro e apresentado no arquivo Excel® gerado durante o ensaio pela máquina de teste universal e seu valor é de 0,08498 mm. A incerteza padrão associada é considerada 0,3 % do valor médio, portanto, $u_c(l_r)=0,00025$ mm.

O arquivo Excel® gerado durante o ensaio apresenta nove leituras para a variação de deslocamento e elas são apresentadas na Tab. 4.16, assim como a média e o desvio padrão associados.

Tabela 4.16 – Leituras da variação do deslocamento geradas pela máquina de teste universal durante o ensaio do CP retangular.

Leituras (mm)			Média (mm)	s (mm)
0,0695	0,0738	0,0795		
0,0711	0,0761	0,0806		
0,0721	0,0781	0,0827		
			0,075944	0,004596

Para o cálculo da incerteza associada à variação do deslocamento é implementado uma rotina no Matlab®R2018b como mostrado a seguir e gerado a tabela com os resultados resumidos, Tab. 4.17.

Código para cálculo da incerteza associada à variação do deslocamento do CP retangular.

```
deltaL = xlsread('CorpoProva3Retangular.csv',1,'B70:B78');
n=20
b=mean(deltaL)
E=0.003*0.08498
uCe=E/sqrt(3)
u2Ce= uCe^2
kmed= 1.96
UzaoCe= kmed*uCe
Rmaq=0.00001
kC= 2
c=std(deltaL)
uMedia=c/sqrt(3)
uRmaq=Rmaq/(2*sqrt(3))
udeltaL= sqrt(uMedia^2 + uRmaq^2 + uCe^2)
u2deltaL=udeltaL^2
Veff= (udeltaL^4)/(((uMedia*1)^4)/(n-1))
kmed2= 2.09
UzaodeltaL= kmed2*udeltaL
disp('RM='), disp(b), disp('+-'), disp(UzaodeltaL)
```

Tabela 4.17 – Tabela resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada à variação do deslocamento CP retangular

VE	Estimativa (mm)	GL	u (mm)	Contribuição (%)
$\bar{x}_e$	0,075944	8	0,001532	93,7
Re	0,00001	∞	0,000003	0
Ce	0,00025	∞	0,000100	6,3
Incerteza padrão combinada $u_c(\Delta l_r)$, mm			0,001535	
Graus de liberdade efetivos da medição $\nu_{ef}(\Delta l_r)$			8	
Fator de abrangência da medição $k(\Delta l_r)$			2,306	
Incerteza expandida $U(\Delta l_r)$, mm			0,0035	

O resultado da medição da variação do deslocamento é de $0,076 \pm 0,004$ mm com 95 % de probabilidade de abrangência e um fator de abrangência de $k(\Delta l_r) = 2,306$.

Observa-se que semelhante ao CP cilíndrico, a variabilidade das leituras é a principal contribuinte com a incerteza associada à variação do deslocamento, 93,7 %. A incerteza expandida de 0,0035 mm representa 4,6 % da média e este valor pode ser considerado adequado tendo em visto o desvio padrão associada as 9 leituras geradas pela máquina de testes universal de 0,0046 mm.

4.4 Resultados associados ao módulo de elasticidade do corpo de prova retangular

Um único valor do módulo de elasticidade é fornecido como média para o CP retangular, 163,6562 Gpa. Com os resultados anteriores, sabe-se que a média da força $Fr = 6,7702$ kN e $u_c(Fr) = 0,1178$ kN, a média da área da secção transversal do CP $Ar = 88,6008$ mm² e $u_c(Ar) = 0,2571$ mm, o deslocamento de referência inicial, $l_r = 0,08498$ mm e $u_c(l_r) = 0,00025$ mm, por fim, a média da variação de deslocamento $\Delta l_r = 0,0759$ mm e $u_c(\Delta l_r) = 0,0015$ mm.

A rotina de cálculo no Matlab®R2018b apresentado a seguir é utilizada para o cálculo da incerteza associada ao módulo de elasticidade do CP retangular. O resumo dos resultados é apresentado na Tab. 4.18.

Código para cálculo da incerteza associada ao módulo de elasticidade do CP retangular.

```
mod = xlsread('CorpoProva3Retangular.csv',1,'B1:B1');
media=mean(mod)
F= 6.7702
l= 0.08498
A= 88.6008
deltaL= 0.0759
a= (F*l) / (deltaL*A^2)
b= (l*F^2) / (deltaL*A)
c= (F*l^2) / (deltaL*A)
d= (F*l) / (A*deltaL^2)
uA=0.2571
uF=0.1178
uCe=0.000025
udeltaL=0.0015
u2A= 0.0661
u2F=0.0139
u2Ce = 2.1665e-08
u2deltaL = 2.3394e-06
utotal=uA+uF+uCe+udeltaL
uElast= sqrt( (a^2)*(uA) + (b^2)*(uF) + (c^2)*(uCe) + (d^2)*(u2deltaL))
u2Elast = uElast^2
Va=163740; Vf=11; VdeltaL = 8
Veff= (u2Elast^2) / ( (((u2A)^2)/Va) + (((u2F)^2)/Vf) +
(((u2deltaL)^2)/VdeltaL))
kmed= 12.706
UzaoElast= kmed*uElast
ContA= ((uA)*100)/utotal
ContF= ((uF)*100)/utotal
ContL= ((uCe)*100)/utotal
ContDeltaL= ((udeltaL)*100)/utotal
disp('RM= '), disp(media), disp('+- '), disp(UzaoElast)
```

Tabela 4.18 – Tabela resumo com os dados referentes ao cálculo da incerteza de medição associada ao módulo de elasticidade CP retangular.

VE	Estimativa	GL	CS	u	Contribuição (%)
Ar	88,6008 mm ²	1	0,0010	0,257108 mm ²	68,3
F	6,77022 kN	8	0,5792	0,117817 kN	31,3
l	0,08498 mm	1	0,0073	0,000025 mm	0,
Δl	0,07590 mm	8	1,1272	0,001503 mm	0,4
Incerteza padrão combinada $u_c(Er)$, GPa				0,198832	
Graus de liberdade efetivos da medição $vef(Er)$				1	
Fator de abrangência da medição $k(Er)$				12,706	
Incerteza expandida $U(Er)$, GPa				2,5260	

O resultado da medição do módulo de elasticidade é de $163,66 \pm 2,53$ GPa com 95 % de probabilidade de abrangência e um fator de abrangência de $k(E_r) = 12,71$.

Observa-se que as principais parcelas associadas à incerteza do módulo de elasticidade do CP retangular são: a força que contribui com 31,3 % e a área com 68,3 %. O valor da incerteza expandida, 2,53 GPa, representa 1,55 % em relação à média e pode ser considerado adequado quando comparado ao valor obtido para o CP cilíndrico de 1,38%. Roberto Cagliero et al., (2015) que também utilizaram o método GUM para o cálculo da incerteza associada ao módulo de elasticidade e obtiveram como resultado uma incerteza de 3,24% para um nível de confiança de 95 % enquanto Já Kostic et al., (2021) encontraram valores mais próximos aos resultados deste trabalho para a incerteza associada ao módulo de elasticidade em ensaios de tração pelos métodos convencionais, 1,97 %, e SLTTD, 1,56% indicando que a metodologia utilizada apresentou resultados próximos aos encontrados na literatura.

4.5. Considerações finais

A partir dos resultados obtidos as seguintes recomendações são apresentadas visando reduzir a incerteza associada ao módulo de elasticidade.

- ✓ Aumentar para cinco o número de medições do diâmetro, da base e da altura.
- ✓ Aumentar o número de corpos de provas analisados para cinco CP cilíndricos e cinco CP retangulares.
- ✓ Utilizar um paquímetro digital com resolução menor que 0,01 mm, como 0,005 mm, para maior precisão do resultado de medição.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou a incerteza associada ao módulo de elasticidade a partir do ensaio de tração realizado na máquina de teste universal da fabricante Instron® modelo 8801 utilizando o método GUM. Foram obtidos resultados válidos tanto para o CP de secção transversal cilíndrica, quanto para o CP de secção transversal retangular. A seguir são apresentadas as principais conclusões desse trabalho.

a) A incerteza expandida associada ao módulo de elasticidade do CP cilíndrico, fabricado em aço 4340, foi de 2,97 GPa que representa 1,4 % da média. A incerteza expandida associada ao CP retangular, fabricado em aço 304, foi de 2,53 GPa, representando 1,5 % da média. O nível de confiança é 95 % em ambos os casos.

b) O principal ponto de melhoria para reduzir a incerteza obtida é o aumento do número de medições do diâmetro do CP cilíndrico, além da altura e da base do CP retangular, de três para cinco, para reduzir a contribuição da variável de entrada associada à variabilidade das leituras que foi a principal contribuinte para a incerteza final destes mensurandos.

c) A implementação dos roteiros de cálculo da incerteza dos diversos mensurandos utilizando o Matlab®R2018b facilita a manipulação de dados, a leitura direta dos dados dos arquivos Excel® gerados pela máquina de testes e contribui para reduzir erros de cálculo. Realizar esta prática provou-se importante para o desenvolvimento do trabalho e visa colaborar com o projeto global tendo em vista que a metodologia desenvolvida pode ser usada para calcular a incerteza associada ao módulo de elasticidades de outros CP a partir da adaptação das rotinas de cálculo com as novas condições para cada CP.

REFERÊNCIAS

Aço 4340: Propriedades, Tratamento térmico e Preço. Aços Nobre – Ferro e Aços especiais, 2021. Disponível em: <<https://acosnobre.com.br/blog/aco-4340-propriedades-tratamento-termico-preco-dureza/>>. Acesso em: 15 set. 2021.

AISI 304 (S30400) Stainless Steel. Makeitfrom.com, 2019. Disponível em: <<https://www.makeitfrom.com/material-properties/AISI-304-S30400-Stainless-Steel>>. Acesso em: 19 set. 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM A276 / A276M -17: **Standard Specification for Stainless Steel Bars and Shapes.** West Conshohocken: Astm International, 2017.

ANDERSON, T.L., **Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications**, 3.ed., Boca Raton, FL: CRC Press llc, 2005. 630p. DOI: 10.1201/9781420058215.

ASHBY, M. F. **Seleção de materiais no projeto mecânico.** 4 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 6892: materiais metálicos –ensaio de tração. **Parte 1: método de ensaio à temperatura ambiente.** Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 87/2000; **Aço carbono e ligados para construção mecânica - Designação e composição química.** Rio de Janeiro, 2000. 19p.

BATTAGIN, I.L.S. **Módulo de elasticidade do concreto: como analisar e especificar.** Disponível em: http://www.abece.com.br/web/download/pdf/Eventos_EM_3_2007.pdf . Acesso em: 11 jan 2022.

BEER, F. P.; JR., E. R. J. **Resistência dos Materiais.** 5 ed. Porto Alegre: Pearson, Makron Books, 2011. 800 p.

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

BS EN ISO 5198:1999. **Centrifugal, mixed flow and axial pumps - Code for hydraulic performance tests precision class.**

CABRAL, P. **Erros e Incertezas nas medições.** 2014. Disponível em: <<http://www.peb.ufrj.br/cursos/ErrosIncerteza.pdf>>. Acesso em: 10 set. 2021.

CAGLIERO, R. **Measurement of elastic modulus by instrumented indentation in the macro-range: Uncertainty evaluation.** International Journal Of Mechanical Sciences, 2015.

CALLISTER, JR., WILLIAM D., **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** Rio de Janeiro, LTC, 2012.

COSSOLINO, L. C.; PEREIRA, A. H. A. **Módulos elásticos: visão geral e métodos de caracterização**. Informativo Técnico-Científico ITC-03/ATCP, 2010. Disponível em: < <https://www.sonelastic.com/images/RT03-ATCP.pdf>>. Acesso em: 10 set. 2021.

COUTO, Paulo Roberto Guimarães; OLIVEIRA, Jackson da Silva; CINELLI, Leonardo Rodrigues. **Algumas Considerações sobre as Metodologias de Cálculo da Estimativa da Incerteza de Medição citadas no ISO GUM 95**. 2002.

Dias, J. L. D. **Avaliação da incerteza de medição em métodos quantitativos de análise segundo o guia para expressão de incerteza de medição**. Relatório resumido das atividades desenvolvidas pelo Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) (Graduação em Química) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 1. 2016. Disponível em: <<https://colgrad.ufmg.br/quimica/content/download/25496/171873/file/Avaliação%20da%20incerteza%20de%20medição%20em%20métodos%20-%20Jefferson%20L.%20Dias.pdf>>. Acesso em: 21 set. 2021.

Ensaio de tração. Laboratórios Tork, 2016. Disponível em: < <https://laboratorios-tork.com.br/servicos/testes-em-materiais/ensaio-de-tracao/>>. Acesso em: 16 set. 2021.

GARCIA, A., SPIN, J. A., SANTOS, C. A. **Ensaaios dos materiais** 2ª Ed, São Paulo, LTC, 2012.

GONÇALEZ, G. de F.; NETTO, M. P.; KAIZER, N. R.; AMMANN, W. P. W. **Ensaio de tração**. 2016. Disponível em: < <https://www.passeidireto.com/arquivo/30784017/artigo-ensaio-de-tracao>>. Acesso em 05 set. 2021.

GOULARTE, R. M. **Módulo de elasticidade de materiais lamelares determinados com a técnica de indentação instrumentada**. 45 p. Joinville, 2014.

INMETRO. 2012a. _____. **Vocabulário Internacional de Metrologia–Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012)**

JCGM - Joint Committee for Guides in Metrology. **Evaluation of measurement data; Evaluation of measurement data An introduction to the “guide to the expression of uncertainty in measurement” and related documents**. JCGM, 2009.

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.

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

MEHTA, K.P.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. São Paulo: Pini, 2008. 674 p.

MONTIJA, F. C. **Aspectos da variabilidade experimental do ensaio de módulo de deformação de concreto**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

NETO, C.L. **Simulação numérica da laminação a frio no laminador Sendzimir número 2 da Acesita**. Dissertação de mestrado. UFMG. Belo Horizonte, 2006.

NUNN, J. **Measuring Young's modulus the easy way, and tracing the effects of measurement uncertainties**. Physics Education, 2015.

PADILHA, A. F.; GUEDES, L. C. **Aços Inoxidáveis Austeníticos - Microestrutura e Propriedades** (São Paulo, Hemus, 1aed., 1994.)

PEDROSO, F.L. **Módulo de elasticidade é parâmetro fundamental para durabilidade da estrutura de concreto**. In: Revista Concreto e Construções. n 48. 2007.

ROCHA, C. L. F.; FABRICIO, D. A. K.; HAAG, J.; STROHAECKER, T. R. **Análise da confiabilidade na determinação das propriedades mecânicas em ensaios de tração**. CONGRESSO ANUAL DA ABM –INTERNACIONAL,69.,São Paulo, 2014.

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.

SANTOS, S.B.; GAMBALE, E.A.; ANDRADE, M.A.S. **Modelos de predição do módulo de elasticidade do concreto**. In: 48º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON. Anais, 2006

SCARPARO, F. J. **Comportamento do Aço SAE 4340 em fluência**. Tese (Especialização em Engenharia Aeronáutica) – Programa de Especialização em Engenharia, Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos. 2010.

SCHAEFFER, L. **Conformação Mecânica**. 1º Edição. Editora Imprensa Livre. Porto Alegre, 1999.

SOARES JÚNIOR, L. **Confiabilidade Metrológica no Contexto da Garantia da Qualidade Industrial: Diagnóstico e Sistematização de Procedimentos**. Florianópolis, 1999. 120p. Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial) - Depto. Eng. Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina.

SOUZA, S. A: **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos**. 5 Ed. São Paulo: Blucher, 1982. 286 p.

Tabela de propriedades. SID AÇO INOX, 2021. Disponível em: <<http://sidacoinox.com.br/tabela-de-propriedades/>>. Acesso em: 15 set. 2021.

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.

VOGT, J.C. **Estudo da influência de adições no módulo de elasticidade dinâmico, na resistência à fadiga e na tenacidade à fratura para concretos convencionais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) , Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, 2006.

ANEXO A – Certificado de calibração máquina de teste universal instron®
(página 1/4)

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO			
EMITENTE: LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO INSTRON			
DATA DE EMISSÃO: 10-May-16		NÚMERO DO CERTIFICADO: 16051001MC	
		Equipamentos Científicos Instron Ltda Praça das Begônias, 14 Centro Comercial Alphaville, Barueri, SP 06453-061 Telefone: +55(11) 4689-5481 Fax: +55(41) 3035-9421 E-mail: service_brasil@instron.com	
		PÁGINA 1 DE 4 PÁGINAS	
		SIGNATÁRIO APROVADO  Gerente Técnico Flavio H. D'Agostino	
Tipo de calibração:		Força	
Padrão relevante:		ISO 7500-1: 2004	
Data da calibração:		10-May-16	
Cliente			
Nome:	UFU - Lab. de Tecnologia em Atrito e Desgaste		
Local:	Av. João Naves de Ávila, 2121 - Campus Santa Mônica Bloco 5F Uberlândia_MG 38408-100		
País:	Brasil		
Temperatura ambiente:	25.8 °C		
O.C./Nº do contrato:			
Contato:	Raphael Rezende Pires	E-mail	raphaelpires@yahoo.com.br
Máquina		Transdutor	
Fabricante:	INSTRON	Fabricante:	INSTRON
ID do sistema:	8801MTU6168	ID do transdutor:	2527-111/302718
Tipo:	Servo-Hidráulica	Capacidade:	100 kN
	Intervalo único	Tipo:	Tensão/Compressão
Ano de fabr.:	2015		
Classificação			
A máquina de testes acima foi verificada com os indicadores e nos modos mostrados abaixo somente para o aumento da força, de acordo com a norma ISO 7500-1 usando um equipamento de verificação calibrado de acordo com a norma ISO 376.			
Indicador 1. - Leitura digital: Console v. 8.9.374 (kN)			
Escala completa do intervalo	Intervalo da força testada	Modo	Sistema Classe *
(%)	(kN)		
100	22.4745 a 100.1324	Tensão	1
	-22.555 a -100.043	Compressão	0.5
* A classe do sistema para um intervalo deriva do seguinte: erro, repetitividade, retorno para zero, resolução e classificação do dispositivo de teste.			
Método de verificação			
O cálculo da precisão e do erro de repetitividade e a classificação do desempenho da máquina de testes foram realizados de acordo com o método especificado no Anexo C da norma ISO 7500-1.			
A máquina de teste foi verificada na condição "conforme encontrada".			
Antes da calibração, a máquina foi inspecionada para se verificar se ela estava em boas condições de funcionamento, tendo			
Instron CalproCR versão 3.29			
Este certificado cumpre os requisitos do Cgcre/Imetro, que avaliam a competência do laboratório e atestaram sua rastreabilidade pelas normas nacionais e internacionais. Os resultados indicados neste certificado e o seguinte relatório estão relacionados apenas aos itens verificados. Quaisquer limitações de uso em consequência dessa verificação serão indicadas nos comentários. Este relatório não deve ser reproduzido, exceto por completo, sem a aprovação do laboratório emissor.			

ANEXO A – Certificado de calibração máquina de teste universal instron® (página 2/4)

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO ACREDITADO No. 0443 (REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO - RBC)

NÚMERO DO CERTIFICADO:
16051001MC

Página 2 de 4 páginas

sido comprovado que satisfazia as diretrizes da seção 5 da norma ISO 7500-1.
Nenhum acessório vinculado mecanicamente foi montado ao se realizar essa calibração.

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

TENSÃO

% do intervalo	Erro na execução 1 (%)	Erro na execução 2 (%)	Erro na execução 3 (%)	Erro de repetitividade (%)	Classe	Incerteza relativa*	Incerteza da medição* (± kN)
100 Intervalo % (escala completa: 100.1324 kN)							
Retorno para 0					0.5		
20	0.11	0.08	-0.05	0.16	1	0.40	0.090
40	0.05	0.02	-0.05	0.10	1	0.39	0.16
60	-0.01	-0.02	-0.06	0.05	1	0.39	0.23
80	0.01	-0.03	-0.08	0.09	1	0.39	0.31
100	-0.06	-0.08	-0.13	0.07	0.5	0.39	0.39

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

COMPRESSÃO

% do intervalo	Erro na execução 1 (%)	Erro na execução 2 (%)	Erro na execução 3 (%)	Erro de repetitividade (%)	Classe	Incerteza relativa*	Incerteza da medição* (± kN)
100 Intervalo % (escala completa: -100.043 kN)							
Retorno para 0					0.5		
20	-0.31	-0.23	-0.24	0.08	0.5	0.33	0.075
40	-0.20	-0.15	-0.14	0.06	0.5	0.33	0.13
60	-0.12	-0.09	-0.12	0.03	0.5	0.33	0.20
80	-0.07	-0.06	-0.07	0.01	0.5	0.33	0.26
100	-0.04	-0.03	-0.03	0.01	0.5	0.33	0.33

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

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

O estado de incerteza refere-se a valores obtidos durante a calibração e não leva em consideração fatores como efeitos do desvio de longo prazo, temperatura e alinhamento. A influência desses fatores deve ser levada em consideração pelo usuário do dispositivo de medição de força.

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

TENSÃO

% do intervalo	Execução 1		Execução 2		Execução 3	
	Indicado (kN)	Aplicado (kN)	Indicado (kN)	Aplicado (kN)	Indicado (kN)	Aplicado (kN)
100 Intervalo % (escala completa: 100.1324 kN)						
Retorno para 0	0.001		0.006		0.005	
20	22.500	22.4745	22.501	22.4834	22.500	22.5103
40	39.999	39.9808	40.000	39.9928	40.003	40.0226
60	60.000	60.00852	60.003	60.01746	60.002	60.03534
80	80.036	80.02427	80.024	80.04513	80.009	80.07494

ANEXO A – Certificado de calibração máquina de teste universal instron® (página 3/4)

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO ACREDITADO No. 0443 (REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO - RBC)	NÚMERO DO CERTIFICADO: 16051001MC Página 3 de 4 páginas
--	--

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

TENSÃO

% do intervalo	Execução 1		Execução 2		Execução 3	
	Indicado (kN)	Aplicado (kN)	Indicado (kN)	Aplicado (kN)	Indicado (kN)	Aplicado (kN)
100 Intervalo % (escala completa: 100.1324 kN)						
100	100.002	100.0668	100.019	100.1026	100.007	100.1324

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

COMPRESSÃO

% do intervalo	Execução 1		Execução 2		Execução 3	
	Indicado (kN)	Aplicado (kN)	Indicado (kN)	Aplicado (kN)	Indicado (kN)	Aplicado (kN)
100 Intervalo % (escala completa: -100.043 kN)						
Retorno para 0	0.005		-0.004		0.001	
20	-22.498	-22.5669	-22.502	-22.555	-22.509	-22.5639
40	-39.999	-40.0792	-40.001	-40.0613	-40.013	-40.0703
60	-60.002	-60.0711	-60.003	-60.05918	-60.004	-60.07706
80	-80.009	-80.06301	-80.011	-80.06003	-80.003	-80.05705
100	-100.000	-100.043	-100.005	-100.0341	-100.009	-100.037

Equipamento de verificação

ID do equipamento	Descrição	Capacidade	Data da cal.	Validade da cal.	Ref. do certificado
114378A	célula de carga	142000 lbf	27-Oct-14	27-Oct-16	10272014SA
975608	indicador de temp.	NA	05-Oct-15	05-Oct-17	TP-10-093/15
J93157	indicador de força	NA	03-Sep-14	03-Sep-16	09032014CB

A classe do equipamento de verificação foi igual ou melhor que a classe na qual essa máquina de testes foi verificada.

A temperatura média do equipamento durante a verificação foi de 28.5°C.

Utilização do equipamento de verificação

Intervalo

Escala

completa

(%)	Modo	ID do equipamento	Percentual(is) do intervalo	Precisão (+/-)
100	Tensão	114378A	20/ 40/ 60/ 80	0.32% da leitura
		114378A	100	0.16% da leitura
100	Compressão	114378A	20/ 40/ 60/ 80/ 100	0.16% da leitura
Todos	Tensão-Compressão	975608	Todos	1.8 °F

Os padrões da Instron são rastreáveis ao SI (Sistema Internacional de Unidades) por meio de padrões mantidos pelo Inmetro ou outro Instituto Nacional de Metrologia reconhecido internacionalmente.

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

**ANEXO A – Certificado de calibração máquina de teste universal instron®
(página 4/4)**

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO	NÚMERO DO CERTIFICADO: 16051001MC
LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO ACREDITADO No. 0443 (REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO - RBC)	Página 4 de 4 páginas

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

Comentários

Verificado por: Marcio Campolina
Service Technician

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

ANEXO B – Certificado de calibração paquímetro digital (página 1/2)

Mitutoyo
Mitutoyo Sul Americana Ltda.

**LABORATÓRIO
DE
METROLOGIA**

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Calibração
NBR ISO/IEC
17025

CAL 0031

Pag.: 1 / 2

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº. 07625/13

Cliente : " UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA."
Endereço : Avenida João Naves de 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

Carlos Kazuo Spetake
Gerente do Depto de Garantia da Qualidade

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 Unidade - SI).
A reprodução deste Certificado só poderá ser total e depende da aprovação por escrito da Mitutoyo.
Os resultados deste Certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer lotes.

ANEXO B – Certificado de calibração paquímetro digital (página 2/2)

Número de acessos | Ler em voz alta

mitutoyo
Mitutoyo Sul Americana Ltda.

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº. 07625/13

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

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

Pag.: 2 / 2

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

Medida Externa			Medida Interna		
Padrão (mm)	Indicação no Instrumento (mm)	Incerteza de Medição (mm)	Padrão (mm)	Indicação no Instrumento (mm)	Incerteza de Medição (mm)
1,1	1,10	0,02	20,0	20,00	0,02
1,5	1,50		50,0	50,00	
1,9	1,90		100,0	100,01	
4,0	4,00		150,0	150,02	
8,0	8,00				
16,0	16,00				
20,0	20,00				
50,0	50,00				
75,0	75,00				
100,0	99,99				
150,0	150,00				

Fator de abrangência (k)	2,03
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: $(20,0 \pm 0,5)^{\circ}\text{C}$.

*Escritório Central: Av. João Carlos de Silva Borges, 1240 - Santo Amaro - CEP 04726-002 - São Paulo - SP - Tronco Chave: (11) 5643-0000 - Fax: (11) 5641-3722
*Fábrica: Rod. Índio Tibiriçá, 1555 - Bairro Raffle - CEP: 08620-000 - Suzano - SP - Tel.: (11) 4746-5858 - Fax: (11) 4746-5936 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br
Laboratório: Tel.: (11) 4746-5950 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mail: metrologia@mitutoyo.com.br
Assistência Técnica Interna: Tel.: (11) 4746-5957 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mail: assistec@mitutoyo.com.br
Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 5643-0027 - Fax: (11) 5643-0028 - E-mail: ate@mitutoyo.com.br

ANEXO C – Certificado de calibração extensômetro



INSTRON®

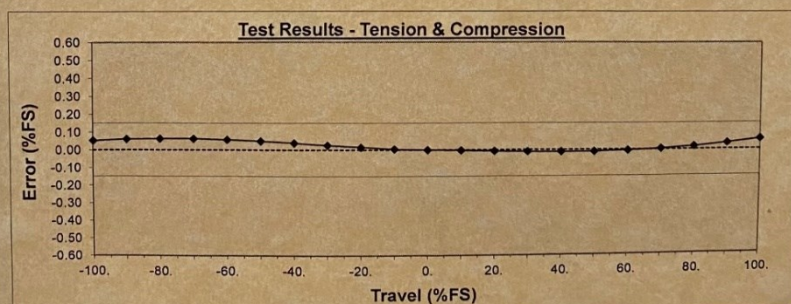
Instron®
Coronation Road ■ High Wycombe, Bucks HP12 3SY ■ UK
Tel: +44 1494 464646 ■ Fax: +44 1494 456123 ■ www.instron.com

Test Certificate

Cat No. : 2620-601	Readout Device	DK38	EQU-3518
Serial No. : 301432	Displacement Ref.	Heidenhain	EQU-6932
Test No. : 1	Temperature (°C)	23	
Gauge Length : 25 mm	Tested by	D.W.D.H.	
Travel : 5.00 -5.00 mm	Date	22/06/2015	
Span Point : 100%	Span Setting	2.47882	mV/V

Travel mm	Range %FS	EXT %FS Run 1	EXT %FS Run 2	Repeatability %FS	Average O/P Runs 1 & 2	Error %FS
5.0000	100	100.002	100.113	0.111	100.0575	0.058
4.5000	90	89.986	90.086	0.100	90.0360	0.036
4.0000	80	79.974	80.062	0.088	80.0180	0.018
3.5000	70	69.968	70.042	0.074	70.0050	0.005
3.0000	60	59.966	60.026	0.060	59.9960	-0.004
2.5000	50	49.965	50.014	0.049	49.9895	-0.010
2.0000	40	39.972	40.006	0.034	39.9890	-0.011
1.5000	30	29.979	30.002	0.023	29.9905	-0.010
1.0000	20	19.987	20.001	0.014	19.9940	-0.006
0.5000	10	9.995	10.001	0.006	9.9980	-0.002
0.0000	0	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.000
-0.5000	-10	-9.991	-9.999	0.008	-9.9950	0.005
-1.0000	-20	-19.975	-19.993	0.018	-19.9840	0.016
-1.5000	-30	-29.958	-29.988	0.030	-29.9730	0.027
-2.0000	-40	-39.940	-39.980	0.040	-39.9600	0.040
-2.5000	-50	-49.923	-49.976	0.053	-49.9495	0.050
-3.0000	-60	-59.908	-59.975	0.067	-59.9415	0.058
-3.5000	-70	-69.897	-69.976	0.079	-69.9365	0.064
-4.0000	-80	-79.890	-79.982	0.092	-79.9360	0.064
-4.5000	-90	-89.886	-89.992	0.106	-89.9390	0.061
-5.0000	-100	-99.889	-100.004	0.115	-99.9465	0.053

	Positive Travel	Negative Travel
Hysteresis (%FS)	0.0505	0.0515
Creep (%FS)	0.001	0.006



Notes :

- 1) Additional system calibration is required to ensure compliance with ASTM E83 and ISO 9513.
- 2) Instron certifies that its calibration apparatus is traceable to the National Physical Laboratory, with uncertainty of measurement not exceeding one third of the permissible error of the extensometer under test.

Version 3

The difference is measurable®

ANEXO D – Certificado de calibração da célula de carga

Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH
Im Tiefen See 45
D-64293 Darmstadt

Zertifiziert nach ISO 9001 und ISO 14001
ISO 9001 and ISO 14001 certified / Certification selon ISO 9001 et ISO 14001

Akkreditierungen gemäß ISO 17025
Accreditations per ISO 17025 / Accréditations selon ISO 17025

HBM

Prüfprotokoll

test certificate / protocole d'essai

Typ: type / type	U2B	Auftrag: order no / commission	802038777
Nennmessbereich: range / portée	2 kN	Prüfer: examiner / contrôleur	Schmunk
IdentNr: serial no / N°-ident	K97726	Datum: test date / date d'essai	11.09.2006

Prüfergebnisse:
test results / résultats d'essai

Eingangsgröße des Messbereichs [%] input quantity / échelle d'essai	Ausgangsgröße [mV/V] output quantity / résultats	
	Zug tension / traction	Druck compression / compression
0	0.0000	0.0000
50	-1.0001	1.0010
100	-1.9998	2.0032
50	-1.0004	1.0012
0	-0.0001	0.0001

Aus den Prüfergebnissen berechnete messtechnische Kenngrößen:
Metrological characteristic quantities computed from the test results:
Grandeurs caractéristiques de mesure calculées à partir des résultats d'essai :

Kennwert C [mV/V] sensitivity / sensibilité	-1.9998	2.0032
Linearitätsabweichung [%vC] linearity deviation / linearité (Abweichung von der bestpassenden Geraden durch das Nullsignal) (deviation from bestfit through zero / écart par rapport à la meilleure droite passant par le zéro)	-0.007	0.021
Relative Umkehrspanne 0,5 F _{nom} [%vI] relative hysteresis / hystérésis relatif	0.032	0.021

Alle aus den Messergebnissen ermittelten Kenngrößen entsprechen den Spezifikationen gemäß Datenblatt.
All characteristic quantities determined from the measurement results correspond to the specifications per datasheet.
Toutes les grandeurs caractéristiques déterminées à partir des résultats de mesure correspondent aux spécifications selon les caractéristiques techniques.

Allgemeine Zusatzinformationen:
general information / informations complémentaires

Alle weiteren messtechnischen Eigenschaften des Aufnehmers sind durch Typprüfungen und laufende Produktaudits des Qualitätswesens abgesichert.
All other metrological characteristics of the transducer are verified by type testing and regular product audits of the quality department.
Toutes les autres caractéristiques techniques du capteur sont garanties par le Service Qualité, au moyen d'essais et d'audits suivis sur le produit.

Nr: 0232.003 V3.0/WS-T/02.06

Seite / Page 1 (1)

ANEXO E – Certificado Termohigrômetro digital (página 1/2)

		<i>Certificado de Calibração</i> <i>Laboratório de Temperatura & Umidade</i> <i>Número do Certificado</i> R4996/13 <i>Folha 1 / 2</i>		
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) / Veff= 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		
A reprodução deste certificado só poderá ser total, sem nenhuma alteração. Os Resultados deste certificado referem-se somente ao item calibrado ou ensaiado. Este certificado atende os requisitos estabelecidos pela norma NBR ISO/IEC 17025. A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência "k" que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.				
Rua Dendezeiro, 29 Jd. Matarazzo São Paulo SP 03813-130 Tel 11 2214-0049 Email: atendimento@elusinstrumentacao.com.br				

ANEXO E – Certificado Termohigrômetro digital (página 2/2)



Certificado de Calibração

Laboratório de Temperatura & Umidade

Número do Certificado R4996/13 *Folha* 2 / 2

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

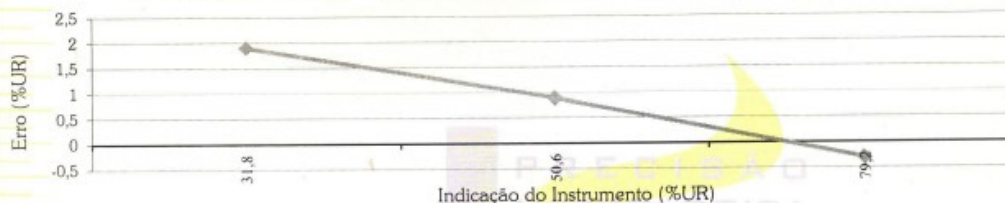
RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO :

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

Sensor - Fabricante: Não especificado; Modelo: Não especificado; Id.: Não especificado; n.º.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.º.s.: Não especificado

Faixa de medição: -20 ~ 60 °C, divisão de escala: 0,1 °C.

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



A reprodução deste certificado só poderá ser total, sem nenhuma alteração. Os Resultados deste certificado referem-se somente ao item calibrado ou ensaiado. Este certificado atende os requisitos estabelecidos pela norma NBR ISO/IEC 17025. A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência "k" que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

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