



Metrologia e controle geométrico

Metrologia e controle geométrico

Alessandra Cristina Santos Akkari

© 2017 por Editora e Distribuidora Educacional S.A.
Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta publicação poderá ser reproduzida ou transmitida de qualquer modo ou por qualquer outro meio, eletrônico ou mecânico, incluindo fotocópia, gravação ou qualquer outro tipo de sistema de armazenamento e transmissão de informação, sem prévia autorização, por escrito, da Editora e Distribuidora Educacional S.A.

Presidente

Rodrigo Galindo

Vice-Presidente Acadêmico de Graduação

Mário Ghio Júnior

Conselho Acadêmico

Alberto S. Santana

Ana Lucia Jankovic Barduchi

Camila Cardoso Rotella

Cristiane Lisandra Danna

Danielly Nunes Andrade Noé

Emanuel Santana

Grasiele Aparecida Lourenço

Lidiane Cristina Vivaldini Olo

Paulo Heraldo Costa do Valle

Thatiane Cristina dos Santos de Carvalho Ribeiro

Revisão Técnica

André Luis Delvas Fróes

Paula Beghelli Oliveira

Editorial

Adilson Braga Fontes

André Augusto de Andrade Ramos

Cristiane Lisandra Danna

Diogo Ribeiro Garcia

Emanuel Santana

Erick Silva Griep

Lidiane Cristina Vivaldini Olo

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Akkari, Alessandra Cristina Santos
A313m Metrologia e controle geométrico / Alessandra Cristina
Santos Akkari. – Londrina : Editora e Distribuidora
Educacional S.A. 2017.
216 p.

ISBN 978-85-522-0192-2

1. Geometria. I. Título.

CDD 620

2017

Editora e Distribuidora Educacional S.A.
Avenida Paris, 675 – Parque Residencial João Piza
CEP: 86041-100 – Londrina – PR
e-mail: editora.educacional@kroton.com.br
Homepage: <http://www.kroton.com.br/>

Sumário

Unidade 1 Introdução e conceitos fundamentais de metrologia	7
Seção 1.1 - Evolução histórica da metrologia, unidades de medida e o sistema metrológico brasileiro	9
Seção 1.2 - Erro, incerteza e resultado de medição	25
Seção 1.3 - Métodos e sistemas de medição	43
Unidade 2 Medição direta e medição indireta	61
Seção 2.1 - Medição direta e domínio de uma fonte de incerteza	63
Seção 2.2 - Medição direta e a combinação de fontes de incerteza	80
Seção 2.3 - Medição indireta	98
Unidade 3 Calibração de sistemas de medição e controle geométrico	115
Seção 3.1 - Calibração e rastreabilidade	117
Seção 3.2 - A escolha do sistema de medição e ponderação de critérios	132
Seção 3.3 - Controle geométrico	150
Unidade 4 Principais sistemas de medição: características e aplicação	167
Seção 4.1 - Paquímetro e micrômetro	169
Seção 4.2 - Relógio comparador e traçador de altura	185
Seção 4.3 - Projetor de perfil e instrumentos de medição auxiliares	199

Palavras do autor

Caro aluno, neste momento inicial você pode se indagar a respeito do motivo de estudarmos a metrologia e o controle geométrico, bem como a sua aplicação nos diferentes ramos de atividades da sociedade. A importância da metrologia na indústria e nas relações comerciais é de extrema significância, especialmente no tocante à busca da qualidade em um mundo globalizado e à sua relação com os aspectos tecnológicos necessários aos mercados. Assim, a demanda por serviços metrológicos tem aumentado progressivamente e há cada vez mais a necessidade de otimizar as tarefas especializadas em metrologia e controle geométrico a fim de responder, em tempo ágil, à celeridade dos avanços ocorridos na sociedade.

Nesse contexto, pretende-se, em termos gerais, que você conheça e saiba aplicar os principais conceitos e normas referentes a metrologia e controle metrológico nas diferentes áreas de atuação, além de aprender a executar um processo de medição, considerando suas múltiplas variáveis, obtendo resultados confiáveis nas medições. Para tanto, o autoestudo será fundamental, visando à assimilação do conteúdo, por meio, inclusive, das atividades pré e pós-aula, e a compreensão e aplicação das melhores práticas metrológicas empregadas no mercado de trabalho.

Começaremos nosso estudo nesta unidade a partir de uma perspectiva histórica, abordando a evolução da metrologia e a estrutura do sistema metrológico brasileiro. Posteriormente, introduziremos os conceitos e métodos do processo de medição, erro e incerteza, possibilitando que você esteja apto a discutir os fundamentos e a aplicá-los em situações reais.

Por meio da Unidade 2, você conseguirá entender melhor como desenvolver um processo de medição, utilizando os métodos de medição direta e indireta, e como considerar as fontes de incerteza no resultado de medição. Então, na Unidade 3, introduziremos os conceitos gerais de calibração de sistemas de medição e discutiremos os fundamentos de controle geométrico, incluindo o estudo de normas internacionais ISO, que são aplicadas mundialmente na área.

Finalmente, na Unidade 4, apresentaremos os princípios construtivos e de funcionamento de diferentes sistemas de medição,

desde instrumentos básicos, como o paquímetro, até sistemas complexos, como o projetor de perfil.

Diante de um cenário repleto de boas perspectivas para a área metrológica em função da entrada de novas demandas na sociedade, além da necessidade de um pessoal especializado e capacitado para desenvolver produtos e serviços com qualidade, esperamos que você se sinta motivado a dedicar seu tempo e seus esforços em um estudo com viés aplicado, que lhe proporcionará chances reais de assimilar os conceitos e as técnicas a serem utilizadas na sua vida profissional. Tenha um excelente estudo e seja ativo na construção do seu próprio conhecimento!

Introdução e conceitos fundamentais de metrologia

Convite ao estudo

Nesta unidade, iniciaremos o estudo dos fundamentos e conceitos gerais da metrologia. Essa etapa é de essencial importância, pois servirá de base para os aprofundamentos ao longo das outras unidades e lhe permitirá entender como surgiu essa ciência e quais os seus desdobramentos na sociedade atual. Para compreendermos esse assunto, objetiva-se que você conheça e seja capaz de identificar e calcular erros sistemáticos e aleatórios presentes no processo de medição, além de compreender e analisar as características metrológicas que definem um sistema de medição.

Provavelmente você já mediu algum objeto de seu interesse e atribuiu uma unidade de medida àquele resultado. Inicialmente, você já deve ter se questionado sobre a origem da unidade metro, para comprimento, ou da unidade litro, para volume. Além disso, ao atribuir uma unidade de medida para comprimento, por exemplo, você deve ter percebido que poderia utilizar centímetro ou metro e que, em diferentes partes do mundo, o seu resultado seria compreendido. Ainda, talvez você deva ter feito mais de uma medição para confirmar o resultado, afinal, consciente ou inconscientemente, você imaginou que havia algum tipo de erro embutido no valor obtido.

Essa simples ação do cotidiano nos faz pensar sobre o porquê da existência das unidades de medidas e o porquê de usar uma em detrimento de outra, também nos leva a considerar que qualquer medição realizada pode incorrer em um erro, o qual deve ser previsto ou considerado para termos uma maior assertividade dos resultados, além de permitir o questionamento

sobre qual é a natureza desse erro, entre outros. Com base nos fundamentos da metrologia, ao final desta unidade, você conseguirá responder a essas indagações.

Imagine que você foi contratado como consultor por uma multinacional que atua especificamente na área de metrologia e instalou sua filial recentemente no Brasil. A empresa ainda está em fase de implantação e organização de processos e atividades, de acordo com o sistema metrológico brasileiro. Além disso, os primeiros ensaios metrológicos ainda serão executados, de modo que servirão como testes dos instrumentos de medição e como treinamento dos operadores. Nesse contexto, no papel de consultor, como você explicaria a estrutura do sistema metrológico no Brasil e as possíveis linhas de atuação da nova filial?

Considere que o presidente da filial lhe solicitou uma apresentação com esse escopo. Como você planejaria o processo de medição e obteria o erro e a incerteza de medição, visando à execução dos primeiros testes metrológicos e treinamento dos operadores? Como você analisaria as características metrológicas dos instrumentos de medição a fim de conhecê-los melhor e avaliar se atendem às necessidades da empresa? Essas questões poderão ser respondidas ao decorrer desta unidade, que irá capacitá-lo a entender a formação do Sistema Internacional de Unidades e a estrutura do sistema metrológico brasileiro, a analisar os erros e incertezas de uma medição e a compreender os sistemas de medição, seus métodos de operação e seus parâmetros de desempenho.

Está preparado para esse desafio? Vamos lá!

Seção 1.1

Evolução histórica da metrologia, unidades de medida e o sistema metrológico brasileiro

Diálogo aberto

Nesta seção, inicialmente, você vai estudar a história da metrologia, abrangendo a evolução dos sistemas de medidas e a correlação com as novas demandas advindas do avanço das relações comerciais no mundo globalizado e da tecnologia. Pensando nos sistemas de medidas, é de grande importância que você conheça o Sistema Internacional de Unidades (SI) e sua composição, além dos múltiplos e dos submúltiplos de medidas, que lhe ajudarão a saber expressar o resultado de medição de acordo com um padrão internacionalmente aceito.

Vale notar que a metrologia tem vários aspectos técnicos que devem ser compreendidos para serem aplicados de forma correta na sua vida profissional e, desta forma, você também irá estudar a grafia dos nomes, números e prefixos de unidades. Assimilados esses conceitos iniciais e entendida a formação histórica dessa ciência, então será explorado com maior profundidade o caso da metrologia no Brasil, com enfoque na estrutura do sistema metrológico brasileiro e suas áreas.

Como vimos no *Convite ao estudo*, uma multinacional que atua especificamente na área de metrologia e instalou sua filial recentemente no Brasil, lhe contratou para prestar consultoria. A empresa ainda está em fase de implantação e organização de processos e atividades, de acordo com o sistema metrológico brasileiro. Assim, como você explicaria a estrutura do sistema metrológico no Brasil e as possíveis linhas de atuação para a nova filial? Pense a respeito dessa indagação, uma vez que o presidente da filial lhe solicitou uma apresentação com esse escopo.

Perceba que a sua tarefa é de suma importância, pois irá direcionar todas as atividades da nova filial. A fim de avaliar esse caso e ser um bom consultor para a referida empresa, inicialmente você deve conhecer os princípios históricos e normativos da área de atuação da filial. Logo,

fique atento a todos os tópicos que serão abordados nesta seção e reflita, ao chegar na reunião com o presidente e vice-presidente da multinacional, como você começaria a sua apresentação a fim de que eles possam vislumbrar um melhor direcionamento para a empresa no contexto da metrologia no Brasil.

A partir de agora, mãos à obra e se empenhe com dedicação e com entusiasmo, para aproveitar esse conteúdo e ter sucesso em sua carreira.

Tenha um excelente estudo!

Não pode faltar

Vamos iniciar os estudos conhecendo a etimologia da palavra metrologia, isto é, estudando a origem desse vocábulo e, a partir desse entendimento, conseguimos melhor assimilar o conceito dessa ciência. A palavra metrologia originou-se do termo grego *metron*, que significa medida, e do termo *logos*, que remete à ciência. Assim, entende-se a metrologia como a ciência das medições (LIRA, 2015). De acordo com o Vocabulário de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia (VIM), conceitua-se metrologia como a “ciência da medição que abrange todos os processos teóricos e práticos relativos às medições, qualquer que seja a incerteza, em quaisquer campos da ciência ou da tecnologia” (INMETRO, 2000, p. 1).

Atualmente, a metrologia tornou-se uma parte natural e vital da nossa vida cotidiana. Os alimentos, como café, arroz e feijão, são comprados por massa ou volume; água e eletricidade são medidos para gerar o valor do serviço; produtos são medidos para se estabelecer e validar as especificações de acordo com a finalidade e qualidade requerida; entre outros exemplos. Logo, percebe-se que a atividade metrológica afeta desde o setor produtivo de um país até a economia privada, demonstrando a importância do estudo dessa área do conhecimento (HOWARTH; REDGRAVE, 2008)

Durante milhares de anos, a sociedade foi significativamente impactada pela sua capacidade de medir aspectos da natureza e suas propriedades e, a partir de uma melhor compreensão e percepção do ambiente ao seu redor, ocorreu uma evolução dos sistemas e dos métodos de medição. Nas civilizações passadas, as unidades de medida rudimentares eram comumente utilizadas, como barris de vinho (volume), barris de cereal (massa) e passos do pé (comprimento), impossibilitando maior exatidão e assertividade nas medições realizadas, uma vez que havia diferenças de tamanho de barris entre os diferentes povos, assim como o tamanho do pé também era passível de variação de acordo com a etnia, por exemplo.

De fato, medidas fundamentadas na anatomia humana eram muito disseminadas no Egito Antigo, por exemplo, onde os egípcios adotavam o cúbito como medida de comprimento, referindo-se à distância do cotovelo até a ponta do dedo médio do faraó. Os romanos, por sua vez, introduziram o conceito de milha, que

equivalia a mil passos de um legionário, enquanto que os ingleses utilizavam, e ainda utilizam, a polegada, o pé e a jarda. No século XII, inclusive, foi o rei Henrique I, da Inglaterra, que oficializou o padrão da jarda, correspondendo à distância entre a ponta de seu nariz e seu polegar apontado para cima com o braço esticado (ALBERTAZZI, 2008).

Para as atividades individuais, quantificar algo a partir de medidas corpóreas poderia até ser suficiente. Contudo, pensando em um contexto global, envolvendo relações comerciais entre diferentes povos, não havia um padrão de unidade que atendesse às novas demandas advindas do estreitamento dos vínculos entre diferentes regiões, tampouco que acompanhasse o desenvolvimento tecnológico. Assim, a necessidade de se criar um sistema unificado de unidades foi se intensificando e muitas tentativas, por partes de ilustres cientistas, como Gauss, Maxwell e Thomson, foram se desenvolvendo. Foi nesse contexto que criou-se o Sistema Internacional de Unidades (do francês, *Système international d'unités, SI*) (MILOJEVIĆ, 1973).

Embora o atual SI tenha sido criado oficialmente em 1960, sua origem remonta à criação do sistema métrico, durante a Revolução Francesa. Historicamente, conforme a ideia proposta inicialmente por John Wilkins, o novo sistema de medidas teve como ponto de partida uma única medida universal, o metro, o qual foi utilizado, inicialmente, para definir o comprimento, o volume e a massa. Assim, o metro surgiu a partir de uma constante percebida na natureza, isto é, dez milionésimos da distância do Equador ao Polo Norte, através do meridiano da Terra, que passa por Paris. Seguiu-se, então, para as definições das unidades de volume e massa, respectivamente, com o litro sendo $0,001 \text{ m}^3$ e o quilograma a massa de 1 litro de água destilada a $4 \text{ }^\circ\text{C}$. Posteriormente, em 1799, os dois primeiros protótipos padrões de platina para designar o comprimento (representando o metro) e a massa (representando o quilograma) foram depositados nos Arquivos da República, em Paris (NEWELL, 2014).

A estrutura fundamental mantém-se com 7 unidades de base, que abrangem as unidades de comprimento, tempo, massa, corrente elétrica, temperatura, quantidade de matéria e intensidade luminosa; e 22 unidades derivadas, com nomes e símbolos específicos. As unidades de base, definidas atualmente conforme o Quadro 1.1, são aquelas que podem ser medidas diretamente pelo Bureau Internacional de Pesos e Medidas - BIPM (do francês,

Bureau International de Poids et Mesures), órgão que surgiu em 1875, na França, a partir da Convenção do Metro e que possui como objetivo definir, manter e promover o SI internacionalmente (BIPM, 2017).



Assimile

O Sistema Internacional de Unidade se constitui como um sistema em evolução, que muda à medida que surgem novos conhecimentos e necessidades de medição, embora, às vezes, essas alterações sejam lentamente desenvolvidas frente à celeridade do progresso científico.

Tendo como base a necessidade de revisar e aprimorar periodicamente as definições das unidades de base, a título de exemplificação, a Figura 1.1 apresenta o protótipo do quilograma, que está alocado e protegido em um museu francês.

Quadro 1.1 | Descrição das sete unidades de base do Sistema Internacional de Unidades

Grandeza	Unidade de medida	Definição da unidade de medida	Símbolo da unidade
Comprimento	Metro	Comprimento do trajeto percorrido pela luz no vácuo durante um intervalo de tempo de $\frac{1}{299792458}$ do segundo.	M
Massa	Quilograma	Igual à massa do protótipo internacional do quilograma que equivale a 1 kg.	Kg
Tempo	Segundo	Duração de 9192631770 períodos da radiação correspondente à transição entre os dois níveis hiperfinos do estado fundamental do átomo de césio 133.	S
Corrente elétrica	Ampère	Intensidade de uma corrente elétrica constante que, mantida em dois condutores paralelos, retilíneos, de comprimento infinito, de seção circular desprezível, e situados à distância de 1 metro entre si, no vácuo, causaria entre estes condutores uma força proporcional a 2×10^{-7} N/m.	A
Temperatura termodinâmica	Kelvin	Fração $\frac{1}{273,16}$ da temperatura termodinâmica no ponto tríplice da água.	K
Intensidade luminosa	Candela	Intensidade luminosa de uma fonte que emite uma radiação monocromática de frequência 540×10^{12} hertz e cuja intensidade energética radiante nessa direção é de $\frac{1}{683}$ watt/esterradiano.	Cd

Quantidade de matéria	Mol	quantidade de matéria de um sistema contendo tantas entidades elementares quantos átomos existentes em 0,012 quilograma de C 12	Mol
-----------------------	-----	---	-----

Fonte: adaptado de Albertazzi (2008).

Figura 1.1 | Protótipo do quilograma, que se refere ao padrão de unidade de massa



Fonte: Albertazzi e Sousa (2008, p. 24).



Refleta

Qual é a implicação em utilizar medidas com base nas dimensões corpóreas nas relações comerciais entre diferentes povos? Quais os benefícios que um sistema universal de unidades de medida trouxe para a sociedade como um todo?

Por sua vez, as unidades derivadas, ilustradas no Quadro 1.2, são grandezas que derivam das unidades de base a partir de operações algébricas. Assim, por exemplo, a unidade de área (m^2) deriva da unidade base de comprimento (m) por meio da operação da multiplicação.

Percebe-se, então, que a capacidade do homem para quantificar e entender o mundo ao seu redor se desenvolveu em uma linguagem, que é a base da ciência e da tecnologia modernas, otimizando as relações de comércio, bem como os processos de produção e manufaturas intercambiáveis, além de garantir maior coerência das medições ao longo dos anos (NEWELL, 2014).

Quadro 1.2 | Descrição de algumas unidades derivadas do Sistema Internacional de Unidades

Grandeza	Símbolo da grandeza	Unidade derivada	Símbolo
Velocidade	V	Metro por segundo	m/s
Aceleração	a	Metro por segundo ao quadrado	m/s ²
Área	A	Metro quadrado	m ²
Volume	V	Metro cúbico	m ³
Luminância	L _v	Candeia por metro quadrado	cd/m ²
Campo magnético	H	Ampère por metro	A/m
Concentração	c	Mol por metro cúbico	mol/m ³

Fonte: adaptado de Albertazzi (2008).

Muitas vezes nos deparamos com números tão grandes, isto é, com tantos algarismos, que não conseguimos ter uma boa compreensão e, tampouco, fazer um uso efetivo do valor obtido. Assim, são casos como esse que justificam a existência e o uso de prefixos, auxiliando na expressão dos resultados de medição de um modo mais assertivo. O Quadro 1.3 apresenta os prefixos, sendo os múltiplos e os submúltiplos utilizados no SI. Vale a ressaltar que os prefixos são expressos a partir de potências inteiras de base 10, sendo que cada uma possui um nome e símbolo específicos, variando de 10^{-24} até 10^{24} (ALBERTAZZI, 2008).

O emprego correto dos diferentes prefixos incorre apenas em acrescentar o nome do prefixo desejado na frente do nome da unidade de medida para, então, formar o múltiplo ou submúltiplo desta unidade.



Exemplificando

Quando lemos no rótulo de uma latinha de refrigerante o volume de 350 mL, entende-se que a lata comporta trezentos e cinquenta mililitros, isto é, dividiu-se a unidade litro por mil: mili + litro = prefixo *m* + unidade *l* = ml. De modo semelhante, quando vamos ao açougue e solicitamos 1 kg de carne, tem-se que a unidade grama foi multiplicada por mil: quilo + grama = prefixo *k* + unidade *g* = kg.

Quadro 1.3 | Prefixos utilizados no Sistema Internacional

	Nome do prefixo	Símbolo do prefixo	Fator pelo qual a unidade é multiplicada
MÚLTIPLOS	yotta	Y	10^{24}
	zetta	Z	10^{21}
	exa	E	10^{18}
	peta	P	10^{15}
	tera	T	10^{12}
	giga	G	10^9
	mega	M	10^6
	quilo	k	10^3
	hecto	h	10^2
	deca	da	10
SUBMÚLTIPLO	deci	d	10^{-1}
	centi	c	10^{-2}
	mili	m	10^{-3}
	micro	μ	10^{-6}
	nano	n	10^{-9}
	pico	p	10^{-12}
	femto	f	10^{-18}
	atto	a	10^{-18}
	zepto	z	10^{-21}
yocto	y	10^{-24}	

Fonte: IPEM (2013)

Ressalta-se que todos os símbolos de submúltiplos são escritos em letra minúscula, enquanto a maioria dos símbolos de múltiplos são escritos em letra maiúscula, exceto deca (da), hecto (h) e quilo (k). Nesse sentido, deve ser considerada a importância da grafia correta de unidades de medidas e itens correlatos no campo da metrologia, conforme veremos a seguir.

Em qualquer linguagem, sabe-se da importância da grafia correta para um melhor entendimento do objeto em questão. Por exemplo, em português, ninguém gosta de ver um anúncio com erros ortográficos ou de ler uma frase que possibilite dupla interpretação. Em metrologia, isso não é diferente, de modo que sempre devemos nos preocupar com a grafia correta e o rigor técnico que essa ciência exige, conforme apresentado no Quadro 1.4 (ALBERTAZZI, 2008; LIRA, 2015).

Quadro 1.4 | Regras de grafia em metrologia

Regra de grafia	Exemplo – grafia correta	Erros comuns
Unidades de medidas originadas de nomes de pessoas devem começar com letra minúscula, quando escritas por extenso	cinco newtons trezentos kelvins trinta volts	cinco Newtons trezentos Kelvin A única exceção é grau Celsius: cinco graus Celsius – grafia correta!
As unidades de medida podem ser expressas por extenso ou por símbolos, mas nunca uma combinação	trinta metros por segundo 30 m/s dez quilômetros por hora 10 km/h	30 metros por s trinta m por segundo dez quilômetros por h 10 km por hora
Prefixos não são escritos no plural	dez quilogramas cem mililitros	dez quilosgramas cem milislitro
No plural, sempre coloca-se “s” se a palavra for simples e por extenso	oito newtons trezentos kelvins dez ampères	oito newton trezentos kelvin dez ampér
No plural, sempre coloca-se “s” se as palavras forem compostas e sem hífen	trinta milímetros cúbicos cem metros quadrados	trinta milímetros cúbico cem metros quadrado
No plural, não se coloca “s” se as unidades forem terminadas em s, x ou z	dez hertz vinte lux	dez hertz vinte luxs
No plural, não se coloca “s” se os nomes forem o denominador de unidades formadas por divisão	oito metros por segundo cinco volts por metro	oito metros por segundos cinco volts por metros
Símbolos não vão para o plural e não são abreviados	100 m 50 kg 10 m/s	100 ms ou 100 mts 50 kgs 10 ou 100
Caso as unidades sejam formadas por multiplicação, os símbolos podem ser justapostos	10 kWh 100 Nm	10 kW h 100 N m

Fonte: elaborado pela autora.

Apresentados alguns fundamentos gerais da metrologia, vamos compreender como estrutura-se essa área no Brasil. Do ponto de vista histórico, a metrologia no Brasil surgiu, e foi evoluindo, a partir de elementos essenciais presentes em um contexto de conexão entre ciência e desenvolvimento industrial, incorporação de ideias científicas à atuação governamental e a defesa do cidadão e do consumidor (DIAS, 1998). A primeira formulação política nacional de metrologia brasileira data de 1967 e, dentre outros aspectos, essa iniciativa englobava a constatação do uso exclusivo do recém-criado SI no país (INMETRO, 2000).

A partir de então, tem-se o Sistema Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – Sinmetro, instituído pela Lei

5.966, de 11 de dezembro de 1973, que atualmente é constituído por organizações públicas e privadas vinculada à área da metrologia. Dentre as entidades constituintes desse sistema brasileiro, tem-se a parte formada por um órgão normativo, o Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – Conmetro, e outra constituída por órgão executivo, o Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – Inmetro (INMETRO, 2000). O Conmetro, como a própria denominação representa, é um colegiado interministerial que exerce a função de órgão normativo (regulação e controle) do Sinmetro e que tem o Inmetro como sua secretaria executiva (executa operações técnicas e outras correlatas à metrologia tendo como missão prover confiança à sociedade brasileira nas medições e nos produtos). Dentre as atividades do Inmetro, destacam-se as áreas responsáveis pela Metrologia Científica e Industrial e Metrologia Legal.

O escopo da Metrologia Científica abrange, principalmente, os padrões de medição internacionais e nacionais, bem como os instrumentos de laboratórios e pesquisas e metodologias científicas relacionadas à qualidade metrológica. Alguns exemplos de operações em Metrologia Científica referem-se à calibração de pirômetros ópticos; medidas de comprimento utilizando equipamentos a *laser*; e calibração de pesos-padrão e balanças analíticas para laboratórios.

Ainda no tocante à qualidade, tem-se a Metrologia Industrial, que aborda o controle metrológico nos processos produtivos, podendo-se citar como exemplo ensaios em produtos certificados, tais como brinquedos e cabos elétricos, além de medição e controle de uma linha de produção de automóveis.

Por fim, destaca-se a Metrologia Legal, que possui um enfoque na proteção do consumidor por meio do tratamento de unidades de medida, de métodos e instrumentos de medição, de acordo com as exigências técnicas e legais obrigatórias. Desta forma, os instrumentos de medição utilizados nas atividades comerciais e nas medições nas áreas da saúde, da segurança e do meio ambiente estão sujeitos à ação de um organismo de Metrologia Legal, citando-se como exemplo a verificação de bombas de abastecimento de combustível e verificação de taxímetros e o controle de emissão dos gases da combustão (ALBERTAZZI, 2008).

Dentre as competências e atribuições do Inmetro, destacam-se: execução de políticas nacionais de metrologia e da qualidade; verificação das normas técnicas e legais no escopo da metrologia; manutenção dos padrões das unidades de medida, assim como implementação da cadeia de rastreabilidade dos padrões das unidades de medida no país; planejamento e execução de atividades de acreditação de laboratórios de calibração e de ensaios e desenvolvimento, no âmbito do Sinmetro, de programas de avaliação da conformidade nas áreas de produtos, processos, serviços e pessoal (INMETRO, 2012).

Outras organizações também fazem parte do Sinmetro, tais como os Laboratórios Acreditados de Calibrações e Ensaios – RBC/RBLE, laboratórios reconhecidos formalmente pelo Inmetro e que são responsáveis pelo desenvolvimento de ensaios e calibrações. Assim, na RBC, há laboratórios que foram acreditados pelo Inmetro, isto é, laboratórios que estão oficialmente aptos a executar calibrações dentro de um nível técnico e organizacional; a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, responsável pela elaboração de normas vinculadas à regulamentação técnica; os Institutos Estaduais de Pesos e Medidas – IPEM, responsáveis por executar os serviços técnico-administrativos de pesos e medidas; entre outros.



Pesquise mais

Assista ao vídeo do Inmetro e compreenda melhor a importância da metrologia e como essa ciência faz parte do cotidiano da sociedade. INMETRO. **Medições na vida cotidiana** – Inmetro. 2013. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=K22wxQwkV60>>.

Acesso em: 29 maio 2017.

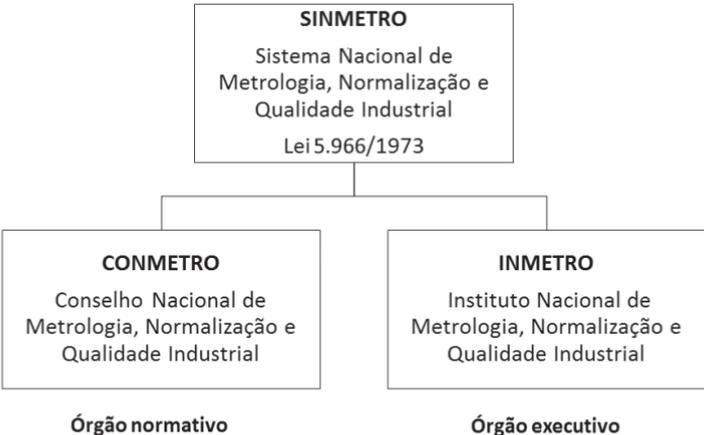
Sem medo de errar

Agora, você necessita refletir sobre o caso da empresa multinacional que atua na área de metrologia e que instalou sua filial recentemente no Brasil. Como consultor, lembre-se de que o presidente da filial lhe solicitou uma apresentação a fim de que você explique a estrutura do sistema metrológico brasileiro e mostre as possíveis linhas de atuação da nova empresa no Brasil.

Vamos começar a planejar a apresentação pensando no desencadeamento lógico das ideias, isto é, como se trata de uma empresa nova no Brasil, seria interessante apresentar, sucintamente, a história da metrologia no nosso país, focando no modo como o sistema metrológico estrutura-se hoje no contexto brasileiro. Logo, do ponto de vista histórico, você deve destacar o crescente relacionamento entre a metrologia, a ciência e a indústria no mundo, o que também impulsionou um empenho do Brasil para reproduzir essa associação, nas condições locais. Foi nesse contexto que tivemos a criação da primeira política metrológica no Brasil, no ano de 1967, a qual já começou a prever o uso exclusivo do SI no país.

O segundo passo engloba você expor como começou a estruturação do sistema metrológico brasileiro. Para tanto, deve-se citar o Sinmetro, instituído em 1973 pela Lei 5966, cujo objetivo contempla a assistência à indústria nacional, visando ao incentivo à geração de inovação na indústria, bem como ao comércio internacional. O Sinmetro possui como órgão normativo o Conmetro como órgão executivo o Inmetro. Nesse momento, é interessante que você desenhe um organograma (Figura 1.2), explicitando a estruturação básica do sistema metrológico brasileiro.

Figura 1.2 | Estrutura básica do sistema metrológico brasileiro



Fonte: elaborada pela autora.

O terceiro passo é você apresentar as outras entidades que também constituem o Sinmetro e que, conseqüentemente, estão vinculadas ou ao Conmetro ou ao Inmetro, principalmente os Laboratórios Acreditados de Calibrações e Ensaios – RBC/RBLE, responsáveis pelo desenvolvimento de ensaios e calibrações; a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, responsável pela elaboração de normas vinculadas à regulamentação técnica; os Institutos Estaduais de Pesos e Medidas – IPEM, responsável por executar os serviços técnico-administrativos de pesos e medidas; entre outros.

Finalizada a apresentação da estrutura do sistema metrológico, você deve mostrar em quais áreas da metrologia a nova filial pode atuar. Assim, você deve considerar que a empresa está iniciando suas atividades no Brasil e, então, necessita identificar nichos mercadológicos, com ênfase em metrologia, em que possa atuar. Nesse ponto, embora você já tenha exposto que a empresa pode fazer parte da RBC por meio da acreditação pelo Inmetro, é muito importante você ainda destacar que o Inmetro tem as áreas responsáveis pela Metrologia Científica e Industrial e Metrologia Legal. São nessas três áreas da metrologia que a nova filial poderia ter uma remuneração mais valorizada para o seu trabalho.

A Metrologia Científica relaciona-se com os padrões de medição internacionais e nacionais, bem como os instrumentos de laboratórios e pesquisas e metodologias científicas relacionadas à qualidade metrológica. Ainda no tocante à qualidade, tem-se a Metrologia Industrial, que aborda o controle metrológico nos processos produtivos. Por fim, destaca-se a Metrologia Legal, que possui um enfoque na proteção do consumidor por meio do tratamento de unidades de medida, de métodos e instrumentos de medição. Assim, por exemplo, a empresa poderia desenvolver a calibração de padrão e sistemas de medição para laboratórios; ou realizar a medição e controle de uma linha de produção de alguma grande empresa, ainda, fazer a verificação dos instrumentos de medição utilizados nas atividades comerciais.

Agora que você assimilou esse conteúdo e estruturou suas ideias, como você construiria sua apresentação? Poderia sugerir algum outro fator relevante que não fora contemplado?

Acreditação de laboratórios pelo Inmetro

Descrição da situação-problema

A importância do sistema metrológico de um país já é sabida e nós vimos como, no Brasil, as questões da metrologia estão fundamentadas e oficialmente organizadas. Imagine que você foi concursado para o cargo de analista executivo em metrologia e qualidade no Inmetro, e que sua primeira demanda inclui atividades de análise de processo de acreditação de laboratório de calibração. Assim, o responsável por um recém-criado laboratório metrológico necessita de mais informações sobre a Rede Brasileira de Calibração e sobre o que significa um laboratório ser acreditado pelo INMETRO. Como você apresentaria essas informações para o novo laboratório?

Resolução da situação-problema

A fim de que o responsável pelo laboratório metrológico tenha sua dúvida sanada, primeiramente, você deve explicar que, de fato, há um conjunto de laboratórios que atuam nas atividades de calibração e que constituem a denominada a Rede Brasileira de Calibração (RBC). Na RBC, há laboratórios que foram acreditados pelo Inmetro, isto é, que foram formalmente reconhecidos para o desenvolvimento de ensaios de calibração. Isso significa dizer que os laboratórios dessa rede estão oficialmente aptos a executar calibrações dentro de um nível técnico e organizacional. Logo, cabe ao Inmetro realizar a coordenação e a supervisão da atuação dessa rede de laboratórios. Posteriormente, você deve explicitar que qualquer laboratório, tanto nacional quanto estrangeiro, pode fazer parte da RBC, desde que realize ensaios e atenda aos critérios estabelecidos.

Destaca-se também que o Inmetro é o único órgão acreditador do Sinmetro, sendo reconhecido internacionalmente como o organismo de acreditação brasileiro. Na preparação dos documentos que servem de base para a acreditação, o Inmetro é assessorado pelos Comitês Técnicos do Conmetro. Ele acredita organismos de certificação, inspeção e treinamento, além de laboratórios de calibração e ensaios.

Faça valer a pena

1. A importância da criação do SI no mundo decorre do fato que, por meio desse sistema, foi instituída a padronização de unidades de medidas, o que permitiu melhorias nas relações de comércio entre diferentes povos e regiões, bem como a otimização dos processos de produção e manufaturas intercambiáveis, além de garantir maior coerência das medições ao longo dos anos.

Considerando as unidades adotadas pelo SI, assinale a alternativa que apresenta as sete unidades de base:

a) Comprimento (metro), aceleração (metros por segundo), massa (quilograma), tempo (segundo), área (metro quadrado), intensidade de força (ampère) e intensidade luminosa (candela).

b) Massa (grama), tempo (segundo), temperatura termodinâmica (graus centígrados), quantidade de matéria (mol), intensidade luminosa (candela), comprimento (metro) e frequência (hertz).

c) Quantidade de matéria (mol), comprimento (metro), massa (quilograma), tempo (hora), intensidade de força eletromotriz (ampère), temperatura termodinâmica (graus Celsius), e intensidade luminosa (candela).

d) Massa (quilograma), comprimento (metro), tempo (segundo), intensidade de corrente elétrica (ampère), temperatura termodinâmica (kelvin), quantidade de matéria (mol) e resistência elétrica (ohm).

e) Comprimento (metro), massa (quilograma), tempo (segundo), intensidade de corrente elétrica (ampère), temperatura termodinâmica (kelvin), quantidade de matéria (mol) e intensidade luminosa (candela).

2. Pensando na metrologia sob o ponto de vista técnico, é fundamental compreender a importância da grafia correta de resultados, unidades de medida e seus respectivos símbolos.

Assinale a alternativa que apresenta a grafia correta no tocante à metrologia:

a) Cem mts por segundo.

b) Duzentos e noventa e três Kelvin.

c) Trinta e cinco Newtons.

d) Vinte e oito graus Celsius.

e) Quinze hertz.

3. Um sistema metrológico confiável e bem fundamentado é de extrema importância para o progresso tecnológico e científico em uma país.

Adotando como base o sistema metrológico brasileiro e sua estrutura, assinale a alternativa que indica, respectivamente, as entidades responsáveis pela execução de serviços técnico-administrativos de pesos e medidas, desenvolvimento de calibrações, acreditação de laboratórios e elaboração de normas técnicas:

- a) CONMETRO, RBC, INMETRO, ABNT.
- b) INMETRO, ABNT, SINMETRO, RBC.
- c) IPEM, RBC, INMETRO, ABNT.
- d) ABNT, INMETRO, SINMETRO, RBC.
- e) SINMETRO, RBC, IPEM, ABNT.

Seção 1.2

Erro, incerteza e resultado de medição

Diálogo aberto

Caro aluno, na prática profissional, em indústrias de diferentes ramos, como o segmento automotivo, é de fundamental importância compreender o processo de medição, os tipos de erro associados a esse processo e o tratamento das incertezas vinculadas ao resultado de medição a fim de assegurar a assertividade de testes e ensaios metrológicos, o que muitas vezes ocorre em consonância com o departamento de qualidade. Assim, nesta seção, você vai estudar a fundamentação do processo de medição e de suas variáveis correlatas, que engloba procedimento, mensurando, condições, sistema e operador.

Pensando no processo, tem-se a reflexão sobre os erros de medição, considerando, principalmente, erros sistemáticos e aleatórios, bem como seus parâmetros de estimativa. Juntamente com o erro de medição, é de grande importância que você entenda o conceito de incerteza de medição e sua vinculação com o resultado final, compreendendo a expressão correta do resultado de medição em metrologia.

Como vimos na seção anterior, uma multinacional que atua especificamente na área de metrologia e instalou sua filial recentemente no Brasil lhe contrata para prestar consultoria. Primeiramente, como consultor, sua demanda foi de apresentar para o presidente da filial a estrutura do sistema metrológico brasileiro e as possíveis linhas de atuação da nova empresa, certo? Como a empresa ainda está em fase de implantação e de direcionamento de suas atividades, os primeiros ensaios metrológicos ainda serão executados, de modo que servirão como testes dos instrumentos de medição e treinamento dos operadores. Como você planejaria o processo de medição e obteria o erro de medição, visando à execução dos primeiros testes metrológicos e treinamento dos operadores? Assim, sua segunda demanda no papel de consultor

metrológico é elaborar um protocolo técnico contendo essas informações, conforme solicitado pelo gerente técnico da nova filial. Logo, fique atento a todos os tópicos que serão abordados e comece a refletir sobre como você pode elaborar tal protocolo que servirá como embasamento para as operações técnicas da filial. A partir de agora, dedique-se para aproveitar esse conteúdo e fazer a diferença em sua carreira.

Tenha um excelente estudo!

Não pode faltar

É intuitivo que, para haver uma medição, há a necessidade de ocorrer um processo que culmine no ato de medir que, por sua vez, irá conferir um resultado de medição. Primeiramente, para que ocorra uma medição, deve ser considerada a grandeza a se medir, isto é, o mensurando. Então, há o operador que irá realizar um procedimento de medição, em uma determinada condição, utilizando um instrumento ou um sistema de medição. O quadro 1.5 sumariza as variáveis constituintes do processo de medição e seus detalhamentos.

Quadro 1.5 | Variáveis constituintes do processo de medição e sua respectiva descrição

Variável do processo de medição	Descrição da variável
Mensurando	Grandeza a ser medida por meio do processo de medição.
Operador	Indivíduo que executa o procedimento de medição.
Procedimento de medição	Modo por meio do qual será realizada a medição: número de repetições, intervalo de tempo entre as repetições, técnica de medição, entre outros.
Instrumento ou sistema medição	Dispositivo que será empregado para realizar a medição. O instrumento é utilizado para dispositivos mais simples e menos robustos, como paquímetro e micrômetro, enquanto sistema de medição é utilizado para dispositivos mais complexos, como projetor de perfil.
Condições de medição	Condições, principalmente, ambientais em que ocorre a medição, como temperatura e umidade. A temperatura de referência considerada em metrologia é de 20 graus Celsius.

Fonte: elaborado pela autora.

Logo, observa-se que o processo de medição é constituído por cinco variáveis que, por sua vez, são consideradas fontes de erro para o processo, uma vez que pode ocorrer falha na leitura pelo operador não treinado ou erro do operador ao posicionar a peça a ser medida no instrumento; pode haver também imperfeições geométricas nos sistemas de medição ou mesmo o uso de um dispositivo não calibrado; ainda, uma medição executada sob elevada temperatura pode incorrer na dilatação da peça e/ou

do instrumento; entre outros. Assim, essas circunstâncias citadas certamente vão colaborar para que o resultado de medição apresente erros associados ao processo de medição como um todo (ALBERTAZZI, 2008).

Nesse contexto, tem-se o conceito de erro de medição que, segundo o Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia, significa a diferença entre o valor medido de uma grandeza e um valor de referência, também chamado de valor verdadeiro. A Equação 1.1 é geral para a obtenção do erro e parte do pressuposto de que é necessário saber o valor verdadeiro do mensurando para se determinar o erro (INMETRO, 2012).

$E = I - VV$ (Equação 1.1), sendo que, E = erro de medição; I = indicação; VV = valor verdadeiro do mensurando.

O erro de medição apresenta duas componentes: componente sistemática e componente aleatória.



Assimile

Note que por meio da utilização da equação geral do erro (Eq. 1) não é possível calcular as componentes sistemática e aleatória, obtendo-se apenas o erro de medição. Desta forma, nas práticas metrológicas, dificilmente utiliza-se essa equação, sendo preferível estimar o erro sistemático e o erro aleatório separadamente, de modo a possibilitar uma melhor análise do processo de medição.

Como a própria denominação indica, o erro sistemático tende a ser constante se todas as condições de medição forem mantidas, isto é, a componente sistemática do erro pode ser prevista. Assim, conceitualmente, entende-se que o erro sistemático, em medições repetidas, permanece constante ou varia de maneira previsível (INMETRO, 2012).

Quando um processo de medição envolver um instrumento mal calibrado, por exemplo, é claro que o resultado de medição sempre

apresentará um mesmo tipo de erro vinculado à imperfeição do instrumento, sendo considerado um erro sistemático. Assim, o instrumento sempre tenderá a indicar um valor superior ou inferior ao valor esperado.



Refleta

Para melhor compreender o erro sistemático, pense em uma balança analógica que está com o ponteiro torto. O que irá ocorrer com as medições executadas? Que tipo de erro certamente influenciará o resultado de medição?

Por se tratar de erro sistemático, essa componente pode ser prevista e corrigida na indicação do sistema de medição. O erro sistemático pode ser estimado por meio do parâmetro denominado Tendência (Td), conforme a Equação 1.2, e, justamente por poder ser previsto, essa componente pode ser corrigida no resultado de medição, por meio do parâmetro Correção (C), conforme Equação 4.

$Td = I_M - VV$ (Equação 1.2), sendo que, Td = tendência; I_M = indicação média; VV = valor verdadeiro

$I_M = \frac{\sum_{i=1}^n I_i}{n}$ (Equação 1.3), sendo que I_i é a indicação da i -ésima medição e n o número de medições

$C = -Td = VV - I_M$ (Equação 1.4), sendo que, Td = tendência; I_M = indicação média; VV = valor verdadeiro.

Pela Equação 4, percebe-se que o parâmetro Correção é numericamente igual à Tendência, mas com sinal invertido. De fato, se a intenção é corrigir o erro sistemático presente na indicação do sistema de medição, é compreensível que o valor da correção deva ser igual, em módulo, à estimativa dessa componente de erro a fim de que ela realmente seja compensada (ALBERTAZZI, 2008).



Exemplificando

Tem-se uma chapa quadrada de alumínio que se deseja obter o valor de sua dimensão externa, isto é, o valor de seu comprimento. Foram feitas 20 medições utilizando uma trena, obtendo-se uma indicação média de 2,50 m. Considerando o valor verdadeiro do mensurando como 2,40 m, tem-se um erro sistemático estimado em 0,10 m, conforme segue:

$$Td = I_M - VV$$

$$Td = 2,50 - 2,40 = +0,10m$$

Isso significa que o instrumento de medição utilizado tende sempre a indicar 0,10 m, ou 100 mm, a mais que o valor verdadeiro do comprimento da chapa de ferro. Assim, pensando em corrigir esse erro sistemático, tem-se $C = -0,10m$, conforme segue: $C = -Td = -0,10m$

Logo, para compensar o erro sistemático, deve-se aplicar uma correção de - 0,10 m à média das indicações.

O erro de medição também possui a componente aleatória, isto é, um erro que não pode ser previsto (ocorre de modo aleatório) e, tampouco, corrigido. Logo, entende-se o erro aleatório como aquele que, em medições repetidas, varia de maneira imprevisível e um exemplo característico dessa componente refere-se ao erro do operador (INMETRO, 2012).

O erro aleatório pode ser estimado pelos parâmetros Incerteza Padrão (u) e Repetitividade (Re). A Incerteza Padrão, conforme Equação 5, refere-se ao desvio-padrão do erro aleatório de medição e é obtida a partir de uma série de repetições da medição. O parâmetro Repetitividade (Re), calculado a partir do coeficiente t de Student e da incerteza padrão de acordo com a Equação 6, permite quantificar a intensidade do erro aleatório

$$u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - I_m)^2}{n-1}} \quad (\text{Equação 1.5})$$

$$Re = \pm(t \cdot u) \quad (\text{Equação 1.6})$$

Re = repetitividade; t = coeficiente de *Student* para 95,45% de probabilidade e $v = n - 1$ graus de liberdade, sendo n o número de repetições de medições; u = incerteza padrão; I_i = indicação da i -ésima medição.



Pesquise mais

Você deve conhecer a diferença conceitual entre Repetitividade (Re) e Reprodutibilidade (Rp).

Ambos os parâmetros se referem à estimativa da componente aleatória do erro e, matematicamente, são obtidos pela multiplicação da incerteza padrão e do coeficiente t de *Student*, conforme a Equação 6.

O ponto de diferenciação dos parâmetros se estabelece por meio do uso da Reprodutibilidade para estimar erros aleatórios a partir de medições repetidas, de um mesmo mensurando, efetuadas sob condições variadas de medição. Assim, se em um processo de medição houver diferentes princípios de medição; diferentes métodos de medição; operadores distintos; diferentes sistemas de medição; diferentes locais onde são efetuadas as medições; distintas condições de utilização; e distintos momentos em que as medições são efetuadas, então falamos em erro aleatório por meio da Reprodutibilidade.

Nos livros didáticos, para estimativa numérica da componente aleatória do erro, comumente utiliza-se o parâmetro Repetitividade sem a distinção com o parâmetro Reprodutibilidade, uma vez que ambos são obtidos pela mesma equação (ALBERTAZZI, 2008). Assim, no nosso livro, também empregaremos Repetitividade como estimativa do erro aleatório, independentemente das condições de medição serem mantidas iguais ou diferentes a fim de facilitar a compreensão.

Para entender melhor esse apontamento, leia o capítulo 4, especificamente a página 118, do livro a seguir:

ALBERTAZZI, Armando; SOUSA, André Roberto de. **Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial**. São Paulo: Editora Manole, 2008. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788520452172/cfi/135!/4/4@0.00:35.3>>. Acesso em: 29 maio 2017.

A Tabela 1.1 ilustra os valores do coeficiente t de *Student* para 95,45% de probabilidade e $v = n - 1$ graus de liberdade. Note que para valores de v entre os estratos da tabela (por exemplo $v = 255$), é necessário fazer uma interpolação para se obter o valor exato do coeficiente t.

Tabela 1.1 | Valores do coeficiente t de *Student* para 95,45% de probabilidade e $v = n - 1$ graus de liberdade, sendo n o número de medições

v	t	V	t	v	t	v	t
1	13,968	10	2,284	19	2,140	80	2,032
2	4,527	11	2,255	20	2,133	90	2,028
3	3,307	12	2,231	25	2,105	100	2,025
4	2,869	13	2,212	30	2,087	150	2,017
5	2,649	14	2,195	35	2,074	200	2,013
6	2,517	15	2,181	40	2,064	1000	2,003
7	2,429	16	2,169	50	2,051	10000	2,000
8	2,366	17	2,158	60	2,043	100000	2,000
9	2,320	18	2,149	70	2,036	∞	2,000

Fonte: Albertazzi e Sousa (2008).



Assimile

Note que, de acordo com a Equação 6, utiliza-se o coeficiente t de *Student* para 95,45% de probabilidade, significando que há 95,45% de chances de o erro aleatório estar dentro da faixa indicada pela Repetitividade. Nos livros da área e, principalmente, na prática, comumente adota-se a probabilidade de 95,45%, embora outros valores de probabilidade também possam ser utilizados, como 95,0%, 99,0% ou 99,7%.

A Tabela 1.1 mostra os valores do coeficiente t de *Student* para 95,45% de probabilidade e $v = n - 1$ graus de liberdade, sendo n o número de medições. Perceba, para uma mesma probabilidade, quanto maior o valor do grau de liberdade, menor será o valor do coeficiente de *Student*. Assim, por exemplo, para $v = 3$, temos $n = 4$ medições e $t = 3,307$; da mesma forma, para um $v = 30$, temos $n = 31$ medições e $t = 2,087$.

Isso significa que quanto mais dados forem usados para estimar o desvio-padrão, melhor será a confiabilidade da estimativa realizada, ou seja, um número de medições cada vez maior também implicará em um aumento na confiabilidade da estimativa do desvio-padrão.



Vamos considerar novamente o exemplo da chapa quadrada de alumínio que se deseja obter o valor de sua dimensão externa, isto é, o valor de seu comprimento. Foram feitas 20 medições, obtendo-se uma indicação média de 2,50 m e um desvio padrão igual a 0,55 m, ou seja, $u = 0,55$ m. Como foram feitas 20 medições, tem-se $v = 20 - 1 = 19$, de modo que o coeficiente t de *Student*, pela Tabela 1.1., é igual a 2,140.

Desta forma, para se estimar a intensidade da componente aleatória do erro de medição, deve-se obter a Repetitividade, calculando, primeiramente, o desvio-padrão conforme Equação 5.

$$Re = \pm(t \cdot u)$$

$$Re = \pm(2,140 \cdot 0,55)$$

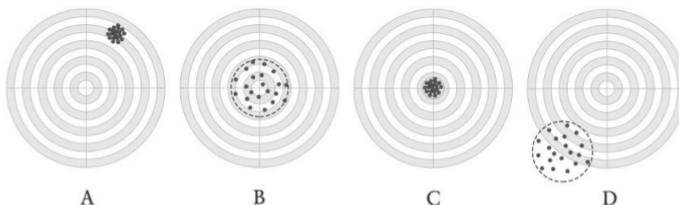
$$Re = \pm 1,18m$$

Logo, a estimativa do erro aleatório é de $\pm 1,18m$, isto é, o erro aleatório pode estar na faixa de $\pm 1,18m$. Talvez este erro esteja associado à falta de treinamento do operador, por exemplo.

Associado ao conceito de componente sistemática e componente aleatória do erro de medição, tem-se a definição de exatidão e de precisão. Conceitualmente, exatidão refere-se ao grau de concordância entre um valor medido e um valor verdadeiro de um mensurando, enquanto precisão indica o grau de concordância entre indicações ou valores medidos, obtidos por medições repetidas, no mesmo objeto ou em objetos similares, sob condições especificadas (HOWARTH; REDGRAVE, 2008).

É muito comum utilizarmos de modo equivocado esses conceitos, mas um exemplo clássico que facilita a compreensão é se pensarmos no jogo de tiro ao alvo, conforme a Figura 1.3.

Figura 1.3 | Resultados dos tiros ao alvo, considerando quatro operadores diferentes (A, B, C e D)



Fonte: Albertazzi e Sousa (2008, p. 40).

Pela Figura 1.3, observamos que o operador A deu tiros muito próximos uns dos outros, ou seja, houve uma baixa dispersão dos resultados, embora esse indivíduo não tenha conseguido acertar o alvo, que era o centro. Assim, podemos dizer que o operador A apresentou uma alta precisão nos resultados e baixa exatidão. O operador C também deu tiros muito próximos, apresentando alta precisão, e, além disso, todos os tiros praticamente alcançaram o alvo, o que nos permite assegurar que houve uma elevada exatidão nos resultados. Diferentemente, os operadores B e D tiveram tiros mais dispersos, o que acarretou uma baixa precisão. Em termos de exatidão, podemos dizer que o operador B manteve-se mais próximo do alvo se comparado ao operador D, ou seja, o indivíduo B foi mais exato que o indivíduo D. Assim, compreenda que exatidão está vinculado ao valor mais perto do valor verdadeiro enquanto precisão vincula-se com a dispersão entre as medidas.

Vale ressaltar que, se quisermos saber qual operador foi mais preciso entre B e D, podemos estimar por meio do cálculo do desvio-padrão das medidas, uma vez que este parâmetro indica o quão distante os valores individuais de uma série de medição estão do valor médio. Assim, caso o operador B apresente um menor desvio padrão dos resultados, se comparado ao operador D, então afirmaremos que o indivíduo B foi mais preciso que D, embora a precisão seja baixa.

Se associarmos o desvio-padrão ao conceito de precisão, então isso nos faz refletir sobre o erro aleatório, certo? De fato, quanto maior for a precisão (e, então, menor o desvio-padrão), é esperado que a componente aleatória do erro seja baixa, pois facilmente poderemos perceber uma menor dispersão dos resultados. Da mesma forma, quanto maior a exatidão, menor tenderá a ser o erro sistemático (LIRA, 2015; ALBERTAZZI, 2008).

Outro conceito vinculado ao erro de medição refere-se à incerteza de medição. A principal diferença entre erro e incerteza é que o erro de medição é um número que advém da diferença entre a indicação de um sistema de medição e o valor verdadeiro do mensurando, conforme já expresso pela Equação 1 no início desta seção. Diferentemente, a incerteza está associada à faixa de valores que pode ser atribuída ao mensurando, de modo que,

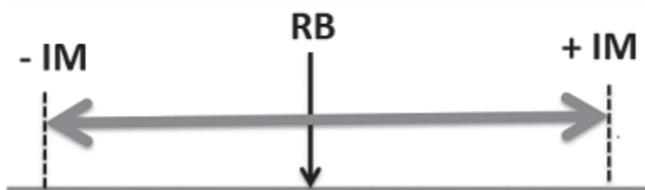
quanto maior for a incerteza, menor será a confiabilidade desse resultado (INMETRO, 2012). Uma demonstração de que o erro e a incerteza são parâmetros distintos se faz por meio da observação de que, para calcular o erro de medição, necessariamente precisamos conhecer o valor verdadeiro do mensurando; em contrapartida, podemos obter a incerteza mesmo quando desconhecemos o valor verdadeiro do mensurando. Comumente, a incerteza de medição abrange muitas componentes, incluindo aquela proveniente de efeitos sistemáticos, e algumas podem ser estimadas por uma avaliação do Tipo A da incerteza de medição ou por uma avaliação do Tipo B da incerteza de medição (ALBERTAZZI, 2008). Até este momento introdutório, basta você assimilar o conceito de incerteza, uma vez que os detalhamentos serão vistos na Unidade 2.

Nesse contexto, tem-se ainda a definição de resultado de medição (RM) conforme a Figura 1.4, que é expresso por um único valor, também chamado de resultado base, e uma incerteza de medição. Assim, nota-se que o resultado de medição, que é uma faixa de valores, é constituído pelo resultado base (RB) e pela incerteza de medição, expresso, de modo genérico, segundo a Equação 7 (INMETRO, 2003).

$$RM = RB \pm IM \quad (\text{Equação 1.7})$$

A título de exemplificação, se temos um resultado base igual a 10,5 m e uma incerteza de 1,3 m, então nosso resultado de medição será expresso como **(10,5 ± 1,3)m**.

Figura 1.4 | Expressão do resultado de medição (RM) constituído pelo resultado base (RB) e pela incerteza de medição (IM).



Fonte: elaborada pela autora.

Quando realizamos apenas uma medição, o resultado base coincide com o resultado daquela única medição. Diferentemente, quando realizamos n medições, a indicação média torna-se o resultado base. Assim, o resultado base refere-se ao valor central da faixa correspondente ao resultado de medição, sendo conhecido como o valor mais próximo do valor verdadeiro do mensurando (ALBERTAZZI, 2008; LIRA, 2015).

O valor do resultado de uma medição, mesmo após a compensação da componente sistemática conhecida, ainda continua sendo uma estimativa do valor do mensurando, devido à incerteza proveniente dos efeitos aleatórios e da correção imperfeita do resultado para efeitos sistemáticos (INMETRO, 2003). Assim, observa-se que o resultado de medição sempre terá uma incerteza atrelada a qual, por sua vez, também se vincula com efeitos sistemáticos e aleatórios.

Sem medo de errar

Retomando o caso da nova filial no Brasil, como consultor, sua segunda demanda é planejar o processo de medição e a obtenção do erro de medição, visando à execução dos primeiros testes metrológicos e treinamento dos operadores. Lembre-se de que você necessita elaborar um protocolo técnico contendo essas informações, conforme solicitado pelo gerente técnico da empresa.

Como a sua função é desenvolver um protocolo geral, que irá orientar as atividades técnicas da nova empresa, então primeiramente reflita sobre quais são as variáveis reinantes no processo de medição. Assim, o primeiro passo é colocar no protocolo que, para se determinar um processo de medição, deve-se fundamentar os seguintes itens:

- (1) Mensurando: grandeza a ser medida por meio do processo de medição.
- (2) Operador: indivíduo que irá aplicar o procedimento de medição.
- (3) Procedimento de medição: modo como a medição é realizada, incluindo a determinação da técnica de medição, número de medições, entre outros.

- (4) Sistema de medição: dispositivo que será utilizado na execução da medição.
- (5) Condições de medição: explicitar quais sob quais condições a medição foi realizando, englobando, principalmente, temperatura e umidade.

Assim, para planejar qualquer processo de medição, as cinco variáveis anteriores devem, necessariamente, ser planejadas.

O segundo passo na elaboração do protocolo é mostrar um caminho para a obtenção do erro de medição. Nesse momento, a fim de conferir maior assertividade para o processo em sua análise, você deve considerar obter a componente sistemática e a componente aleatória do erro.

Sobre a componente sistemática, no protocolo deve conter que a mesma pode ser estimada pelo parâmetro Tendência, sendo que $Td = I_M - VV$, com I_M = indicação média e VV = valor verdadeiro do mensurando.

Dado o erro sistemático ser previsível, podemos corrigi-lo utilizando o parâmetro Correção, que é numericamente igual à Tendência, mas com sinal invertido, ou seja, $C = -Td$.

Para a obtenção do erro aleatório, utiliza-se o parâmetro Incerteza Padrão (u), que se refere ao desvio-padrão das medidas. A partir do cálculo de u , obtém-se a intensidade da componente aleatória do erro por meio do parâmetro Repetitividade (Re), sendo que $Re = \pm(t \cdot u)$ e t = coeficiente de *Student* para 95,45% de probabilidade e $v = n - 1$ graus de liberdade, sendo n o número de medições.

Por fim, coloque no protocolo como o resultado de medição deve ser expresso, considerando que o mesmo é constituído pelo resultado base (RB) e pela incerteza de medição, sendo $RM = RB \pm IM$.

Agora que você assimilou esse conteúdo e estruturou suas ideias, como você elaboraria o protocolo de execução dos primeiros testes metrológicos e treinamento dos operadores?

Pense primeiramente no planejamento das cinco variáveis constituintes do processo de medição e, então, apresente os parâmetros estimadores do erro sistemático. Posteriormente,

mostre como se obtém a intensidade do erro aleatório e, então, explique o resultado de medição como uma faixa de valores composta pelo resultado de medição e incerteza.

Poderia sugerir algum outro fator relevante e que não foi contemplado? Aproveite a oportunidade e compile esses dados protocolares de maneira detalhada.

Avançando na prática

Técnico de laboratório e o desenvolvimento de ensaios metrológicos

Descrição da situação-problema

Considerando que você foi contratado como técnico de um laboratório de metrologia, lhe foi solicitado que avalie a massa de uma esfera de aço utilizada em rolamentos, sendo que o valor de especificação desta peça, ou seja, seu valor verdadeiro, é de 300,00 g. Para isto, você executa 5 medições em uma balança, obtendo as indicações da Tabela 1.2. A partir das medições, você necessita colocar os resultados em um relatório e entregar para o gerente da área, devendo contar: erro de medição; componente sistemática do erro; componente aleatória do erro.

Tabela 1.2 | Resultado da medição do ensaio da esfera de aço

Número da medição	Indicação
1	300,50
2	300,27
3	300,35
4	300,19
5	300,31

Fonte: elaborada pela autora.

Resolução da situação-problema

Os erros podem ser obtidos em três etapas, conforme segue:

(I) Para calcular o erro de medição, devemos utilizar a equação geral do erro ($E = I - VV$) e a Tabela 1.3 expressa esse resultado:

Tabela 1.3 | Resultado do erro de medição do ensaio da esfera de aço

Número da medição	Indicação	$E = I - VV$	Erro de medição
1	300,50	$E = 300,50 - 300,00$	$E = 0,50 \text{ g}$
2	300,27	$E = 300,27 - 300,00$	$E = 0,27 \text{ g}$
3	300,35	$E = 300,35 - 300,00$	$E = 0,35 \text{ g}$
4	300,19	$E = 300,19 - 300,00$	$E = 0,19 \text{ g}$
5	300,20	$E = 300,20 - 300,00$	$E = 0,20 \text{ g}$

Fonte: elaborada pela autora.

(II) Para calcular a componente sistemática, obtém-se a Tendência pela equação $Td = I_M - VV$

- Cálculo da Indicação Média:

$$I_M = (300,50 + 300,27 + 300,35 + 300,19 + 300,20) / 5$$

$$I_M = 300,30 \text{ g}$$

- Cálculo da Tendência, considerando $VV = 300 \text{ g}$, conforme especificação do produto:

$$Td = 300,30 - 300,00 = 0,30 \text{ g}$$

Estimativa da componente sistemática do erro é $0,30 \text{ g}$, significando que uma parcela do erro decorre da má geometria do sistema de medição, da falta de calibração, de desgastes de componentes, da influência da temperatura, entre outros fatores.

(III) Para calcular a componente aleatória, obtém-se o desvio-padrão pela equação $u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2}{n-1}}$ e a Repetitividade pela equação

$$Re = \pm(t \cdot u)$$

Calcula-se o desvio-padrão, obtendo o resultado de $u = 0,13$ g.

Para $v = 5 - 1$ graus de liberdade, tem-se $t = 2,869$ (Tabela 1.1)

$$Re = \pm(2,869 \cdot 0,13) = 0,37g$$

A estimativa da componente aleatória do erro é 0,37 g, significando que parte do erro não pode ser prevista e, possivelmente, deve estar vinculada à falta de treinamento do operador, oscilação não programadas na rede de energia etc.

Agora, temos os dados necessários para escrever o relatório. Bom trabalho!

Faça valer a pena

1. Na metrologia, antes da execução de qualquer ensaio de medição, deve-se, primeiramente, planejar o processo de medição. O processo de medição é o meio orientador da execução de todas as etapas e, por meio dele, todos os fatores necessários para o ato de medir são determinados.

Assinale a alternativa que apresenta corretamente todas as variáveis do processo de medição:

- a) Operador; temperatura; umidade; instrumento/sistema de medição.
- b) Instrumento/sistema de medição; operador; condições de medição; procedimento; mensurando.
- c) Mensurando; condição de medição; procedimento; operador.
- d) Procedimento; condição de medição; operador; temperatura.
- e) Instrumento/sistema de medição; mensurando; operador; condições de medição.

2. É sabido da existência da componente sistemática e da componente aleatória do erro de medição, de modo que a obtenção desses tipos de erro permite uma análise mais assertiva do processo de medição. Nesse contexto, considere as afirmações de I, II e III:

I. A vibração do sistema de medição é um exemplo de erro aleatório, assim como o erro advindo da influência da temperatura.

II. O instrumento de medição com ponteiro torto irá gerar um erro que pode ser estimado por meio do parâmetro Tendência.

III. O erro resultante da ação de um operador mal treinado não pode ser previsto, sendo um exemplo de erro aleatório.

Assinale a alternativa correta:

- a) Apenas a afirmação I é correta.
- b) Apenas a afirmação II é correta.
- c) Apenas as afirmações II e a III são corretas.
- d) As afirmações I, II e III são corretas.
- e) Apenas as afirmações I e II são corretas.

3. O erro sistemático pode ser estimado por meio do parâmetro Tendência (Td) e pode ser corrigido por meio do parâmetro Correção (C).

A massa de um cilindro de ferro, cuja especificação é de $(30,0 \pm 0,7)$ g, foi analisada por meio de 10 medições repetidas em uma balança, obtendo-se uma indicação média de 30,5 g. Assinale a alternativa que apresenta corretamente o valor da Tendência e da Correção, respectivamente:

- a) 0,95 g; - 0,95 g.
- b) 0,7 g; - 0,7 g.
- c) - 0,7 g; 0,5 g.
- d) 0,5 g; - 0,7 g.
- e) 0,5 g; - 0,5 g.

Seção 1.3

Métodos e sistemas de medição

Diálogo aberto

Estamos finalizando a Unidade 1 e, nesta seção, você vai aprender conceitos importantes vinculados aos métodos de medição, características metrológicas e fontes de erro. Assim, inicialmente, é importante que você compreenda os fundamentos e as características de cada método de medição, como o de comparação, indicação e diferencial. Por exemplo, quando você vai à farmácia, certamente você já se deparou com diferentes tipos de balança, incluindo uma balança moderna, que é totalmente digital; balanças mais antigas, com ponteiro e um grande visor circular; e a balança mecânica, ainda muito utilizada em consultórios, que tem um cursor em uma régua graduada até atingir a massa que está sendo medida. Então, cada um desses instrumentos está pautado em métodos de medição e é importante que você assimile esse conteúdo a fim de extrapolar e aplicar na sua prática profissional.

No tocante às características metrológicas, ainda exemplificando por meio do caso da balança, é fato que cada uma delas tem a sua especificação, ou seja, cada sistema de medição é projetado para atuar em determinadas condições e caracterizar o instrumento lhe assegura um uso efetivo. A partir das características metrológicas, já podemos pensar quais são as condições não previstas para uso do sistema e, assim, entender que há fontes de erros, internas e externas, que ocasionam aumento da incerteza de medição. Novamente pensando na balança, se ela foi especificada para uso à temperatura ambiente e a colocamos sob uma temperatura acima de 30 graus Celsius, você já pode refletir sobre potenciais erros associados à medição em função da influência da temperatura, certo?

Sob essa perspectiva, vamos retomar o contexto que vimos na seção anterior, isto é, considere uma multinacional que atua especificamente na área de metrologia e instalou sua filial recentemente no Brasil. Como consultor, na sua terceira demanda, o

gerente técnico lhe solicitou que apresentasse para a equipe técnica as principais características metrológicas que devem ser analisadas em diferentes sistemas de medição. Assim, uma vez executados os testes dos instrumentos ou sistemas de medição, como você analisaria o desempenho e as especificações técnicas a fim de conhecer melhor os dispositivos de medição?

Fique atento a todos os tópicos que serão abordados e comece a refletir no modo como pode elaborar essa apresentação que servirá como referência para a equipe técnica da nova filial.

Então, dedique-se para aproveitar esse conteúdo e fazer a diferença em sua carreira.

Tenha um excelente estudo!

Não pode faltar

Vamos refletir a respeito dos métodos básicos de medição, que são os métodos de: comparação, indicação e diferencial.

O **método da comparação**, como a própria denominação significa, baseia-se na determinação do valor do mensurando por meio da comparação com um determinado objeto cujo valor de referência é muito bem conhecido, isto é, é sabido o valor verdadeiro desse artefato e a sua incerteza é baixa a fim de permitir utilizá-lo como referência para a medição (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008). Na metrologia, denominamos esse objeto de medida materializada, ou padrão, referindo-se a um dispositivo capaz de reproduzir ou fornecer valores conhecidos de uma dada grandeza. Assim, por exemplo, podemos citar os blocos padrão de comprimento e dureza, massa padrão, resistor-padrão, gerador-padrão de sinais, entre outros (INMETRO, 2012).



Assimile

Para melhor compreender o conceito e a característica de cada método, vale citar que, de acordo com o Vocabulário Internacional de Metrologia (INMETRO, 2012), um método de medição é uma sequência lógica de operações, descritas genericamente, utilizadas na execução de medições.

Assim, no método da comparação, emprega-se uma medida materializada com valor conhecido e equivalente ao mensurando que se quer medir, de modo que o sistema indique diferença zero entre os objetos.

As seguintes operações são executadas: (1) coloca-se, no sistema de medição, o artefato a ser medido; (2) coloca-se um conjunto padrão daquela grandeza que se quer medir até atingir o equilíbrio; (3) o resultado de medição será dado, então, pelo padrão (ou conjunto) utilizado. A fim de facilitar a compreensão, pense em uma balança de pratos, também conhecida como

balança da justiça. Em um dos pratos, você deposita a massa a ser medida e, no outro prato, coloca um conjunto de massa padrão que seja exatamente equivalente ao mensurando, de modo que haja um equilíbrio entre os dois pratos da balança. O resultado de medição da massa desconhecida será igual ao somatório das massas padrão.



Pesquise mais

Vale a pena você conhecer melhor os tipos de padrão utilizados nas indústrias, de acordo com a especificidade da grandeza que se medir. Para este fim, leia o capítulo 3 do livro a seguir:

LIRA, Francisco Adval de, **Metrologia na Indústria**. 3. ed. São Paulo: Erica, 2015.

Este livro está presente na biblioteca virtual!

No **método da indicação**, também conhecido como método da deflexão do ponteiro, quando o sistema é acionado, um número proporcional ao valor do mensurando é obtido. Muitos instrumentos digitais operam como base no método da indicação, sendo que o valor obtido no mostrador digital, quando o sistema é acionado, refere-se ao valor do mensurando (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008). Outro exemplo é um termômetro que utiliza a dilatação de líquidos, de modo que a dilatação volumétrica deste líquido é proporcional à temperatura do corpo em medição.

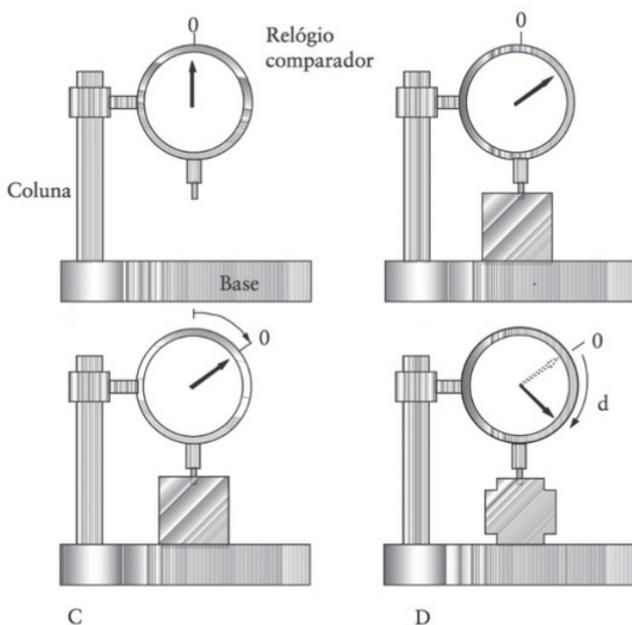
Por fim, no **método diferencial**, tem-se uma combinação dos métodos da indicação e da comparação. Assim, relativo ao método da comparação, tem-se o uso de medida materializada cujo valor é próximo ao do mensurando e a diferença entre ambos é medida pelo método da indicação. Logo, não há necessidade de equiparar os valores entre o mensurando e o padrão, mas preza-se somente por uma aproximação, de modo que a diferença é obtida pelo método da indicação.

No método diferencial, as seguintes operações são executadas: (1) aplica-se ao sistema uma medida materializada com dimensão próxima a do mensurando; (2) zera-se o sistema; (3) retira-se a medida materializada e a peça a ser medida é posicionada; (4) uma

nova indicação será obtida e essa diferença representa o quanto a peça difere do valor de referência da medida materializada (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008).

Como exemplo do método diferencial, podemos citar o uso do relógio comparador, formado por uma base, uma coluna e um medidor de deslocamento (Figura 1.5-A). Inicialmente, como o relógio comparador vai medir comprimento, aplica-se um bloco-padrão ao sistema com dimensão semelhante àquela da peça que se quer medir. Ao posicionar o bloco-padrão, o relógio marcará uma nova indicação relativa à medida de referência (Figura 1.5-B). Posteriormente, o “novo zero” do instrumento mantém-se como aquele obtido com o bloco-padrão que será retirado e (Figura 1.5-C). Então, posiciona-se a peça que se quer medir no sistema, de modo que o ponteiro passa a indicar um novo valor, referente à diferença entre a peça e o valor de referência do bloco-padrão (Figura 1.5-D). Por fim, para se obter o comprimento final da peça, deve-se adicionar o valor da diferença ao valor do bloco-padrão.

Figura 1.5 | Operações constituintes do método da diferenciação, adotando como exemplo o relógio comparador



Fonte: Albertazzi e Sousa (2008, p. 95).



Como vimos, há três métodos básicos de medição: comparação, indicação e diferencial. Quais parâmetros de análise você utilizaria para escolher o melhor método?

Vamos refletir agora sobre as características dos métodos de medição, de modo comparativo. Devemos considerar que, por utilizar medidas materializadas, que são artefatos de baixa incerteza, o método da comparação apresenta um custo elevado, devido ao fato do processo de fabricação desses dispositivos exigir tolerâncias mais apertadas, o que encarece o produto. Diferentemente, no método da indicação, não há necessidade de medida materializada, costumando ser um sistema de medição com preço mais acessível; contudo, são requeridas manutenções e calibrações periódicas. Já o método diferencial, possui um custo intermediário, pois se utiliza de padrão de medidas, porém não há a necessidade de ter um conjunto diversificado, como ocorre no método da comparação.

Refletindo sobre a facilidade de automação do método, percebe-se que o emprego de padrão dificulta a automatização dos métodos da comparação e diferencial, sendo o método da indicação o mais fácil de ser computadorizado.

Por fim, quanto à velocidade de operação, é fácil imaginar que o método da comparação requiera mais tempo de execução, pois é necessário comparar o mensurando com a medida materializada e obter uma diferença igual a zero. Em contrapartida, o método da indicação é o mais rápido, uma vez que se obtém a indicação no mesmo momento em que o sistema é acionado. No método diferencial, por sua vez, a velocidade pode ser considerada relativamente alta, principalmente quando necessita-se zerar o sistema uma única vez (por exemplo, quando se mede peças iguais). Logo, a seleção do método de medição deve, além de depender da aplicação, considerar esses aspectos citados. No tocante à estrutura de um sistema de medição, vale a pena elencar as partes constituintes de dispositivos que operam pelo método da indicação. Assim, esses sistemas apresentam 3 módulos principais:

o transdutor ou sensor, a unidade de tratamento do sinal e o mostrador ou registrador. O transdutor gera um sinal de medição, proporcional ao valor do mensurando, e cabe à unidade de tratamento do sinal processar e amplificar a potência desse sinal de medição. Por fim, o dispositivo mostrador recebe esse sinal e transforma-o em indicação direta ao usuário, por meio de recursos de diversas naturezas, como mecânicos, eletromecânicos, eletrônicos, entre outros.

Dispositivos que operam pelo método da comparação geralmente estão pautados apenas em sistemas mecânicos, enquanto que dispositivos que atuam pelo método diferencial, por sua vez, possuem a estrutura básica de sistemas que operam pela indicação e, ainda, possuem a parte mecânica vinculada ao método da comparação (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008).

Ainda no tocante aos sistemas de medição, uma vez entendidos os métodos básicos de operação, bem como sua estrutura física, torna-se válido caracterizar esses dispositivos de acordo com as especificações da metrologia. Podemos qualificar um sistema de medição quanto ao seu comportamento e desempenho, por meio de parâmetros: faixa de utilização; indicação; relação entre estímulo e resposta; erros de medição.

Assim, as características vinculadas à faixa de utilização referem-se ao modo por meio do qual o sistema pode operar, pensando nos seus limites de utilização, e podem ser subdivididas em faixa de indicação, faixa nominal e faixa de medição. A faixa de indicação (FI) refere-se ao intervalo compreendido entre o menor e o maior valor que pode ser indicado; por exemplo, um termômetro com uma coluna de líquido, para verificação de temperatura corpórea, indica entre 34,5 a 42,5 graus Celsius, ou seja, podemos ver as graduações desde 34,5 até 42,5 graus Celsius. A faixa nominal (FN) remete à faixa ativa selecionada pelo usuário, isto é, em sistemas de medição que possuem várias faixas de indicação, é possível obter uma posição específica dos controles do dispositivo; por exemplo, em um voltímetro, podemos selecionar a faixa de operação como sendo de 0 a 20 V ou de 0 a 200 V.

Assim, a escolha da faixa na qual o instrumento vai operar deve

considerar o conjunto de valores de um mensurando para o qual se admite que o erro de um instrumento de medição mantém-se dentro dos limites especificados, ou seja, para selecionar a faixa nominal é necessário conceber que o instrumento tem um erro de medição. Por fim, a faixa de medição (FM), que vincula-se com a faixa de valores para a qual o sistema de medição foi desenhado para operar, sendo estabelecida pelo fabricante, é normalmente especificada por seus limites inferior e superior. Um exemplo é o paquímetro, cuja faixa de medição é de 0 a 150 mm, ou seja, o instrumento foi projetado (especificação) para operar bem em medidas de 0 a 150 mm, sendo esta a sua faixa de medição (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008; INMETRO, 2012; LIRA, 2015).



Exemplificando

Vale ressaltar a diferença entre a faixa de medição e a faixa de utilização. Utilizando o exemplo do paquímetro, o seu uso foi especificado pela equipe de projeto para a faixa de 0 a 150 mm. Contudo, ao visualizar esse instrumento, você vai observar que há graduações desenhadas entre 0 a 200 mm. Assim, temos que a faixa de indicação é de 0 a 200 mm, enquanto que a faixa de medição é de 0 a 150 mm. Vale destacar ainda que há casos nos quais a faixa de utilização e a faixa de medição coincidem, como no termômetro de bulbo, que foi feito para operar entre -20 a 60 graus Celsius, sendo estas as graduações também indicadas no instrumento.

Quanto à indicação, esta pode ser realizada de forma analógica (ponteiros ou marcas) ou digital (dígitos numéricos). Uma das principais características metroológicas no tocante à indicação é a resolução, que se refere à menor diferença entre indicações que pode ser significativamente percebida (INMETRO, 2012). Por exemplo, micrômetro que tem resolução de 0,01 mm significa que o mínimo passível de ser identificado pelo instrumento é 0,01 mm, de forma que não conseguiríamos assegurar um valor de 0,005 mm para este dispositivo, uma vez que é menor que a diferença mínima entre as indicações. Nos instrumentos digitais, a resolução recebe a denominação de incremento digital, mas mantém o conceito de ser a diferença mínima entre as indicações.

Por exemplo, se pensarmos em uma balança digital de incremento digital igual a 0,1 g, significa que, da mesma forma que o analógico, não conseguiríamos assegurar um valor de 0,05 g para este dispositivo. Logo, suponha que a massa de 100 grãos de arroz seja igual a 0,1 g (ou seja, massa de 0,001 g para cada grão), caso adicionemos mais 30 grãos de arroz, será que a indicação da balança irá mudar? Podemos afirmar que não, pois, mesmo sabendo que a adição de 30 grãos vai aumentar a massa, o sistema não apresenta resolução para permitir identificar e quantificar esse aumento de massa, que seria de 0,03 g (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008; LIRA, 2015).

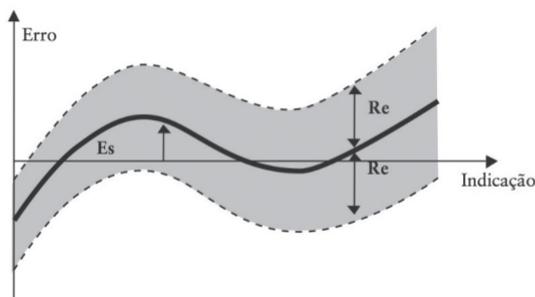
No que se refere à relação estímulo/resposta, destacam-se as características metrológicas de sensibilidade e tempo de resposta. A sensibilidade refere-se à razão entre a variação da resposta em função da variação do estímulo, podendo ser linear ou não linear. O tempo de resposta é o intervalo entre o momento de ocorrência do estímulo e o instante em que a resposta atinge e permanece estável dentro de limites especificados (INMETRO, 2012).

Por sua vez, as características metrológicas vinculadas ao erro englobam a Tendência (Td) e Correção (C); Repetitividade (Re) e Reprodutibilidade (Rp); e Erro Máximo. Como vimos na Seção 1.2, o erro sistemático pode ser estimado por meio do parâmetro Td e, justamente por poder ser previsto, essa componente pode ser corrigida no resultado de medição, por meio do parâmetro C. De forma análoga, o parâmetro Re refere-se à faixa dentro da qual é esperado o erro aleatório, considerando medições repetidas realizadas nas mesmas condições. Já o parâmetro Rp também mostra a intensidade do erro aleatório, mas considerando medições repetidas realizadas em condições variadas. Quanto ao erro máximo, seu conceito refere-se ao valor absoluto do maior valor de erro de medição que pode ser cometido pelo sistema, englobando, inclusive, a componente sistemática e a componente aleatória (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008; LIRA, 2015).

A Figura 1.6 ilustra uma curva de erros, representando os erros apresentados pelo sistema de medição em função da sua indicação. Observe que essa curva é constituída por uma linha central, que representa os erros sistemáticos (Es), e uma faixa que

delimita as regiões nas quais são esperados os erros aleatórios (Re). Trata-se de uma curva simétrica de modo que o erro máximo será maior quanto maior for a componente sistemática e a componente aleatória.

Figura 1.6 | Curva de erro, destacando o erro sistemático (Es) e o erro aleatório (Re)



Fonte: Albertazzi e Sousa (2008, p. 112).

Uma vez assimilados os métodos de operação, estrutura física e características metrológicas dos sistemas de medição, vamos refletir a respeito das fontes de erro, que podem gerar dúvidas ao resultado de medição. A definição de fonte de erro, segundo Albertazzi e Sousa (2008), refere-se ao fator que, agindo sobre o processo de medição, origina erros de medição. A natureza da fonte de erro pode ser interna, relacionada aos fatores internos ao sistema de medição (erros de geometria nos sistemas mecânicos, por exemplo), ou externa, relacionada aos fatores externos que independem do sistema de medição (condições ambientais inadequadas).

Neste ponto, vamos focar nosso estudo nas fontes externas de erro, especificamente erros advindos da influência da temperatura, uma vez que há peculiaridades no tratamento desse erro. Quando pensamos no sistema de medição e na peça a ser medida, sabemos que cada um desses itens foi projetado para uso em determinadas condições ambientais, além de que, tanto o instrumento quanto a peça são constituídos por um tipo de material que, por sua vez, é caracterizado por um determinado coeficiente de dilatação térmica (α). Assim, é intuitivo pensar que, se houver um aumento ou uma redução na temperatura, quando comparada à temperatura de referência para medição (em metrologia, convencionou-se 20

graus Celsius) (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008), então irá ocorrer uma dilatação ou uma contração do instrumento e/ou peça, sendo que cada uma dessas duas partes irá ter sua dimensão linear alterada conforme a Equação 8.

Note que a Equação 8 descreve o caso mais comum de influência da temperatura, no qual tem-se uma peça e um instrumento de medição feitos de materiais diferentes, porém ambos estão sob uma mesma temperatura de medição (temperatura na qual a medição ocorre, em kelvin) que é diferente da temperatura para a qual a peça e o instrumento foram projetados (temperatura de referência, em kelvin)

$$\text{Correção} = (\alpha_{\text{sistema}} - \alpha_{\text{peça}}) \cdot (T_{\text{medição}} - T_{\text{referência}}) \cdot (\text{Indicação}) \quad (\text{Equação 1.8})$$

Pela Eq. 8, percebe-se que é necessário conhecer os valores dos coeficientes de dilatação térmica de ambos os materiais e a temperatura em que a medição está sendo efetuada a fim de prever o erro (dado pelo parâmetro Correção) embutido no sistema de medição. Vale destacar que, conforme a própria equação indica, a influência da temperatura é um tipo de erro sistemático, que pode ser previsto e corrigido (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008).



Exemplificando

Imagine que o raio de um eixo de alumínio foi medido por um micrômetro de aço em um ambiente com temperatura de 35° C, obtendo-se a indicação de 21,427 mm. Assim, qual efeito da temperatura? Para pensar neste problema, devemos conhecer o coeficiente de dilatação da peça (α do alumínio igual a $23,0 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$) e do instrumento (α do aço igual a $11,5 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$). Temos que a temperatura de medição, em kelvin, será de $273 + 35 = 308 \text{ K}$ e que a temperatura de referência, também em kelvin, é de $273 + 20 = 293 \text{ K}$.

Assim, pela Equação 8, temos que:

$$\text{Correção} = (\alpha_{\text{sistema}} - \alpha_{\text{peça}}) \cdot (T_{\text{medição}} - T_{\text{referência}}) \cdot (\text{Indicação})$$

$$\text{Correção} = (11,5 \cdot 10^{-6} - 23,0 \cdot 10^{-6}) \cdot (305 - 293) \cdot (21,427)$$

$$\text{Correção} = -0,002957 \text{ mm}$$

Logo, devemos aplicar uma correção de, aproximadamente, -0,003 mm para corrigir o erro da influência da temperatura.

Sem medo de errar

Lembre-se de que você foi contratado como consultor de uma multinacional que atua especificamente na área de metrologia e instalou sua filial recentemente no Brasil. Como consultor, uma vez executados os testes nos instrumentos ou sistemas de medição, você deve analisar as características metrológicas destes a fim de conhecer melhor os dispositivos e comprovar se atende às necessidades da empresa. Logo, sua demanda é, de acordo com a solicitação do gerente técnico, fazer uma apresentação, para a equipe técnica, sobre as principais características metrológicas que devem ser analisadas para a escolha de um instrumento de medição.

Você deve começar a sua apresentação explicando o conceito de características metrológicas. Assim, exponha que, para qualificar um sistema de medição, quanto ao seu comportamento e desempenho, são utilizados parâmetros que podem ser divididos quanto à faixa de utilização, indicação, relação entre estímulo e resposta, e erros de medição. Então, a fim de facilitar a compreensão, apresente a explicação de cada característica metrológica em formato de tabela, conforme Tabela 1.4.

Tabela 1.4 | Características metrológicas dos sistemas de medição

Definição da característica metrológica	Característica metrológica
Valor absoluto do maior valor de erro de medição que pode ser cometido pelo sistema.	Erro máximo
Faixa ativa selecionada pelo usuário, no instrumento de medição.	Faixa nominal
Menor diferença entre indicações que pode ser significativamente percebida.	Resolução
Altura do degrau correspondente ao incremento, em um instrumento digital.	Incremento digital
Faixa dentro da qual é esperado o erro aleatório, em medições repetidas realizadas em condições variadas.	Reprodutibilidade
Faixa de valores do mensurando para a qual o sistema de medição foi desenhado para operar, sendo estabelecida pelo fabricante.	Faixa de medição
Intervalo de tempo entre o instante em que um estímulo é realizado e o instante em que a resposta atinge e permanece dentro de limites especificados em torno do seu valor final estável.	Tempo de resposta

Exprime a intensidade com que os erros aleatórios interferem no resultado de medição.	Repetitividade
Intervalo compreendido entre o menor e o maior valor que pode ser indicado.	Faixa de indicação
Razão entre a variação da resposta em função da variação do estímulo.	Sensibilidade

Fonte: elaborada pela autora.

Agora que você assimilou esse conteúdo e estruturou suas ideias, como você construiria sua apresentação? Poderia sugerir algum outro fator relevante e que não foi contemplado?

Você atendeu às demandas do presidente, do vice-presidente e do gerente técnico, e todos se preparam com segurança para o início das atividades da filial.

Avançando na prática

Influência da temperatura no processo de medição

Descrição da situação-problema

Você foi contratado como técnico em metrologia em uma indústria automotiva. Na sua primeira semana de trabalho, o responsável pelo departamento de testes lhe apresentou um cilindro de alumínio cujo diâmetro foi medido em um dia muito frio, por um paquímetro de aço, em um laboratório onde as condições não eram controladas, de modo que a temperatura na qual a medição foi realizada era de 5° C. Como a indicação obtida para o diâmetro (20,112 mm) divergiu daquela esperada pelo responsável do departamento, então ele lhe solicitou que compensasse o erro da temperatura a fim de verificar a indicação corrigida e apresentasse um relatório com os dados obtidos. Logo, como você poderia verificar se, de fato, a divergência nas indicações ocorreu em função da influência da temperatura?

Resolução da situação-problema

Inicialmente, temos que entender em quais condições foram realizadas as medições. Posteriormente, temos que saber o coeficiente de dilatação da peça e do sistema a fim de analisar

como cada item teve sua dimensão alterada, conforme segue:

- Temperatura do sistema de medição = temperatura da peça a ser medida = $5\text{ }^{\circ}\text{C} = 273 + 5 = 278\text{ K}$

- Temperatura de referência a ser adotada = $20\text{ }^{\circ}\text{C} = 273 + 20 = 293\text{ K}$

- Material do sistema de medição é diferente do material da peça. Assim, deve ser aplicada uma correção uma vez que, por ter coeficientes de dilatação diferente, cada item irá variar de uma forma. Lembre-se de que os coeficientes são tabelados – Tabela de Coeficientes de Dilatação Linear.

- Decréscimo de temperatura \rightarrow variação negativa no comprimento (contração térmica)

(I) Cálculo da correção do erro da influência da temperatura:

$$\text{Correção} = (\alpha_{\text{sistema}} - \alpha_{\text{peça}}) \cdot (T_{\text{medição}} - T_{\text{referência}}) \cdot (\text{Indicação})$$

$$\text{Correção} = (11,5 \cdot 10^{-6} - 23,0 \cdot 10^{-6}) \cdot (278 - 293) \cdot (20,112)$$

$$\text{Correção} = 0,003\text{ mm}$$

(II) Cálculo da indicação corrigida:

$$I_{\text{corrigida}} = I + C$$

$$I_{\text{corrigida}} = 20,112 + 0,003 = 20,115\text{mm}$$

Logo, compensando a influência da temperatura, a indicação seria de 20,115 mm. Neste caso, as condições ambientais referem-se a um erro sistemático, uma vez que pode ser previsto e compensado (corrigido).

Faça valer a pena

1. A fim de melhor se compreender os sistemas de medição, um dos primeiros estudos deve ser pautado na compreensão do método de medição por meio do qual o sistema opera.

Assinale a alternativa que apresenta três métodos básicos de medição:

- a) Comparação, indicação e deflexão.
- b) Comparação, padrão e indicação.
- c) Padrão, deflexão e diferencial.
- d) Diferencial, indicação e comparação.
- e) Diferencial, indicação e deflexão.

2. Para qualificar um sistema de medição, quanto ao seu comportamento e desempenho, são utilizados diferentes parâmetros, conceituando-se as características metrológicas. Dessa forma, considere as sentenças de I a IV:

I. As características metrológicas podem ser divididas em quatro principais âmbitos: faixa de utilização, indicação, relação entre estímulo e resposta e erros de medição.

II. A faixa de medição (FM) vincula-se com a faixa de valores para a qual o sistema de medição foi desenhado para operar, sendo estabelecida pelo fabricante.

III. Nos instrumentos digitais, a resolução recebe a denominação de incremento digital, mas mantém o conceito de ser a diferença mínima significativa entre as indicações.

IV. No que se refere à relação estímulo/resposta, destacam-se as características metrológicas sensibilidade e tempo de resposta.

Assinale a alternativa correta:

- a) Somente as afirmações I e II são corretas.
- b) As afirmações I, II, III e IV são corretas.
- c) Somente a afirmação IV é correta.
- d) Somente as afirmações II e a III são corretas.
- e) Somente a afirmação I é correta.

3. É de fundamental importância estudar as fontes de erro, tanto internas quanto externas, de modo a entender os diferentes fatores que podem influenciar o resultado de medição. Assim, considere as sentenças de I a III, assinalando V para verdadeiro e F para falso:

I. A definição de fonte de erro refere-se ao fator que, agindo sobre o processo de medição, origina erros de medição.

II. Se a natureza da fonte for interna, então certamente os erros estarão vinculados a fatores que independem do sistema de medição.

III. Um exemplo clássico de fonte de erro externa é a influência da temperatura.

Assinale a alternativa com a sequência correta:

- a) V, V, V.
- b) F, V, F.
- c) V, V, F.
- d) F, F, F.
- e) V, F, V.

Referências

ALBERTAZZI, Armando G. J; SOUSA, André Roberto de. **Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial**. 1. ed. São Paulo: Editora Manole, 2008.

BIPM. Bureau International des Poids et Mesures. **The role and objectives of the BIPM**. Paris, 2017. Disponível em: <<http://www.bipm.org/en/about-us/>>. Acesso em: 13 fev. 2017.

DIAS, José Luciano de Mattos. **Medida, normalização e qualidade**: aspectos da história da metrologia no Brasil. Rio de Janeiro: Ilustrações, 1998.

HOWARTH, Preben; REDGRAVE, Fiona. **Metrology – in short**. 3. ed. Germany: EURAMET, 2008.

INMETRO. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. **Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia**. 2. ed. Brasília: SENAI/DN, 2000.

_____. **Guia para a Expressão da Incerteza de Medição**. Terceira edição brasileira em língua portuguesa – Rio de Janeiro: ABNT, INMETRO, 2003.

_____. V872 **Vocabulário Internacional de Metrologia**: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012). Rio de Janeiro: INMETRO, 2012

_____. **O que é o INMETRO**. Brasília, 2012.

IPEM. Instituto de Pesos e Medidas do Estado de São Paulo. Múltiplos e Submúltiplos das Unidades SI. IPEM-SP, São Paulo, 2013.

LIRA, Francisco Adval de, **Metrologia na Indústria**. 3. ed. São Paulo: Erica, 2015.

MILOJEVIC, Aleksandar. Some remarks on the development of metrology. **Nuclear Instruments and Methods**. v. 112, p. 1-3, 1973.

NEWELL, David B. A more fundamental International System of Units. **Phys. Today**, v. 67, p. 35-41, 2014.

Medição direta e medição indireta

Convite ao estudo

Caro aluno, nesta unidade iniciaremos o estudo das medições diretas e medições indiretas na metrologia, permitindo que você compreenda como usar as informações disponíveis sobre o processo de medição e escrever corretamente o resultado da medição.

Provavelmente, você já mediu algum objeto de seu interesse e atribuiu uma unidade de medida àquele resultado. Às vezes, você pode ter obtido apenas o valor de uma dimensão (como o comprimento, por exemplo) e ter ficado satisfeito com isso; outras vezes, talvez teve que obter mais de uma dimensão e, a partir destas, calcular a grandeza (volume, por exemplo) que realmente queria. De uma forma mais prática, considere que você queira saber a área de uma chapa retangular de ferro; certamente será necessário obter, inicialmente, a medida da base e a medida da altura da chapa, certo? Posteriormente, a partir das dimensões obtidas, é possível calcular a área do objeto.

Contudo, vimos na Unidade 1 que cada fator do processo de medição, como o operador e o sistema de medição, apresenta-se como uma fonte de incerteza, de modo que, no caso exemplificado, a medida da base e da altura terão um erro vinculado a elas e, conseqüentemente, a área calculada também. Esse caso nos traz um ponto de questionamento e reflexão sobre como consideramos as diferentes fontes de incerteza nas medições diretas e indiretas. Com base nos fundamentos da metrologia, ao final desta unidade, você conseguirá refletir claramente sobre esses pontos e, ainda, poderá trazer novas perspectivas a essa avaliação.

Suponha que você foi contratado para o departamento de controle de qualidade de uma grande empresa de fabricação de eletrodomésticos. Na sua segunda semana de trabalho, foi alocado na equipe que inspeciona as geladeiras da linha branca, sendo que a primeira tarefa que lhe é dada refere-se à avaliação da massa dos refrigeradores. Qual seria o resultado de medição da massa de um refrigerador após diferentes medições, considerando a correção do erro sistemático vinculado ao sistema de medição e o predomínio de uma fonte de incerteza?

Para ser mais assertivo, você reúne a equipe e decide avaliar novamente a massa da geladeira, mas considerando de fato que há a presença de outras fontes de incerteza que de alguma forma se combinam e influenciam o resultado de medição. Qual seria sua proposta aos seus colegas de equipe para que o novo resultado de medição fosse obtido, considerando que há outras fontes de incerteza no processo de medição?

Após a avaliação da massa dos refrigeradores, seu gestor o remaneja para o setor de chuveiro elétrico, solicitando que avalie o funcionamento do equipamento por meio da análise da corrente elétrica que passa no resistor. Considerando o método de medição indireta, uma vez que você sabe a resistência elétrica e a tensão, qual seria o resultado de medição da corrente elétrica com sua respectiva incerteza?

Essas questões poderão ser respondidas no decorrer desta unidade, que irá capacitá-lo a entender os fundamentos de medição direta de um mensurando variável e invariável na presença de uma única fonte de incerteza, na Seção 2.1; medição direta considerando uma combinação de fontes de incertezas, na Seção 2.2; e medição indireta na Seção 2.3.

Está preparado para este desafio? Vamos lá!

Seção 2.1

Medição direta e domínio de uma fonte de incerteza

Diálogo aberto

Nesta seção, inicialmente, você vai estudar os conceitos gerais e fundamentos da medição direta e, nesse âmbito, compreenderá a diferença de tratamento do processo de medição para o mensurando invariável e para o mensurando variável, considerando a presença de uma fonte de incerteza dominante. Vale notar que a metrologia tem vários aspectos técnicos que devem ser compreendidos a fim de aplicar os conceitos de forma correta na sua vida profissional. Desta forma, a fim de assegurar a escrita correta do resultado de medição, vamos rever o conceito de algarismo significativo e arredondamento, utilizando esses pontos para introduzir a regra da incerteza de medição.

Como vimos no *Convite ao Estudo*, suponha que você foi contratado para o departamento de controle de qualidade de uma grande empresa de fabricação de eletrodomésticos. Na sua segunda semana de trabalho, foi alocado na equipe que inspeciona as geladeiras da linha branca, sendo que a primeira tarefa que lhe é dada refere-se à avaliação da massa dos refrigeradores. Assim, seu gestor, no aguardo de um parecer, lhe entrega um relatório técnico que contém uma planilha com 10 medições do respectivo produto, executadas pela equipe técnica, e que apresenta a correção a ser aplicada em relação à componente sistemática de erro, que é igual a - 4,8 kg (lembre-se de que na Unidade 1 aprendemos a calcular o erro sistemático).

Logo, qual seria o resultado de medição da massa de um refrigerador após as diferentes medições, considerando a correção do erro sistemático vinculado ao sistema de medição e o predomínio de uma fonte de incerteza? Reflita sobre essa indagação e apresente seu parecer à chefia.

Tabela 2.1 | Indicação das medições executadas pela equipe técnica

Número da medição	Indicação	Número da medição	Indicação
1	65 kg	6	68 kg
2	75 kg	7	65 kf
3	69 kg	8	71 kg
4	63 kg	9	75 kg
5	73 kg	10	66 kg

Fonte: elaborado pelo autor.

Fique atento a todos os tópicos que serão abordados nesta seção e reflita sobre como você começaria o seu parecer, a fim de expor o resultado de medição para os refrigeradores de linha branca, partindo do relatório técnico que lhe foi entregue.

A partir de agora, mãos à obra e se empenhe com dedicação e com entusiasmo, para aproveitar esse conteúdo e ter sucesso em sua carreira.

Tenha um excelente estudo!

Não pode faltar

Vamos iniciar os estudos conhecendo o conceito de medição direta. Considere um caso em que se queira obter a área de uma chapa retangular de ferro utilizando uma trena. Inicialmente, é necessário obter a medida da base e a medida da altura da chapa, certo? Posteriormente, a partir das dimensões obtidas, será possível calcular a área do objeto. Desta forma, podemos entender a que a medição das dimensões do comprimento (base do retângulo) e da altura seriam obtidas por meio da medição direta. Assim, define-se medição direta como aquela em que o sistema de medição já indica naturalmente o valor do mensurando, por exemplo, a medição do raio de um eixo com um paquímetro, a medição da tensão elétrica de uma pilha com um voltímetro, entre outros.

Ao se tratar de medição direta, devemos considerar a variabilidade do mensurando, isto é, deve-se analisar a natureza do mensurando, de modo que este pode ser variável ou invariável. Um mensurando é dito invariável se seu valor permanecer constante durante todo o processo de medição. Assim, no caso da chapa de

ferro, podemos assumir que o comprimento e a altura do objeto não serão alterados durante todo o período de medição, tratando-se de mensurandos invariáveis. Diferentemente, quando o valor de um mensurando varia de acordo com a posição, o tempo ou outros fatores, ele será considerado variável (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008).

A temperatura no interior de um refrigerador é um típico exemplo de mensurando varável, uma vez que, normalmente, a temperatura na parte inferior do equipamento alcança entre $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, enquanto que na parte superior tem-se o predomínio da faixa de $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, devido ao processo de convecção. Assim, o ar frio é mais denso que o ar quente, de modo que o primeiro se desloca em curva descendente e, o ar quente, de forma ascendente. Conseqüentemente, o movimento faz com que a corrente quente se resfrie e fique mais densa, formando um movimento contínuo de correntes de ar dentro do refrigerador.



Assimile

Vale ressaltar que, a rigor, todo o mensurando pode ser considerado variável. Contudo, em alguns casos, sua variação não é passível de ser identificada pelo sistema de medição, ou seja, o mensurando sofre variações ínfimas e estas são inferiores à resolução do instrumento de medição.

Segundo Albertazzi e Sousa (2008), para saber se um mensurando é variável ou invariável, deve-se considerar não apenas o mensurando em si, mas também a relação de suas características com as do sistema de medição.

Para se estimar corretamente o resultado de medição, como vimos na Unidade 1, é necessário considerar todas as fontes de incerteza atreladas ao processo. Muitas vezes, temos diferentes fontes de incerteza que geram erros de diversas naturezas, como pode ocorrer falha na leitura pelo operador não treinado ou erro do operador ao posicionar a peça a ser medida no instrumento; pode haver também imperfeições geométricas nos sistemas de medição ou mesmo o uso de um dispositivo não calibrado; ainda, uma medição executada sob elevada temperatura pode incorrer na dilatação da peça e/ou do instrumento; entre outros.

Nesta seção, concentraremos nosso estudo em medições diretas executadas sob o predomínio de uma única fonte de incerteza, ou seja, há casos em que é possível estimar a existência de apenas uma incerteza do processo de medição como se apenas uma fonte de incerteza existisse.

Entende-se como fonte de incerteza dominante quando seus efeitos forem sensivelmente maiores que os efeitos das demais. Muitas vezes, a caracterização do predomínio de uma única fonte de incerteza ocorre nos casos de alguma particularidade no processo de medição ou quando tem-se uma dificuldade em quantificar separadamente a ação simultânea e conjunta de várias fontes de incerteza (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008).



Refleta

Você poderia pensar em um exemplo prático no qual houvesse claramente uma fonte de incerteza dominante?

O uso de um instrumento com o ponteiro torto, em um processo de medição, poderia sugerir indícios de que há uma fonte de incerteza dominante?

Como vimos na Unidade 1, ao se pensar em fonte de incerteza, devemos considerar as componentes sistemáticas (que podem ou não ser corrigidas) e aleatórias do erro, que podem ser obtidas, respectivamente, pela Tendência/Correção e pela Repetitividade. Assim, para analisar as possibilidades de medições na metrologia, considerando as medições diretas e uma fonte de incerteza dominante, vamos estudar cinco casos principais a partir de algumas suposições, conforme Albertazzi e Sousa (2008):

Caso I → mensurando invariável; apenas uma medição realizada ($n = 1$); corrigindo erro sistemático.

Caso II → mensurando invariável; mais de uma medição realizada ($n > 1$); corrigindo erro sistemático.

Caso III → mensurando invariável; mais de uma medição realizada ($n > 1$); não corrigindo erro sistemático.

Caso IV → mensurando variável; mais de uma medição realizada ($n > 1$); corrigindo erro sistemático.

Caso V → mensurando variável; mais de uma medição realizada ($n > 1$); não corrigindo erro sistemático.

Assim, no Caso I, temos a execução de apenas uma medição, com a intenção de corrigir o erro sistemático por meio a aplicação do parâmetro Correção (C). A correção, quando o ensaio é realizado em condições similares àquelas da calibração, pode ser extraída do próprio relatório de calibração. Desta forma, o primeiro passo é corrigir o erro sistemático (Equação 2.1), no entanto, deve ser considerado que ainda há erros aleatórios (Re) que influenciam o resultado de medição (Equação 2.2). Perceba na Equação 2, que o resultado base coincide com a indicação obtida, uma vez que apenas uma medição foi executada. Lembre-se ainda que, quando as condições de medição forem diferentes, a reprodutibilidade deve ser empregada no lugar da repetitividade (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008; LIRA, 2015).

$$RB = I + C \quad (\text{Equação 2.1})$$

RB = resultado base; I = indicação obtida no sistema de medição; C = correção do erro sistemático.

$$RM = I + C \pm Re \quad (\text{Equação 2.2})$$

RM = faixa na qual se encontra o resultado de medição; Re = repetitividade.

O Caso II é análogo ao primeiro caso, mas emprega-se $n > 1$. A importância de se realizar mais de uma medição deve-se ao fato de que, embora o erro aleatório não possa ser compensado, o efeito dessa componente pode ser minimizado conforme aumenta-se o número de medições repetidas do mensurando, adotando-se o valor médio da indicação. Desta forma, o erro aleatório é reduzido na proporção inversa da raiz de n , conforme mostra a Equação 2.3.

$$RM = I_M + C \pm \frac{Re}{\sqrt{n}} \quad (\text{Equação 2.3})$$

I_M = média das indicações obtida no sistema de medição;
 n = número de medições executadas; C = correção do erro sistemático.



Exemplificando

A fim de melhor compreender a medição direta de um mensurando invariável, a partir de mais de uma medição, e corrigindo a componente sistemática do erro, vamos retomar o exemplo da chapa de ferro.

Considere novamente a chapa retangular de ferro para obter a dimensão de seu comprimento, utilizando uma trena e supondo o parâmetro de correção do instrumento de medição igual a $-1,01$ cm.

Foram executadas 20 medições, por um mesmo operador e sob as mesmas condições de medição, obtendo-se uma indicação média de $2,50$ cm e um desvio padrão igual a $0,55$ cm, ou seja, $u = 0,55$ cm. Como foram feitas 20 medições, tem-se $v = 20 - 1 = 19$, de modo que o coeficiente t de *Student*, pela Tabela 1.1., é igual a $2,140$.

Assim, para estimar a intensidade da componente aleatória do erro de medição, deve-se obter a Repetitividade.

$$Re = \pm (t \cdot u)$$

$$Re = \pm (2,140 \cdot 0,55)$$

$$Re = \pm 1,18\text{cm}$$

Logo, a estimativa do erro aleatório é de $\pm 1,18$ cm. Talvez, este erro esteja associado à falta de treinamento do operador, por exemplo.

Para obter o resultado de medição, devemos aplicar a equação

$$RM = I_M + C \pm \frac{Re}{\sqrt{n}}, \text{ considerando } C = -1,01 \text{ cm; } Re = \pm 1,18 \text{ cm, } n = 20$$

e $I_M = 2,50$ cm.

Logo, tem-se como resultado de medição do comprimento

$$RM = 2,50 - 1,01 \pm \frac{1,18}{\sqrt{20}}$$

$$RM = (1,49 \pm 0,26) \text{ cm}$$

Pensando em mensurando invariável, mais de uma medição realizada ($n > 1$) e sem o intento de corrigir o erro sistemático, tem-se o Caso III. Quando se tem conhecimento apenas do erro máximo do sistema de medição, o erro sistemático não é corrigido e a faixa do erro máximo corresponde à região em que as possíveis indicações são esperadas, conforme mostra a Equação 2.4.

$$RM = I_M \pm E_{\text{máx}} \quad (\text{Equação 2.4})$$

I_M = média das indicações obtida no sistema de medição;
 $E_{\text{máx}}$ = erro máximo do sistema de medição (advindo de especificações do fabricante e de relatórios de calibração).

Antes de abordarmos os Casos IV e V, devemos compreender que, por se tratar de um mensurando variável, este deve sempre ser medido muitas vezes, em locais distintos e em momentos diferentes, para que eleve a probabilidade de que toda a sua faixa de variação seja varrida. Assim, para se estimar o resultado-base, necessita-se partir da média de um grande número de medições.

No Caso IV, tem-se um mensurando variável e pretende-se corrigir o erro sistemático, de modo que, inicialmente, é necessário compensar a componente sistemática do erro a partir da média das indicações, conforme mostra a Equação 2.5.

$$RB = I_M + C \quad (\text{Equação 2.5})$$

I_M = média das indicações obtida no sistema de medição;
 C = correção do erro sistemático.

A incerteza de medição, no Caso IV, é calculada a partir do produto entre a incerteza-padrão e o respectivo coeficiente *t* de *Student*, que corresponde às variações resultantes da ação combinada das variações do mensurando e o erro aleatório do processo de medição, conforme apresenta a Equação 2.6.

$$RM = I_M + C \pm (t \cdot u) \quad (\text{Equação 2.6})$$

RM = faixa na qual se encontra o resultado de medição; I_M = média das indicações obtida no sistema de medição; C = correção do erro sistemático; *t* = coeficiente de *Student* para *n* – 1 graus de liberdade; *u* = incerteza-padrão calculada a partir das “*n*” indicações disponíveis.

Perceba que, pela Eq. 2.6, não empregamos *Re*, mas o produto (***t* · *u***), uma vez que, além do erro aleatório (que seria representado pela repetitividade *Re*), também há variação do mensurando que está embutida no valor da incerteza padrão (*u*) das diferentes medições.

Por fim, o Caso V é análogo ao IV, mas não se pretende corrigir o erro sistemático, de forma que o resultado base é a própria média das indicações. A incerteza de medição, neste caso, engloba as variações do mensurando e os erros do sistema ou processo de medição (incluindo a componente aleatória e componente sistemática), conforme expresso na Equação 2.7.

$$RM = I_M \pm (E_{m\acute{a}x} + t \cdot u) \quad (\text{Equação 2.7})$$

RM = faixa na qual se encontra o resultado de medição; I_M = média das indicações obtida no sistema de medição; *t* = coeficiente de *Student* para *n* – 1 graus de liberdade; *u* = incerteza-padrão calculada a partir das “*n*” indicações disponíveis; $E_{m\acute{a}x}$ = erro máximo do sistema de medição.



Pesquise mais

A fim de melhor compreender cada caso explorado para as medições diretas, englobando o mensurando variável e invariável, leia o capítulo 6 do livro a seguir:

ALBERTAZZI, Armando G. J.; SOUSA, André Roberto de. **Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial**. São Paulo: Editora Manole, 2008.

Este livro está disponível gratuitamente na sua Biblioteca Virtual!

Uma vez assimilado o conceito de medição direta, bem como as equações para a obtenção do resultado de medição em diferentes casos, torna-se válido estudar os fundamentos da escrita correta do resultado de medição, englobando o conceito de algarismo significativo e arredondamento e utilizando esses pontos para introduzir a regra da incerteza de medição.

No tocante aos algarismos significativos, na metrologia, muitas vezes o resultado de medição não é exato, mas não há necessidade de se manter um número com muitos dígitos, o que pode incorrer em dificuldades na leitura e compreensão do valor referido. Assim, é possível adotar uma forma mais racional de escrever o resultado da medição, por meio da garantia da regra da incerteza, que engloba o conceito de algarismo significativo e arredondamento.

Contam-se os algarismos significativos da esquerda para a direita, a partir do primeiro algarismo não nulo. Assim, por exemplo, o número 12 apresenta dois algarismos significativos, que podem ser 0,12 ou que 0,012. Contudo, o número 0,120 possui três algarismos significativos de modo análogo ao valor 0,0120, uma vez que a contagem inicia quando o primeiro algarismo diferente de zero é encontrado (LIRA, 2015).

Quanto ao arredondamento, a NBR 5891/1977 estabelece orientações apropriadas. Assim, quando o último algarismo que se quer verificar (denominado algarismo verificador) for inferior a cinco, então o algarismo anterior permanecerá sem modificação. Este é o caso do número 17,472, cujo arredondamento, para duas casas decimais, vai resultar em 17,47, dado o número 2 ser inferior a 5 (ABNT, 1977).

Diferentemente, quando o último algarismo que se quer verificar for superior a cinco, então o algarismo anterior será acrescido de uma unidade, como no número 17,476, cujo arredondamento

para duas casas decimais vai resultar em 17,48, dado o número 6 ser superior a 5.

Se o último algarismo que se quer verificar for igual a 5 e for seguido por, no mínimo, um algarismo diferente de zero, então o algarismo anterior ao verificador será acrescido de uma unidade. Como exemplo, cita-se o número 26,93715, que, considerando arredondamento para quatro casas decimais, resulta em 26,9372. Outro exemplo é 37,25004, que, arredondando para uma casa decimal, segue-se para 37,3 (ABNT, 1977).

Se o último algarismo que se quer verificar for igual a 5 seguidos de zero, então é necessário analisar o algarismo que antecede ao verificador 5. Se o algarismo antecessor for par, será conservado; se o algarismo antecessor for ímpar, aumenta-se uma unidade. Logo, o número 14,450, com arredondamento, resulta em 14,4, enquanto que o número 14,550, com arredondamento, resulta em 14,6.



Pesquise mais

Nesse tópico de algarismo significativo e arredondamento, como conceitos gerais, vale a pena você estudar, também, operações com algarismos significativos (soma, subtração, multiplicação e divisão), erro de arredondamento, manipulação de números e rejeição de números – Critério Chauvenet e Teste de Dixson. Para tanto, leia o capítulo 1 do livro a seguir:

LIRA, Francisco Adval de. **Metrologia na Indústria**. 3. ed. São Paulo: Erica, 2015.

Lembre-se de que este livro está presente na Biblioteca Virtual, facilitando a sua leitura!

Nesse contexto, tem-se a regra da incerteza, que é aplicada ao resultado de medição, em metrologia, a fim garantir um rigor técnico na escrita. De fato, segundo Silva (2003), a metrologia e a normalização contribuem para um compartilhamento técnico e científico entre as nações, constituindo-se em instrumentos de grande valia para a sociedade. Assim, em tal área, entende-se que não é necessário abranger mais que dois algarismos significativos

para descrever suficientemente bem a faixa correspondente à incerteza de medição. Além disso, não se faz válido representar no resultado-base algarismos à direita da posição do último algarismo significativo da incerteza de medição (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008; LIRA, 2015). Desta forma, tem-se duas regras para a escrita correta do resultado de medição:

Regra 1: o arredondamento da incerteza de medição, quando escrito no formato do resultado de medição, deve prever, no máximo, dois algarismos significativos, não importando quantas casas decimais resultem.

Regra 2: o arredondamento do resultado-base deve prever o mesmo número de casas decimais da incerteza da medição, não importando quantos algarismos significativos resultem.



Exemplificando

A fim de melhor compreender as regras da incerteza, em metrologia, suponha que temos um resultado base igual a 319,213 mm e uma incerteza de medição igual a $\pm 11,4$ mm.

Logo, considerando estes dois valores, temos **RM = (319,213 \pm 11,4) mm**.

De acordo com a Regra 1, a incerteza deve conter até 2 algarismos significativos. Assim, o número 11,4 possui 3 algarismos significativos e, arredondando-o para contemplar somente dois algarismos significativos, tem-se o valor da incerteza igual a 11 mm. Logo, poderíamos reescrever o resultado de medição como **RM = (319,213 \pm 11) mm**.

No entanto, pela Regra 2, o resultado base deve conter o mesmo número de casa decimal que a incerteza, independentemente do número de algarismos significativos.

Assim, a incerteza apresenta-se como um valor inteiro, sendo necessário, também, arredondar o resultado-base para um valor inteiro. Dessa forma, o arredondamento do resultado-base segue para 319 mm.

Logo, finalmente, a escrita correta do resultado de medição para o referido exemplo é **RM = (319 \pm 11) mm**.

Sem medo de errar

Lembre-se de que você foi contratado para o departamento de controle de qualidade de uma grande empresa de fabricação de eletrodomésticos e a primeira tarefa que lhe é dada refere-se à avaliação da massa dos refrigeradores da linha branca. Assim, seu gestor, no aguardo de um parecer, lhe entrega um relatório técnico que contém uma planilha com 10 medições do respectivo produto (Tabela 2.1) e que apresenta a correção a ser aplicada em relação à componente sistemática de erro.

Para saber qual seria o resultado de medição da massa de um refrigerador após as diferentes medições, considerando a correção do erro sistemático vinculado ao sistema de medição e o predomínio de uma fonte de incerteza, inicialmente, você deve entender a natureza do mensurando.

Logo, no seu parecer deve constar que se trata de uma medição direta, ou seja, o sistema de medição já indica naturalmente o valor do mensurando. Além disso, trata-se de um mensurando invariável, isto é, a massa do refrigerador permanece constante durante o período em que a medição é efetuada. Também, foram feitas 10 medições, de modo que $n > 1$, e deve-se aplicar a correção do erro sistemático, considerando $C = - 4,8$ kg.

Para esse caso, no seu parecer, você deve desenvolver a equação a seguir para obter o resultado da medição direta:

$$RM = I_M + C \pm \frac{Re}{\sqrt{n}}$$

(i) O primeiro passo é determinar a indicação média a partir das 10 medições executadas.

$$I_M = (65 + 75 + 69 + 63 + 73 + 68 + 65 + 71 + 75 + 66) / 10$$

$$I_M = 69 \text{ kg}$$

(ii) Para calcular a componente aleatória, obtém-se o desvio-padrão pela equação

$$u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - I_M)^2}{n-1}}$$
 e a Repetitividade pela equação $Re = \pm (t \cdot u)$.

Calcula-se o desvio padrão, obtendo o resultado de $u = 4,3$ kg.

Para $v = 10 - 1$ graus de liberdade, tem-se $t = 2,320$ (tabelado).

$$Re = \pm (2,320 \times 4,3) = \pm 9,98 \text{ kg}$$

A estimativa da componente aleatória do erro é 9,98 kg, significando que parte do erro não pode ser prevista e, possivelmente, deve estar vinculada à falta de treinamento do operador, oscilações não programadas na rede de energia etc.

(iii) Aplica-se a equação de medição direta, com $n > 1$ e aplicando a correção do erro sistemático $RM = I_M + C \pm \frac{Re}{\sqrt{n}}$, considerando

$C = -4,8$ kg; $Re = \pm 9,98$ kg, $n = 10$ e $I_M = 69$ kg, então:

$$RM = 69 - 4,8 \pm \frac{9,98}{\sqrt{10}} \quad RM = (64,2 \pm 3,2) \text{ kg}.$$

Assim, no seu parecer, finalmente você deve explicar que o resultado de medição, com base no relatório técnico que lhe foi entregue, é de **(64,2 ± 3,2) kg**, corrigindo o erro sistemático.

Perceba que esta representação do resultado de medição atende às duas regras da incerteza, não sendo necessária nenhuma adequação. Quais outros pontos você julgaria necessário abordar no seu parecer?

Avaliação da temperatura de câmaras frias industriais

Descrição da situação-problema

Considere que você foi contratado para o departamento de testes metrológicos de uma indústria fabricante de câmaras frias e que sua primeira tarefa seja a de caracterizar a temperatura no interior das câmaras, ou seja, você necessita obter o valor do resultado de medição da temperatura do equipamento. No dia do teste, a equipe de suporte posicionou quatro sensores em diferentes pontos dentro do dispositivo e, então, a câmara fria foi ligada, com a porta fechada. Após algum tempo, as temperaturas foram medidas 1 vez por minuto, em cada sensor, durante 4 h e 10 min.

Com o relatório técnico de medições em mãos, você observa que as indicações apresentaram média de 6,82 °C, com desvio padrão de 1,10 °C. Além disso, consta no relatório que os quatro sensores têm curva de erro similares, sendo a correção a ser aplicada de -0,80 °C. Com base nas informações técnicas coletadas pela equipe de suporte e contidas no relatório, como você faria para obter o resultado de medição da temperatura da câmara fria e expor essa informação em forma de parecer?

Resolução da situação-problema

Para atender à demanda e desenvolver seu parecer, inicialmente, você deve avaliar que a temperatura do refrigerador ou da câmara fria se classifica como um mensurando variável e daí a necessidade de posicionar quatro sensores em locais diferentes do equipamento.

No próprio relatório técnico já consta o valor da correção do erro sistemático, de modo a assumir que essa componente vai ser compensada no presente caso. Logo, a sua demanda pode ser caracterizada como mensurando variável e que se pode corrigir o erro sistemático, sendo este caso modelado pela seguinte equação: $RM = I_M + C \pm (t \cdot u)$

RM = faixa na qual se encontra o resultado de medição; I_M = média das indicações obtida no sistema de medição; C = correção do erro sistemático; t = coeficiente de *Student* para n – 1 graus de liberdade; u = incerteza-padrão.

Pelo relatório, tem-se que $I_M = 6,82 \text{ }^\circ\text{C}$; u = 1,10 $^\circ\text{C}$ e C = -0,80 $^\circ\text{C}$.

Para se obter o coeficiente t de *Student*, devemos fazer o cálculo de quantas medições (n) foram realizadas, considerando todos os sensores.

(I) Cálculo do valor de n:

1vez/min – durante 4h – em 4 sensores = **60 min × 4 h × 4 sensores**
= 960 medições

1vez/min – durante 10 min – em 4 sensores = **10 min × 4 sensores**
= 40 medições

Logo, no total, foram 1000 medições o que corresponde a um coeficiente t = 2,003.

(II) Cálculo do resultado de medição para mensurando variável, n > 1 e compensando erro sistemático:

$$RM = I_M + C \pm (t \cdot u).$$

$$RM = 6,82 - 0,80 \pm (2,003 \cdot 1,10)$$

$$RM = (6,0 \pm 2,2) \text{ }^\circ\text{C}$$

Lembre-se de que o resultado de medição deve obedecer às regras da incerteza. Logo, no parecer, deve constar que o resultado da medição da temperatura é de **(6,0 ± 2,2) $^\circ\text{C}$** . Agora, reflita sobre outros aspectos que você poderia explorar no seu parecer.

Faça valer a pena

1. Analise as afirmações e a relação proposta entre elas:

I. Em metrologia, entende-se que não é necessário abranger mais que dois algarismos significativos para descrever suficientemente bem a faixa correspondente à incerteza de medição. Logo, o arredondamento da incerteza de medição, quando escrita no formato do resultado de medição, deve prever, no máximo, dois algarismos significativos, não importando quantas casas decimais resultem.

PORQUE

II. O arredondamento do resultado-base deve prever o mesmo número de casas decimais da incerteza da medição, não importando quantos algarismos significativos resultem.

A respeito dessas afirmações, assinale a alternativa correta:

- a) As afirmativas I e II são verdadeiras, e a II é uma justificativa da I.
- b) A afirmativa I é verdadeira, mas a II é falsa.
- c) As afirmativas I e II são verdadeiras, e a II não é uma justificativa da I.
- d) A afirmativa I é falsa, mas a II é verdadeira.
- e) As afirmativas I e II são falsas.

2. Considerando o processo de medição e as fontes de incerteza, analise as afirmações a seguir:

I. Há casos em que é possível estimar a incerteza do processo de medição como se apenas uma fonte de incerteza existisse.

II. A caracterização do predomínio de uma única fonte de incerteza ocorre nos casos em que há alguma particularidade no processo de medição que destaca uma fonte de incerteza em relação às demais.

III. Outro caso de caracterização do predomínio de fonte de incerteza é quando tem-se uma dificuldade em quantificar separadamente a ação simultânea e conjunta de várias fontes de incerteza.

Avaliando as afirmações, assinale a alternativa que apresenta a ordem correta de verdadeiro (V) e falso (F):

- a) V, V, V.
- b) F, V, V.

c) V, F, V.

d) V, F, F.

e) F, F, V.

3. Em um teste metrológico de uma peça cilíndrica de um automóvel, é utilizada uma balança para medir a massa do referido objeto. O operador executa 10 medições, obtendo uma indicação média de 1009,0 g. De acordo com o relatório de calibração do instrumento de medição, tem-se um erro máximo de 15,0 g.

Considerando esse teste metrológico, qual é o valor do resultado de medição da peça cilíndrica?

a) $RM = (1009 - 15) \text{ g}$

b) $RM = (1009 + 15) \text{ g}$

c) $RM = 1024 \text{ g}$

d) $RM = (1009 \pm 15) \text{ g}$

e) $RM = 994 \text{ g}$

Seção 2.2

Medição direta e a combinação de fontes de incerteza

Diálogo aberto

Para se estimar corretamente o resultado de medição, é necessário considerar todas as fontes de incerteza atreladas ao processo. Muitas vezes, temos diferentes fontes de incerteza que geram erros de diversas naturezas, como pode ocorrer falha na leitura pelo operador não treinado ou erro do operador ao posicionar a peça a ser medida no instrumento; pode haver também imperfeições geométricas nos sistemas de medição ou mesmo o uso de um dispositivo não calibrado; ou, ainda, uma medição executada sob elevada temperatura pode incorrer na dilatação da peça e/ou do instrumento; entre outros.

Nesta seção, concentraremos nosso estudo em medições diretas executadas sob a influência de mais de uma fonte de incerteza, sendo esta a situação que comumente ocorre na prática. Ademais, entraremos no conceito de incerteza do tipo A e do tipo B a fim de aprofundar seu conhecimento sobre a incerteza em metrologia, correlacionando com fundamentos de estatística.

Logo, vamos retomar o contexto no qual você foi contratado para o departamento de controle de qualidade de uma grande empresa de fabricação de eletrodomésticos. Sua primeira demanda foi inspecionar as geladeiras da linha branca, avaliando a massa dos refrigeradores sob a consideração de que há o predomínio de uma fonte de incerteza. Contudo, para ser mais assertivo, a pedido de seu gestor, você decide refletir a respeito da consideração da presença de outras fontes de incerteza que de alguma forma se combinam e influenciam o processo de medição.

A fim de melhorar a rotina do departamento de qualidade, especificamente no tocante a ensaios metroológicos, como você proporia um conjunto de ações, em termos gerais, aos seus colegas de equipe, com o objetivo de desenvolver testes e obter o resultado de medição sob a consideração de que há outras fontes de incerteza no processo de medição?

Refleta sobre essa indagação para entregar um protocolo para o seu gestor, demonstrando como considerar, de forma genérica, a combinação de fontes de incerteza na medição direta.

Vamos começar? Ótimo trabalho!

Não pode faltar

Na seção anterior concentramos nosso estudo em medições diretas executadas sob o predomínio de uma única fonte de incerteza, ou seja, há casos específicos em que é possível estimar a incerteza do processo de medição como se apenas uma fonte de incerteza existisse.

Na prática, sabemos que, comumente, diferentes fontes de incerteza (como o operador, a técnica de medição, a temperatura de medição, o instrumento ou sistema de medição, o objeto a ser medido, entre outros aspectos) agem sobre o processo de medição e podem gerar equívocos ao resultado. Sob essa perspectiva, vamos aprofundar nossos conhecimentos sobre medição direta com enfoque na combinação de incertezas de medição, de modo que cada fonte de incerteza influencie significativamente no processo de medição, sendo estimada separadamente.

O primeiro passo quando se considera a ação de diferentes fontes de incerteza é fazer um levantamento de todas que agem sobre o processo, seja em menor ou seja em maior magnitude. Vamos retomar o exemplo da chapa de ferro, cujo comprimento e altura serão obtidos por meio de uma régua graduada de aço. Podemos vislumbrar potenciais fontes de incerteza que agem nesse processo de medição, são eles:

- Operador: falta de treinamento para manusear a régua, incorrendo na má-disposição da peça no instrumento, erro de leitura, entre outros.
- Procedimento de medição: número insuficiente de repetições, intervalo de tempo não padronizado entre as repetições, aplicação equivocada da técnica de medição, escolha de uma técnica de medição não apropriada para o caso específico, entre outros.

- Instrumento de medição: instrumento não calibrado, gradações do instrumento pouco legíveis, entre outros.
- Mensurando: má-definição do mensurando, isto é, da grandeza que se quer medir, entre outros.
- Condições de medição: desconsideração das condições de medição, como temperatura e umidade, no resultado metrológico, incorrendo em dilatação ou contração do instrumento ou do objeto a ser medido devido à influência da temperatura, por exemplo.

Dado que a incerteza de medição é o parâmetro quantitativo que expressa a confiabilidade do resultado de uma medição, abrangendo muitos componentes, incluindo aquele proveniente de efeitos sistemáticos, cada uma das fontes de incerteza identificadas deve ser analisada quanto à contribuição que possa conferir aos erros sistemáticos (LIMA JUNIOR; SILVEIRA, 2011). Assim, para estimar os efeitos sistemáticos associados à incerteza, deve-se avaliar o valor da correção a ser aplicada, individualmente, para cada fonte de incerteza, resultando na correção combinada conforme mostra a Equação 2.8.

$$C_c = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_i \quad (\text{Equação 2.8})$$

C_c = correção combinada, que deve ser expressa na mesma unidade que o mensurando; e = correção da i -ésima fonte de incerteza.



Assimile

Uma vez que a incerteza é influenciada também por efeitos sistemáticos, temos que cada fonte de incerteza deve ter analisada seu erro sistemático, gerando o valor da correção combinada.

Segundo Albertazzi e Sousa (2008), a correção combinada pode ser entendida como o valor da correção a ser aplicada a um processo de medição. Pensando em uma modelagem matemática, a correção de cada fonte de incerteza contribui para a correção combinada, ou seja, a soma individual de cada correção vai resultar na correção combinada que, por sua vez, reflete os efeitos sistemáticos da incerteza de medição.

De forma análoga, deve ser valorado o efeito aleatório associado a cada fonte de incerteza, resultando na incerteza padrão combinada (u_c). Tem-se que a incerteza-padrão associada a uma fonte de incerteza pode ser obtida por procedimentos estatísticos ou por procedimentos não estatísticos.

No primeiro caso, medições repetidas do mensurando são executadas e, então, estima-se a incerteza padrão (Equação 9) por meio da análise estatística dos resultados, sendo denominada avaliação do tipo A da incerteza de medição, ou incerteza do tipo A (INMETRO, 2012).

$$u(l) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (l_k - l_M)^2}{n-1}} \quad (\text{Equação 2.9})$$

$u(l)$ = incerteza-padrão das indicações; l_k = k-ésima indicação; l_M = indicação média; n = número de indicações repetidas.

Observa-se que a equação da incerteza padrão das indicações já foi apresentada, genericamente, na Unidade 1, a fim de se obter o erro aleatório. De fato, o cálculo do desvio padrão da média de uma série de medições é um típico exemplo da incerteza do tipo A (LIMA JUNIOR; SILVEIRA, 2011). Vale lembrar que o número de graus de liberdade empregado para o cálculo da incerteza padrão é igual ao número de indicações (n) menos 1, conforme mostrado no denominador ($n-1$) da Equação 2.9.

Deve-se atentar para o fato de que, ao estudar um mensurando invariável, utiliza-se a incerteza padrão da média, conforme mostra a Equação 2.10. Ao contrário, quando o mensurando for variável, necessariamente emprega-se a incerteza padrão das indicações:

$$u(l_M) = \frac{u(l)}{\sqrt{m}} \quad (\text{Equação 2.10})$$

m = número de medições repetidas; $u(l_M)$ = incerteza padrão da média das indicações.



A título de exemplificação, conforme apresentado por Lira (2015), considere o raio de um calibrador cilíndrico que foi medido em um maquinário universal, empregando um método de medição direta. Ao final do processo de medição, foram obtidas 10 medições do mesmo mensurando. Repare que o processo de medição com o maquinário universal pode estar sujeito a várias fontes de incerteza, tais como: operador, procedimento de medição, entre outras. Assim, a fim de avaliar a incerteza do tipo A e garantir a confiabilidade das medições, deve-se calcular o desvio padrão da medida.

Tabela 2.2 | Indicações obtidas nas dez medições executadas com o maquinário universal

Medição	Indicação	Medição	Indicação
1	10,0035 mm	6	10,0029 mm
2	10,0027 mm	7	10,0028 mm
3	10,0031 mm	8	10,0033 mm
4	10,0030 mm	9	10,0029 mm
5	10,0034 mm	10	10,0030 mm

Fonte: elaborado pelo autor.

Primeiramente, calcula-se a média das 10 medições:

$$I_M = \frac{10,0035 + 10,0027 + 10,0031 + 10,0030 + 10,0034 + 10,0029 + \dots + 10,0030}{10}$$

$$I_M = 10,0031\text{mm.}$$

Posteriormente, calcula-se o desvio padrão da média, considerando 10

medições, conforme a Equação 2.10: $u(l) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (l_k - I_M)^2}{n - 1}}$. Assim, tem-

se que o desvio padrão (ou, em metrologia, incerteza padrão) é igual a

$$u(l) = 0,0003\text{mm.}$$

Observe que medições repetidas do mensurando foram executadas e, então, estima-se a incerteza padrão por meio da análise estatística dos resultados, incorrendo em uma avaliação do tipo A da incerteza de medição. Assim, o resultado $u(l) = 0,0003\text{mm}$ significa o valor da incerteza do tipo A presente no processo de medição.

Outra forma de se obter a incerteza padrão de cada fonte é por meio de procedimentos não estatísticos, também denominados procedimentos do tipo B ou incertezas do tipo B.

De acordo com o Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM, 2012), a avaliação do tipo B da incerteza de medição pode ser desenvolvida por meio de desvios padrão estimados a partir de funções de densidade de probabilidade com base na experiência ou em outras informações. Assim, na incerteza do tipo A, a partir de um conjunto de medições de um mesmo mensurando, conseguimos obter, por meios estatísticos, a incerteza de medição. Diferentemente, na incerteza do tipo B, utilizamos outras informações e, por meio de procedimentos não estatísticos, obtemos o valor da incerteza de medição (LIRA, 2015).



Refleta

Considerando que a incerteza do tipo B requer informações conhecidas a priori sobre o comportamento aleatório da fonte de incerteza, de onde seria possível obter tais dados?

Assim, Albertazzi e Sousa (2008) sugerem que, a fim de obter dados vinculados com os efeitos aleatórios de uma fonte de incerteza, vale a pena investigar informações extraídas das especificações técnicas do sistema de medição dadas pelo fabricante, dados históricos advindos de medições passadas, notas de certificados de calibração e, também, estimativas feitas com base na experiência de especialistas.

De posse dessas informações, inicialmente, é proposta uma distribuição de probabilidade (por exemplo, gaussiana, retangular, triangular, entre outras) que seja satisfatória, a fim de explicar a distribuição dos resultados de medição em torno do valor verdadeiro do mensurando. Duas características dessa distribuição de probabilidade devem sempre ser respeitadas: (i) a distribuição de probabilidade deve ser passível de ajuste de acordo com os dados prévios relevantes à determinação da qualidade do resultado da medição; (ii) a distribuição de probabilidade deve possibilitar a

descrição dessas informações consideráveis em uma quantidade que possa ser interpretada como desvio padrão (LIMA JUNIOR; SILVEIRA, 2011).



Refleta

A distribuição de probabilidade trata-se de um modelo matemático que associa o valor da variável em análise com a sua probabilidade de ocorrência (MONTGOMERY; RUNGER, 2012).



Exemplificando

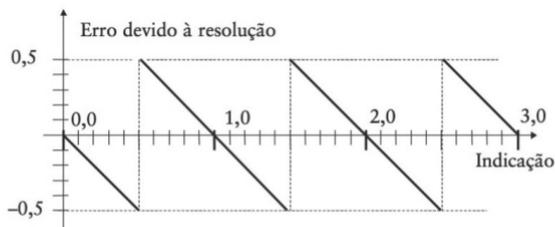
Para entender como obter a forma da distribuição de probabilidade por meio da análise de um fenômeno no escopo da metrologia, conforme apresentado por Albertazzi e Sousa (2008), vamos utilizar como exemplo a medição do comprimento de um clipe de metal a partir do uso de uma trena digital que só mostra indicações inteiras, ou seja, sem nenhuma casa decimal. Em outras palavras, temos que o incremento digital ou resolução do instrumento é igual a 1 cm.

Como só é possível indicar a parte inteira, tem-se que, comumente, a parte fracionária da indicação é arredondada para o inteiro mais próximo. Por exemplo, a indicação do comprimento do clipe que, sem a limitação da resolução, seria 2,7 cm, é arredondada para 3 cm, tendo o seu valor acrescido em 0,3 cm. Em outra medição, a indicação de 2,4 cm seria arredondada para 2, tendo o seu valor reduzido em 0,4. Dessa forma, pode-se constatar que o erro advindo do arredondamento seria de $-0,4$ cm e $+0,3$ cm em cada caso, respectivamente. Caso essa mesma avaliação seja repetida para cada potencial valor do comprimento do clipe, a curva de erros devido ao arredondamento poderia ser descrita conforme representado na Figura 2.1.

Na verdade, a distribuição de probabilidade dos erros decorrentes do arredondamento do comprimento do clipe pode ser obtida a partir da equação $a = \frac{R}{2}$, em que **R** é a resolução do instrumento e **a** é o erro devido à limitação da resolução. Considerando a trena digital, que apresenta resolução igual a 1 cm, então $a = \frac{1}{2} = 0,5\text{cm}$, ilustrando que o erro devido ao arredondamento do comprimento do clipe sempre

estará dentro dos limites $-0,5$ e $+0,5$.

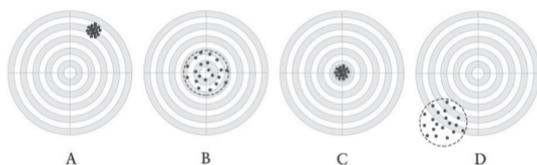
Figura 2.1 | Erro devido ao arredondamento do comprimento do clipe advindo da resolução do instrumento digital



Fonte: Albertazzi e Sousa (2008, p. 201).

Observando o aspecto simétrico (denominado "dente de serra") do gráfico apresentado na Figura 2.1, tem-se que a probabilidade de qualquer valor de erro entre $-0,5$ e $+0,5$ é a mesma. Assim, a Figura 2.2 descreve o perfil da distribuição de probabilidade resultante do erro de arredondamento do comprimento do clipe a partir do uso de um instrumento que só opera com indicação inteira. Esse perfil de distribuição é denominado distribuição uniforme ou retangular.

Figura 2.2 | Densidade de probabilidade para o erro de arredondamento do comprimento do clipe advindo da resolução limitada da trena digital



Fonte: Albertazzi e Sousa (2008, p. 201).

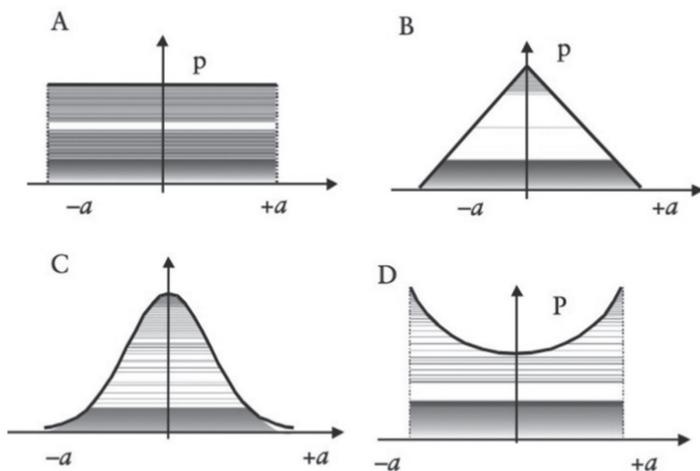
A partir da propriedade da distribuição de probabilidades retangular, torna-se possível calcular a incerteza padrão conforme a seguinte equação:

$u = \frac{a}{\sqrt{3}}$, em que u = incerteza padrão específica para a distribuição de probabilidade retangular. Neste caso, temos ainda que $a = \frac{1}{2} = 0,5 \text{ cm}$, de modo que $u = \frac{R}{2\sqrt{3}} = \frac{1}{2\sqrt{3}} = \frac{0,5}{\sqrt{3}} \text{ cm}$.

Perceba que o valor de (u) refere-se à incerteza do tipo B presente no processo, sendo obtida por meio não estatístico.

A Figura 2.3 apresenta as principais distribuições de probabilidade comumente utilizadas para descrever fontes de incerteza, cada uma com sua especificidade.

Figura 2.3 | Perfis de distribuições de probabilidade: (A) uniforme ou retangular; (B) triangular; (C) norma (gaussiana) I; (D) em "U"



Fonte: Albertazzi e Sousa (2008, p. 203).

Quando há a mesma probabilidade de que qualquer valor entre $-a$ e $+a$ venha a ocorrer, ou quando não há plena certeza sobre qual perfil de distribuição adotar, a distribuição de probabilidade mais empregada é a uniforme ou retangular (Figura 2.3A) (MONTGOMERY; RUNGER, 2012). Neste caso, a incerteza padrão (u) pode ser obtida por meio da Equação 11 (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008).

$$u = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (\text{Equação 2.11})$$

Quando há maior probabilidade de ocorrer os valores centrais, a fonte de incerteza pode ser descrita por meio da distribuição triangular (Figura 2.3B). O perfil triangular de distribuição de probabilidade comumente é o resultado da soma ou da subtração de duas variáveis com mesma distribuição de probabilidade uniforme ou retangular e a incerteza padrão pode ser obtida conforme apresentado na Equação 2.12 (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008).

$$u = \frac{a}{\sqrt{6}} \quad (\text{Equação 2.12})$$

De acordo com o ilustrado na Figura 2.3C, tem-se a distribuição normal ou gaussiana. Conhecida como curva normal ou de Gauss, trata-se de um tipo de curva simétrica em torno da média, suave e unimodal, de modo que no meio da distribuição situa-se o ponto de frequência máxima. Dado ser uma curva assintótica em relação ao eixo das abscissas, isto é, aproxima-se indefinidamente do eixo horizontal sem alcançá-lo, tem-se que as posições $-a$ e $+a$ não são os extremos da curva, embora correspondam aos limites que englobam 95,45% da área abaixo da curva (MONTGOMERY; RUNGER, 2012). Neste caso, a incerteza padrão (u) pode ser obtida por meio da Equação 2.13 (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008):

$$u = \frac{a}{2} \quad (\text{Equação 2.13})$$

Por fim, conforme apresentado na Figura 2.3D, tem-se a distribuição em "U", que modela fenômenos que são susceptíveis a efeitos que variam segundo funções senoidais, tais como sinais elétricos afetados por ruídos eletromagnéticos provocados pela rede elétrica. Quando se tem a variação de um sinal segundo o modelo senoidal, aquele apresenta velocidades mais baixas nas regiões extremas, incorrendo no aumento da probabilidade de perturbação nessas regiões, de modo a justificar o formato em

"U" da distribuição. Neste caso, a incerteza padrão pode ser obtida conforme apresentado na Equação 2.14:

$$u = \frac{a}{\sqrt{2}} \quad (\text{Equação 2.14})$$

Logo, repare que avaliação do tipo B da incerteza de medição pode ser desenvolvida por meio de desvios padrão estimados a partir de funções de densidade de probabilidade com base na experiência ou em outras informações.



Pesquise mais

A fim de aprofundar seus conhecimentos sobre outras formas de distribuição de probabilidade, torna-se extremamente válida a leitura dos capítulos 3 e 4 do livro a seguir:

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

Lembre-se que esse livro está disponível em sua Biblioteca Virtual!

Uma vez obtida a componente aleatória de cada fonte de incerteza, seja por avaliação do tipo A ou por avaliação do tipo B, deve-se quantificar o efeito aleatório conjunto que afeta o processo de medição, resultando na incerteza combinada, conforme apresenta a Equação 2.15:

$$u_c^2 = u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + \dots + u_i^2 \quad (\text{Equação 2.15})$$

u_c = incerteza padrão combinada; u_i = incerteza padrão da i -ésima fonte. A partir da incerteza padrão combinada, obtém-se a incerteza expandida, que é equivalente uma à repetitividade da ação combinada de todas as fontes de incerteza, conforme mostra a Equação 2.16:

$$U = t \cdot u_c \quad (\text{Equação 2.16})$$

U = incerteza expandida do processo de medição. t = coeficiente de Student e u_c = incerteza padrão combinada.

Para o cálculo do grau de liberdade efetivo, que corresponde à incerteza padrão combinada, deve-se aplicar a Equação 2.17 (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008).

$$\frac{u_c^4}{v_{ef}} = \frac{u_1^4}{v_1} + \frac{u_2^4}{v_2} + \dots + \frac{u_i^4}{v_i} \quad (\text{Equação 2.17})$$

v_{ef} = grau de liberdade efetivo; u_i = incerteza padrão da i -ésima fonte; v_i = grau de liberdade da i -ésima fonte de incerteza.

Finalmente, para expressar o resultado de medição (resultado base \pm incerteza de medição) do processo de medição direta, considerando a influência de diferentes fontes de incerteza, deve-se, primeiramente, corrigir os erros sistemáticos, isto é, soma-se a correção combinada à média das indicações, obtendo-se o resultado-base. Então, com a componente sistemática compensada, a incerteza de medição vai coincidir com a incerteza expandida.

Sem medo de errar

Lembre-se de que você foi contratado para o departamento de controle de qualidade de uma grande empresa de fabricação de eletrodomésticos. A pedido de seu gestor, a fim de melhorar a rotina de ensaios metrológicos, você deve propor um protocolo genérico aos seus colegas de equipe e desenvolver testes para obter o resultado de medição sob a consideração de que há outras fontes de incerteza no processo de medição. Dado ser um protocolo para mudança de rotina, comece a descrição das ações com o passo e passo, e de forma detalhada.

Etapa 1: Identificação das fontes de incerteza

O primeiro passo é identificar todas as fontes de incerteza presentes no processo de medição e, para tanto, deve-se refletir sobre cinco esferas: operador, procedimento de medição, condições de medição, mensurando e instrumento/sistema de medição.

Etapa 2: Obtenção da correção combinada de todas as fontes de incerteza

Cada uma das fontes de incerteza identificadas deve ser analisada quanto à contribuição que possa conferir aos erros sistemáticos. Assim, para estimar os efeitos sistemáticos associados à incerteza, deve-se avaliar o valor da correção a ser aplicada, individualmente, para cada fonte de incerteza, resultando na correção combinada conforme a equação: $C_c = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_i$, em que C_c = correção combinada, que deve ser expressa na mesma unidade que o mensurando, e C_i = correção da i-ésima fonte de incerteza.

Etapa 3: Obtenção da incerteza padrão de cada fonte

Tem-se que a incerteza-padrão associada a uma fonte de incerteza pode ser obtida por procedimentos estatísticos (avaliação do tipo A da incerteza de medição ou incerteza do tipo A) ou por procedimentos não estatísticos (avaliação do tipo B da incerteza de medição ou incerteza do tipo B).

No primeiro caso, medições repetidas do mensurando são executadas e, então, estima-se a incerteza padrão por meio

da análise estatística dos resultados conforme a equação:

$$u(l) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (l_k - l_M)^2}{n-1}}, \text{ em que } u(l) = \text{incerteza-padrão das indicações};$$

l_k = k-ésima indicação; l_M = indicação média; e n = número de indicações repetidas.

Outra forma de se obter a incerteza padrão de cada fonte é por meio de procedimentos não estatísticos, que necessitam de informações conhecidas a priori (advindas de especificações técnicas do sistema de medição, notas de certificados de calibração, entre outros) a fim de se obter efeitos aleatórios de uma fonte de incerteza. De posse dessas informações, inicialmente, é proposta uma distribuição de probabilidade que seja satisfatória para explicar a distribuição dos resultados de medição em torno do valor verdadeiro do mensurando.

Quando há a mesma probabilidade de que qualquer valor entre $-a$ e $+a$ venha a ocorrer, a distribuição de probabilidade mais empregada é a uniforme ou retangular. Neste caso, a incerteza

padrão (u) pode ser obtida por meio da equação: $u = \frac{a}{\sqrt{3}}$. Quando há maior probabilidade de ocorrer os valores centrais, a fonte de incerteza pode ser descrita por meio da distribuição triangular e a incerteza padrão pode ser obtida pela equação: $u = \frac{a}{\sqrt{6}}$.

Por sua vez, conhecida como curva normal ou de Gauss, a distribuição normal trata-se de um tipo de curva simétrica em torno da média e, dado ser uma curva assintótica em relação ao eixo das abscissas, tem-se que as posições $-a$ e $+a$ não são os extremos da curva, embora correspondam aos limites que englobam 95,45% da área abaixo da curva. Neste caso, a incerteza padrão (u) pode ser obtida por meio da equação: $u = \frac{a}{2}$.

Por fim, outro perfil muito empregado para descrever fenômenos em metrologia é a distribuição em "U", que modela fenômenos que são susceptíveis a efeitos que variam segundo funções senoidais, tais como sinais elétricos afetados por ruídos eletromagnéticos provocados pela rede elétrica. Para este caso, a incerteza padrão pode ser obtida pela equação: $u = \frac{a}{\sqrt{2}}$ (Equação 2.13)

Etapa 4: Obtenção da incerteza padrão combinada

Uma vez obtida a componente aleatória de cada fonte de incerteza, seja por avaliação do tipo A ou por avaliação do tipo B, deve-se quantificar o efeito aleatório conjunto que afeta o processo de medição, resultando na incerteza combinada, conforme a equação a seguir: $u_c^2 = u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + \dots + u_i^2$, em que u_c = incerteza padrão combinada e u_i = incerteza padrão da i -ésima fonte.

Etapa 5: Obtenção dos graus de liberdade efetivo e da incerteza expandida

A partir da incerteza padrão combinada, obtém-se a incerteza expandida, que é equivalente uma à repetitividade da ação combinada de todas as fontes de incerteza, representada pela equação:

$U = t \cdot u_c$, em que U = incerteza expandida do processo de medição. Para o cálculo do grau de liberdade efetivo, deve-se

aplicar a equação: $\frac{u_c^4}{v_{ef}} = \frac{u_1^4}{v_1} + \frac{u_2^4}{v_2} + \dots + \frac{u_i^4}{v_i}$, em que v_{ef} = graus de liberdade efetivo e v_i = graus de liberdade da i -ésima fonte de incerteza.

Etapa 6: Obtenção do resultado de medição sob a influência de diferentes fontes de incerteza.

Finalmente, para expressar o resultado de medição do processo de medição direta, considerando a influência de diferentes fontes de incerteza, deve-se, primeiramente, corrigir os erros sistemáticos, isto é, soma-se a correção combinada à média das indicações, obtendo-se o resultado-base. Então, com a componente sistemática compensada, a incerteza de medição vai coincidir com a incerteza expandida.

Com este estudo, continuamos avançando no conhecimento de metrologia, de modo que você atenda a situações reais de trabalho.

Avançando na prática

Verificação de uma balança analítica na presença de diferentes fontes de incerteza

Descrição da situação-problema

Como técnico em um laboratório metrológico de uma indústria automotiva, seu gestor lhe solicita verificar se uma balança analítica (resolução de 0,01 g) do chão de fábrica – temperatura permanece em 20 °C – está operando da forma adequada. a massa padrão tem as seguintes especificações: valor nominal = 30,000 g; correção = -0,005 g; incerteza expandida da correção da massa padrão = 0,002 g (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008). O uso da massa padrão deve-se ao fato de que, por ter seu valor verdadeiro conhecido, esse objeto serve de parâmetro para analisar se o dispositivo apresenta erro de medição. Você realiza cinco medições da massa padrão,

resultando nas seguintes indicações: 30,160 g; 30,110 g; 30,170 g; 30,150 g; 30,140 g. Assim, para verificar o funcionamento da balança, seu gestor lhe solicita um relatório contendo apenas a correção combinada e a incerteza padrão combinada, assumindo coeficiente *t* de *Student* igual a 2,000.

Resolução da situação-problema

O primeiro passo a constar no relatório é a identificação das fontes de incerteza: (1) efeitos aleatórios (Repetitividade) associados à balança, incluindo a influência do operador; (2) limitações da massa padrão, pois, após corrigir o seu valor, ainda tem-se a incerteza da correção (aleatório); (3) limitação da resolução da balança, que, por ser centesimal (2 casas decimais), pode gerar erro de arredondamento, para cima ou para baixo, sendo aleatório.

O segundo passo é obter a correção combinada, isto é, quantificar os efeitos sistemáticos. Neste caso, tem-se apenas a correção da massa padrão, que é igual a -0,005 g. Logo, $C_c = -0,005g$.

O próximo passo é quantificar a componente aleatória. Para se calcular o desvio padrão das cinco indicações, aplica-se a

equação: $u(l) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (l_k - l_M)^2}{n-1}}$, em que a indicação média é igual 30,150 g, resultando em $u(l) = 0,023g$, de acordo com avaliação do tipo da incerteza.

Como trata-se de mensurando invariável, aplica-se a equação:

$u(l_M) = \frac{u(l)}{\sqrt{m}}$, em que $m = 5$ medições repetidas, resultando em uma incerteza padrão da média igual a 0,010 g, ou seja, $u(1) = 0,010 g$.

A incerteza expandida foi obtida a partir da especificação da massa padrão, sendo $U = 0,002 g$, representando uma avaliação do tipo B de incerteza, pois parte de uma informação dada pelo fabricante. Pela equação $U = t \cdot u_c$, considerando $t = 2,000$, pode-se obter a incerteza padrão da massa padrão, sendo $0,002 = 2 \cdot u_{\text{massa-padrão}}$, de modo que $u_{\text{massa-padrão}} = 0,0010 g$, ou seja, $u(2) = 0,0010g$.

Por sua vez, a incerteza padrão do erro de arredondamento, advindo da resolução limitada da balança, pode ser descrito por uma distribuição retangular, dado que há a mesma probabilidade de que qualquer valor entre $-a$ e $+a$ venha a ocorrer, com $a = \frac{R}{2} = \frac{0,01}{2} = 0,005 \text{ g}$ e $u = \frac{0,005}{\sqrt{3}} = 0,003 \text{ g}$, isto é, $u(3) = 0,003 \text{ g}$. Observa-se que obtivemos essa incerteza por meio de uma avaliação do tipo B.

Logo, pela equação da incerteza padrão combinada $u_c^2 = u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + \dots + u_i^2$, tem-se $u_c = \sqrt{(0,0010)^2 + (0,010)^2 + (0,003)^2} = 0,0104 \text{ g}$. A incerteza padrão combinada refere-se à contribuição de todas as fontes de incerteza que agem no processo no tocante ao erro aleatório.

Você colocaria algo mais no seu relatório? Bom trabalho!

Faça valer a pena

1. A densidade de probabilidade refere-se a um modelo matemático que associa o valor da variável em análise com a sua probabilidade de ocorrência. Considere as afirmativas I, II e III:

I. No escopo da metrologia, é proposta uma distribuição de probabilidade que seja satisfatória, a fim de explicar a distribuição dos resultados de medição em torno do valor verdadeiro do mensurando.

II. As principais distribuições de probabilidade comumente utilizadas para descrever fontes de incerteza referem-se à Normal, Retangular, Triangular e em U.

III. Nas incertezas do tipo B, são propostas distribuições de probabilidade para modelar fenômenos em metrologia.

Com base no conceito de densidade de probabilidade no escopo da metrologia, assinale a alternativa correta:

- a) Somente a afirmativa I é correta.
- b) Somente as afirmativas I e III são corretas.
- c) Somente a afirmativa II é correta.
- d) Somente as afirmativas I e II são corretas.
- e) As afirmativas I, II e III são corretas.

2. Quando se considera um processo de medição direta em que cada fonte de incerteza influencia significativamente o processo de medição e que estas só podem ser estimadas separadamente, então, deve-se considerar a combinação dessas fontes. Analise as afirmativas I, II e III:

I. O primeiro passo quando se considera a ação de diferentes fontes de incerteza é fazer um levantamento de todas que agem sobre o processo, seja em menor ou seja em maior magnitude.

II. Cada uma das fontes de incerteza identificadas deve ser analisada quanto à contribuição que possa conferir somente aos erros sistemáticos.

III. Para se calcular a correção combinada, aplica-se a avaliação do tipo A da incerteza.

Assinale a alternativa que apresenta a ordem correta de verdadeiro (V) e falso (F):

- a) V, F, F.
- b) V, V, F.
- c) F, V, F.
- d) V, V, V.
- e) V, F, V.

3. O cálculo da(o) _____ de uma série de medições é um típico exemplo da incerteza do tipo A. Deve-se atentar para o fato de que, quando se estuda um mensurando _____, utiliza-se a incerteza padrão da(o) _____, conforme determinada equação. Em outros casos, necessariamente, emprega-se a incerteza padrão das indicações.

Assinale a alternativa que completa as lacunas corretamente:

- a) Variância; variável; soma.
- b) Desvio padrão; invariável; média.
- c) Correção; invariável; desvio padrão.
- d) Correção combinada; variável; soma.
- e) Incerteza padrão; aleatório; média.

Seção 2.3

Medição indireta

Diálogo aberto

Nesta seção, inicialmente, você irá estudar os conceitos gerais e fundamentos da medição indireta e, então, aprenderá a obter a estimativa da incerteza combinada de medições não correlacionadas, tanto no âmbito da adição-subtração, quanto da multiplicação-divisão. Posteriormente, vamos estudar o modo de representação gráfica de erro, isto é, a curva de erro. Certamente você aplicará esses conceitos em sua vida profissional (medição da área de uma peça utilizada em um processo produtivo) ou mesmo em seu cotidiano, ao executar qualquer processo de medição, sendo de extrema importância entender como ocorre a medição indireta.

Para explorar esses pontos, vamos retomar o contexto em que você foi contratado para o departamento de controle de qualidade de uma grande empresa de fabricação de eletrodomésticos de diferentes segmentos.

Nas suas primeiras atividades na empresa, você concentrou seus esforços no processo de medição direta da massa de geladeiras da linha branca, considerando tanto o predomínio de uma única fonte de incerteza quanto a presença de outras fontes de incerteza que de alguma forma se combinam e influenciam o processo de medição. Finalmente, após a avaliação da massa dos refrigeradores, seu gestor o remaneja para o setor de chuveiro elétrico, solicitando que avalie o funcionamento do chuveiro por meio da análise da corrente elétrica que passa no resistor. Durante o ensaio técnico do produto, você avalia que a corrente elétrica passa por um resistor de $(510,0 \pm 2,0) \Omega$ sobre o qual foi medido uma queda de tensão de $(140,0 \pm 3,0) V$.

Considerando o método de medição indireta, uma vez que você sabe a resistência elétrica e a tensão, qual seria o resultado de medição da corrente elétrica com sua respectiva incerteza?

Refleta sobre essa indagação, a fim de conseguir entregar um relatório para o seu gestor, apontando o cálculo da corrente elétrica conforme condição avaliada no ensaio técnico do produto.

Vamos começar? Ótimo trabalho!

Não pode faltar

Nas seções anteriores desta unidade, concentramos nosso estudo em medições diretas executadas tanto sob o predomínio de uma única fonte de incerteza quanto sob a presença de outras fontes de incerteza que de alguma forma se combinam e influenciam o processo de medição.

Nesta seção, vamos basear nosso estudo no processo de medição indireta. De forma simplificada, retome o caso em que se queira obter a área de uma chapa retangular de ferro, utilizando uma trena. Não há um único processo de medição por meio do qual se obtenha diretamente a área da chapa de ferro, certo? Inicialmente, teria que se obter a medida da base e a medida da altura da chapa para calcular a área do objeto. Desta forma, vimos que a medição das dimensões do comprimento (base do retângulo) e da altura seriam obtidas por meio da medição direta, enquanto que a área da chapa é obtida a partir do processo de medição indireta. Logo, entende-se como medição indireta quando os valores de medição do mensurando são obtidos a partir de operações algébricas que envolvem duas ou mais grandezas associadas ao mesmo mensurando.

As operações matemáticas são alimentadas por grandezas previamente conhecidas e associadas às diferentes características do mensurando, de modo que a combinação dessas grandezas vai resultar em uma medição indireta. Comumente, denomina-se grandezas de entrada as variáveis que se combinam algebricamente na obtenção da medição indireta. A título de exemplificação, no caso da chapa de ferro retangular, podemos afirmar que o comprimento da base e a altura são as grandezas de entrada para a operação algébrica de cálculo da área de um retângulo. O fato de haver um modelo matemático é justamente o que diferencia

a medição direta da medição indireta, uma vez que na medição direta o mensurando é submetido diretamente ao sistema de medição e então obtém-se a indicação.



Assimile

Uma vez que entendemos que a medição indireta é um resultado de uma operação algébrica da qual participam duas ou mais grandezas, temos que estas variáveis são denominadas grandezas de entrada, uma vez que alimentam a relação matemática.

Segundo Albertazzi e Sousa (2008), conceitua-se grandeza de entrada as medidas associadas a diferentes características do mensurando que se combinam algebricamente, a fim de obter o valor da medição indireta.

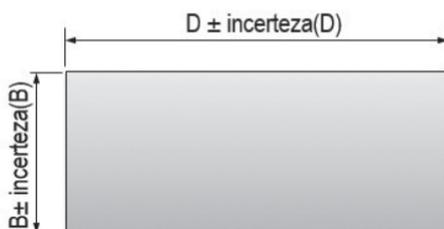
Portanto, é necessário ter um modelo matemático que relacione as grandezas de entrada com o mensurando de uma medição indireta. O fato de haver um modelo matemático é justamente o que diferencia a medição indireta da medição direta, uma vez, que na medição direta, o mensurando é submetido diretamente ao sistema de medição e então obtém-se a indicação.

Podemos citar outros exemplos de medição indireta: velocidade média de um automóvel em uma estrada, que tem como grandezas de entrada a distância percorrida e o tempo; perímetro de um terreno retangular, que tem como grandezas de entrada o comprimento e a largura do terreno; a corrente que passa em um resistor sob uma determinada diferença de potencial elétrico, sendo o valor da resistência elétrica e o valor do potencial elétrico as grandezas de entrada; o volume de um cubo, sendo a aresta do cubo a única grandeza de entrada; entre outros.

Nos exemplos citados, podemos constatar que, para cada um deles, há um modelo matemático que os descreve. O modelo é composto por operações algébricas elementares, tais como: adição, subtração, multiplicação e divisão. Por exemplo, para a chapa de ferro retangular (Figura 2.4) de comprimento D e altura B , temos que a área é modelada matematicamente por **Área** = $B \cdot D$, enquanto que o perímetro é descrito por **Perímetro** = $B + D + B + D = 2B + 2D$.

É evidente que há casos que envolvem funções trigonométricas, exponenciais e, também, equações diferenciais nos modelos matemáticos, embora não seja o mais comum. De qualquer forma, tem-se que nas medições indiretas deve haver uma modelagem matemática que descreva o mesurando que se quer obter a partir de grandezas associadas a ele.

Figura 2.4 | Chapa de ferro retangular com as dimensões de comprimento e altura, bem como suas respectivas incertezas



Fonte: elaborado pelo autor.

A fim de aprofundar os conceitos de medição indireta, adentraremos em fundamentos de estatística. Vamos retomar o conceito de variável aleatória, pensando em um experimento no qual deve-se jogar uma moeda três vezes e observar a sequência de cara e coroa. Trata-se de um fenômeno aleatório e, ao final, teremos uma observação conhecida que, no entanto, não será mais aleatória. Dado o fenômeno ser aleatório, pode-se afirmar que o valor obtido para a primeira observação é, na verdade, um particular valor observado da variável aleatória. Assim, após uma nova realização do fenômeno, comumente espera-se que um novo valor particular seja obtido, na maioria das vezes, diferente do anterior.

Logo, quando uma determinada variável é influenciada pela aleatoriedade, então trata-se de uma variável aleatória. Assim, conceitualmente, temos que uma variável aleatória não pode ser prevista com exatidão, sendo descrita em termos de probabilidade, isto é, por meio de distribuição de probabilidades (vimos na seção anterior) é obtido o conjunto de todos os valores que a variável aleatória pode assumir (MONTGOMERY; RUNGER, 2012).

Aplicando esse conceito em metrologia, temos que a execução de repetidas medições de um mesmo mensurando incorre em indicações distintas em função do erro aleatório, impossibilitando a previsão exata do valor da próxima indicação. Logo, podemos afirmar que a indicação obtida de um sistema de medição é, também, uma variável aleatória (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008).

No tocante às variáveis aleatórias, mencionamos dois casos distintos: variáveis aleatórias não correlacionadas, ou estatisticamente independentes, e variáveis aleatórias correlacionadas ou estatisticamente dependentes. No primeiro caso, quando duas variáveis aleatórias não apresentam correlação entre si, ou seja, não possuem sincronismo, então afirmamos que estas são estatisticamente independentes, de modo que a variação aleatória de uma variável não influencia a variação aleatória da outra variável. Um exemplo de variáveis aleatórias não correlacionadas pode ser observado na temperatura da água do mar e na cotação de uma moeda; é evidente que o aumento da temperatura da água do mar não vai incorrer no aumento ou na diminuição da cotação de uma moeda.

No segundo caso, quando é possível perceber uma relação sistemática entre as variáveis aleatórias, então temos variáveis estatisticamente dependentes, de modo que o aumento/diminuição da primeira variável incorre no aumento/diminuição da segunda variável. Um exemplo de variáveis aleatórias correlacionadas refere-se ao desempenho dos colaboradores no trabalho e o escore obtido num teste vocacional para aquele trabalho. Neste caso, estudos mostram que um bom desempenho no trabalho está correlacionado com um alto escore do teste vocacional para aquele trabalho.

Quando as duas variáveis são correlacionadas, calcula-se o coeficiente de correlação a fim de corroborar tal afirmativa e descrever o tipo de dependência estatística (linear, exponencial, logarítmico, quadrático, cúbico, entre outros) de correlação (MONTGOMERY; RUNGER, 2012).

Em metrologia, a existência de correlação é mais comum nos casos em que não ocorreu, intencionalmente, a correção dos erros

sistemáticos das grandezas de entrada. Assim, pode-se afirmar que a maioria dos ensaios metrológicos pode ser suficientemente bem modelada a partir da consideração de que as medições são variáveis aleatórias independentes ou não correlacionadas (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008; LIRA, 2015).

Neste momento abordaremos somente esse caso, assumindo que os erros sistemáticos das grandezas de entrada foram corrigidos e que não há relação sistemática entre os erros aleatórios associados às medições das diferentes grandezas de entrada.



Refleta

Até aqui ficou claro que necessitamos de um modelo matemático que relacione as grandezas de entrada com o mensurando de uma medição indireta, certo? O ponto de reflexão é: será que, para calcular a incerteza combinada de uma medição indireta, devemos considerar o modelo matemático atrelado à mesma?

Em outras palavras, reflita se o tipo de operação algébrica presente no modelo matemático que descreve o fenômeno metrológico impacta no resultado de medição do mensurando da medição indireta.

A partir da combinação das medições de grandezas de entrada não correlacionadas, bem como da combinação de suas respectivas incertezas, podemos obter o resultado de uma medição indireta. Para tal, executa-se esse procedimento com base na lei de combinação das variâncias (soma-subtração e multiplicação-divisão), válida para variáveis estatisticamente independentes (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008).

No caso em que a medição indireta é obtida por meio da soma (Eq. 2.18) ou da subtração (Eq. 2.19), temos que o quadrado do desvio padrão resultante da soma entre as grandezas de entrada é igual à soma dos quadrados dos desvios padrão das grandezas de entrada.

Lembre-se de que o próprio desvio padrão corresponde à incerteza padrão associada a cada medição, de modo que o

quadrado da incerteza padrão combinada das medições não correlacionadas (isto é, incerteza da medição indireta) é igual à soma dos quadrados da incerteza padrão de cada grandeza de entrada:

$$u^2(X_1 + X_2 + \dots + X_n) = u^2(X_1) + u^2(X_2) + \dots + u^2(X_n) \text{ (Equação 2.18),}$$

$$u^2(X_1 - X_2 - \dots - X_n) = u^2(X_1) + u^2(X_2) + \dots + u^2(X_n) \text{ (Equação 2.19),}$$

u = incerteza padrão e X_i = grandezas de entrada.

Vale ressaltar que a mesma lei de soma dos quadrados das incertezas padrão vale tanto para a adição quanto para a subtração, bem como para a combinação entre adição e subtração. Assim, Albertazzi e Sousa (2008) empregam uma equação genérica para soma e/ou subtração (Eq. 2.20).

$u^2(X_1 \pm X_2 \pm \dots \pm X_n) = u^2(X_1) + u^2(X_2) + \dots + u^2(X_n)$, em que $u^2(X_1 \pm X_2 \pm \dots \pm X_n)$ = quadrado da incerteza padrão combinada (isto é, incerteza padrão da medição indireta) advinda da adição e/ou subtração; $u^2(X_n)$ = quadrado da incerteza padrão da grandeza de entrada X_n .



Exemplificando

Vamos retomar o caso da chapa de ferro retangular, ilustrada na Figura 2.4, em que se quer obter o perímetro do objeto.

Suponha inicialmente que as dimensões D e B foram obtidas, os erros sistemáticos foram corrigidos e que, então, trata-se de medições não correlacionadas.

Assim, temos $D = (20 \pm 3) \text{ cm}$ e $B = (10 \pm 1) \text{ cm}$, sendo **Perímetro** = $B + D + B + D$, com D e B grandezas de entrada.

Logo, o primeiro passo é calcular o resultado base por meio da equação anterior. Assim, temos **Perímetro** = $10 + 20 + 10 + 20 = 60 \text{ cm}$,

O próximo passo é o cálculo da incerteza de medição do perímetro empregando a equação $u^2(X_1 \pm X_2 \pm \dots \pm X_n) = u^2(X_1) + u^2(X_2) + \dots + u^2(X_n)$.

Assim, aplicamos $u^2(X_1 + X_2 + \dots + X_n) = u^2(X_1) + u^2(X_2) + \dots + u^2(X_n)$ e teremos $u^2(B + D + B + D) = u^2(B) + u^2(D) + u^2(B) + u^2(D)$.

$$u^2(\text{Perímetro}) = 1^2 + 3^2 + 1^2 + 3^2$$

$$u^2(\text{Perímetro}) = 20$$

$$u(\text{Perímetro}) = 4,47\text{cm}$$

Logo, o resultado de medição do perímetro é:

$$\text{Perímetro} = (60,0 \pm 4,5) \text{ cm}.$$

No caso em que a medição indireta é obtida por meio da multiplicação (Equações 2.21 e 2.22) ou da divisão (Equações 2.23 e 2.24) presente no modelo matemático que a descreve, temos que o quadrado da incerteza padrão relativa da combinação resultante da multiplicação ou da divisão entre as grandezas de entrada é igual à soma dos quadrados das incertezas padrão relativas das grandezas de entrada,

$$\left[\frac{u(X_1 \cdot X_2 \cdot X_n)}{X_1 \cdot X_2 \cdot X_n} \right]^2 = \left[\frac{u(X_1)}{X_1} \right]^2 + \left[\frac{u(X_2)}{X_2} \right]^2 + \dots + \left[\frac{u(X_n)}{X_n} \right]^2 \quad (\text{Equação 2.21})$$

u = incerteza padrão; X_i = grandezas de entrada; $u(X_1 \cdot X_2 \cdot X_n)$ = incerteza padrão combinada (isto é, incerteza da medição indireta).

$$\left[\frac{u(X_1 / X_2 / X_n)}{X_1 / X_2 / X_n} \right]^2 = \left[\frac{u(X_1)}{X_1} \right]^2 + \left[\frac{u(X_2)}{X_2} \right]^2 + \dots + \left[\frac{u(X_n)}{X_n} \right]^2 \quad (\text{Equação 2.22})$$

u = incerteza padrão; X_i = grandezas de entrada; $u(X_1 / X_2 / X_n)$ = incerteza padrão combinada (isto é, incerteza da medição indireta).

A incerteza relativa é obtida por meio da razão entre a incerteza padrão e o resultado base da medição, de modo que podemos reescrever as Equações 2.21 e 2.22, respectivamente, pelas Equações 23 e 24.

$$u_R^2(X_1 \cdot X_2 \cdot X_n) = u_R^2(X_1) + u_R^2(X_2) + u_R^2(X_n) \quad (\text{Equação 2.23})$$

$$u_R^2(X_1 / X_2 / X_n) = u_R^2(X_1) + u_R^2(X_2) + u_R^2(X_n) \quad (\text{Equação 2.24})$$

u_R = incerteza padrão relativa.

Essas expressões podem ser reunidas de uma forma geral pela Equação 2.25, que demonstra que a mesma lei de soma dos quadrados das incertezas padrão relativas vale tanto para a multiplicação quanto para a divisão, bem como para a combinação entre multiplicação e divisão.

$$u_R^2(X_1^{\pm 1} \cdot X_2^{\pm 1} \cdot X_n^{\pm 1}) = u_R^2(X_1) + u_R^2(X_2) + u_R^2(X_n) \quad (\text{Equação 2.25})$$

$u_R^2(X_1^{\pm 1} \cdot X_2^{\pm 1} \cdot X_n^{\pm 1})$ = quadrado da incerteza padrão relativa da combinação advinda da multiplicação e/ou divisão; $u^2(X_n)$ = quadrado da incerteza padrão relativa da grandeza de entrada X_n (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008).



Exemplificando

Vamos retomar o caso da chapa de ferro retangular, ilustrada na Figura 2.4, em que se quer obter, desta vez, a área do objeto.

Suponha novamente que as dimensões D e B foram obtidas, os erros sistemáticos foram corrigidos e que, então, trata-se de medições não correlacionadas. Assim, temos $D = (20 \pm 3) \text{ cm}$ e $B = (10 \pm 1) \text{ cm}$, sendo $\text{Área} = B \cdot D$, com D e B grandezas de entrada.

Logo, o primeiro passo é calcular o resultado base da área por meio da equação anterior. Assim, temos $\text{Area} = 10 \cdot 20 = 200 \text{ cm}^2$.

O próximo passo é o cálculo da incerteza de medição, empregando a equação $u^2(X_1 + X_2 + \dots + X_n) = u^2(X_1) + u^2(X_2) + \dots + u^2(X_n)$.

Assim, aplicamos a equação

$$\left[\frac{u(X_1 \cdot X_2 \cdot X_n)}{X_1 \cdot X_2 \cdot X_n} \right]^2 = \left[\frac{u(X_1)}{X_1} \right]^2 + \left[\frac{u(X_2)}{X_2} \right]^2 + \dots + \left[\frac{u(X_n)}{X_n} \right]^2 \quad \text{e teremos}$$

$$\left[\frac{u(B \cdot D)}{B \cdot D} \right]^2 = \left[\frac{u(B)}{B} \right]^2 + \left[\frac{u(D)}{D} \right]^2$$

$$\left[\frac{u(\text{Área})}{10 \cdot 20} \right]^2 = \left[\frac{1}{10} \right]^2 + \left[\frac{3}{20} \right]^2$$

$$\left[\frac{u(\text{Área})}{10 \cdot 20} \right]^2 = \left[\frac{1}{10} \right]^2 + \left[\frac{3}{20} \right]^2$$

$$\frac{u(\text{Área})^2}{200^2} = \left[\frac{1}{10} \right]^2 + \left[\frac{3}{20} \right]^2$$

$$u(\text{Área}) = 36,06 \text{ cm}$$

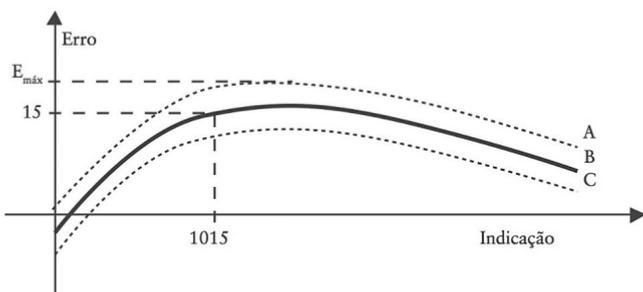
Logo, o resultado de medição da área é $(200 \pm 36) \text{ cm}$.

Neste ponto, encerramos os fundamentos básicos de medição indireta, sabendo como calcular o resultado base e a incerteza de medição do mensurando. No entanto, no tocante à assertividade na determinação correta do resultado de medição, vale a pena refletir sobre a representação gráfica de erros de medição, complementando pontos já abordados na Unidade 1. Para representar o erro, é desenvolvida uma curva de erros, isto é, trata-se de um gráfico que representa a distribuição dos erros, tanto sistemáticos quanto aleatórios, ao longo da faixa de medição do sistema de medição.

A representação gráfica dos erros se dá por meio de três linhas: linha central, que contempla os valores do parâmetro tendência (T_d), empregado na estimativa da componente sistemática do erro; limite superior da faixa, que contém os erros obtidos por meio da soma da tendência com a repetitividade (R_e), que se refere à intensidade da componente aleatória do erro de medição; e limite inferior da faixa, que contém os erros obtidos por meio da subtração da repetitividade e da tendência. A Figura 2.5 mostra um exemplo de uma curva de erros (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008).

A importância da curva de erros deve-se ao fato de conter os dados necessários para determinar a correção e a repetitividade para cada valor indicado pelo sistema de medição. Tais informações são extremamente valiosas para a correta determinação do resultado da medição, colaborando para o processo de medição direta ou indireta.

Figura 2.5 | Representação gráfica de uma curva de erros



Fonte: Albertazzi e Sousa (2008, p. 66).



Pesquise mais

A fim de explorar melhor a representação gráfica de erros, leia o capítulo 3 do livro a seguir:

ALBERTAZZI, Armando G. J.; SOUSA, André Roberto de. **Fundamentos de metrologia científica e industrial**. 1. ed. São Paulo: Editora Manole, 2008.

Sem medo de errar

Após a avaliação da massa dos refrigeradores, seu gestor o remaneja para o setor de chuveiro elétrico, solicitando que avalie o funcionamento do chuveiro por meio da análise da corrente elétrica que passa no resistor. Durante o ensaio técnico do produto, você avalia que a corrente elétrica passa por um resistor de $(510,0 \pm 2,0) \Omega$ sobre o qual foi medida uma queda de tensão de $(140,0 \pm 3,0) V$.

Para desenvolver o relatório, apontando o cálculo da corrente elétrica conforme condição avaliada no ensaio técnico do produto, inicialmente, você deve avaliar que se trata de uma medição indireta, de modo que a obtenção da corrente elétrica se dá por meio da aplicação da equação matemática $I = \frac{V}{R}$, em que I = corrente elétrica; V = potencial elétrico; R = resistência elétrica.

A partir da equação, o primeiro passo é obter o resultado base (RB) da corrente elétrica, sendo $I = \frac{140}{510} = 0,2745 \text{ A}$.

Posteriormente, tem-se que R e V são grandezas de entrada e apresentam, individualmente, suas incertezas de medição, que são, respectivamente, $2,0 \Omega$ e $3,0 \text{ V}$.

Considerando que as grandezas de entrada são não correlacionadas, podemos assegurar que os erros sistemáticos foram eficazmente corrigidos. Assim, no relatório, você deve explicitar que $u(R) = 2,0 \Omega$ e $u(V) = 3,0 \text{ V}$.

Dada a relação matemática entre as grandezas ser do tipo divisão, podemos estimar a incerteza da corrente elétrica por meio da soma dos quadrados das incertezas padrão relativas associadas a cada grandeza de entrada, conforme equação:

$$\left[\frac{u(X_1 / X_2)}{X_1 / X_2} \right]^2 = \left[\frac{u(X_1)}{X_1} \right]^2 + \left[\frac{u(X_2)}{X_2} \right]^2$$
, em que X_1 e X_2 são grandezas de entrada.

Particularizando para o caso do chuveiro elétrico em análise, temos $\left[\frac{u(I)}{I} \right]^2 = \left[\frac{u(V)}{V} \right]^2 + \left[\frac{u(R)}{R} \right]^2$ em que $I = 0,2745 \text{ A}$; $V = 140 \text{ V}$; $R = 510 \Omega$; $u(R) = 2,0 \Omega$ e $u(V) = 3,0 \text{ V}$.

Logo, temos $\left[\frac{u(I)}{0,2745} \right]^2 = \left[\frac{2,0}{140} \right]^2 + \left[\frac{3,0}{510} \right]^2$, de modo que $u(I) = 0,0042 \text{ A}$. Portanto, a incerteza de medição da corrente elétrica é de $0,0042 \text{ A}$ ou $4,2 \text{ mA}$.

Assim, respeitando as duas regras da incerteza, no seu relatório deve constar que $I = (274,5 + 4,2) \text{ mA}$. As solicitações do gestor foram atendidas e, você tem mais um desafio superado!

O que mais você acrescentaria ao seu relatório? Reflita sobre isso e perceba como a incerteza das grandezas de entrada se relacionam com a incerteza da medida indireta.

Bom trabalho!

Gerente de planta industrial de compostos químicos

Descrição da situação-problema

Suponha que você seja gerente em uma planta industrial de compostos químicos. Em um determinado processo produtivo, o técnico responsável precisava adicionar 650 g de hidróxido de cálcio a uma certa mistura industrial. Por não dispor de um dispositivo mais sofisticado, a medição do composto foi efetuada por meio de uma balança de prato, que atingiu o equilíbrio físico nas seguintes condições: (I) no prato esquerdo foram colocadas as massas padrão m_1 ($201,00 \pm 0,30$) g e m_2 ($500,20 \pm 0,60$) g; (II) e no prato direito, além do hidróxido de cálcio, foi colocada uma massa padrão m_3 ($49,90 \pm 0,10$) g. Seu gestor direto lhe solicitou um relatório acerca da massa de hidróxido de cálcio assim obtida, explicitando a incerteza de medição.

Sabendo que as medições podem ser consideradas variáveis aleatórias não correlacionadas e desprezando as demais fontes de incerteza da balança, como você faria o relatório referente ao processo de medição descrito?

Resolução da situação-problema

Primeiramente, no seu relatório base, você deve se certificar sobre qual massa (X) de hidróxido de sódio que efetivamente foi adicionada no processo industrial, isto é, devemos obter o resultado base da medição indireta.

Para tanto, considerando uma balança de pratos que atingiu o equilíbrio, temos que a massa presente no prato da esquerda deve ser igual à massa presente no prato da direita. No prato da esquerda, tem-se as massas padrão m_1 ($201,00 \pm 0,30$) g e m_2 ($500,20 \pm 0,60$) g; no prato da direita tem-se hidróxido de cálcio (massa desconhecida X) e massa padrão m_3 ($49,90 \pm 0,10$) g.

Logo,

$$m_1 + m_2 = X + m_3$$

$$m_1 + m_2 - m_3 = X$$

$$X = 201,00 + 500,20 - 49,90$$

$$X = 201,00 + 500,20 - 49,90 = 651,30 \text{ g}$$

Assim, embora a recomendação fosse para adicionar 650 g de hidróxido de sódio, na verdade, foi adicionado 651,30 g no processo industrial.

Sabendo-se que as medições são variáveis aleatórias não correlacionadas, podemos determinar a incerteza da medição indireta por meio da lei de combinação das variâncias (soma-subtração), válida para variáveis estatisticamente independentes.

Assim, podemos empregar a equação:

$$u^2(X_1 \pm X_2 \pm \dots \pm X_n) = u^2(X_1) + u^2(X_2) + \dots + u^2(X_n)$$

Para o presente caso, a equação que deve constar no relatório é:

$$u^2(m1 + m2 - m3) = u^2(m1) + u^2(m2) + u^2(m3)$$

$$u^2(m1 + m2 - m3) = 0,30^2 + 0,60^2 + 0,10^2$$

$$u = 0,678 \text{ g}$$

Respeitando as duas regras da incerteza, no seu relatório deve constar que a massa de hidróxido de sódio adicionada foi de $(651,30 \pm 0,68) \text{ g}$.

Faça valer a pena

1. Para medir o volume de uma peça cúbica de um automóvel, a aresta (A) foi medida e o resultado apresentado foi $A = (10 \pm 1) \text{ cm}$. Sabendo que as medições podem ser consideradas variáveis aleatórias não correlacionadas e desprezando as demais fontes de incerteza da balança, podemos aplicar a lei da combinação das variâncias para calcular a incerteza de medição, de modo a considerar:

$$\left[\frac{u(X_1 \cdot X_2 \cdot X_n)}{X_1 \cdot X_2 \cdot X_n} \right]^2 = \left[\frac{u(X_1)}{X_1} \right]^2 + \left[\frac{u(X_2)}{X_2} \right]^2 + \dots + \left[\frac{u(X_n)}{X_n} \right]^2$$

A partir do caso exposto, assinale a alternativa que apresenta corretamente o valor do volume com a sua respectiva incerteza:

- a) $(100 \pm 1,7) \text{ m}^3$
- b) $(100 \pm 1,7) \text{ cm}^3$
- c) $(1000,0 \pm 1,7 \cdot 10^2) \text{ cm}^3$
- d) $(100,0 \pm 1,7 \cdot 10^2) \text{ cm}^3$
- e) $(1000,0 \pm 1,7) \text{ cm}^3$

2. Comumente, usamos a aplicação de conhecimentos de estatística no campo metrológico. Por exemplo, podemos citar que a execução de repetidas medições de um mesmo_____ incorre em indicações distintas em função do(a) _____, impossibilitando a previsão exata do valor da próxima indicação. Logo, podemos afirmar que a indicação obtida de um sistema de medição é também uma _____.

Assinale a alternativa que completa as lacunas corretamente:

- a) Mensurando; erro sistemático; variável aleatória.
- b) Mensurando; erro sistemático; variável constante.
- c) Mensurando; erro aleatório; variável constante.
- d) Mensurando; erro aleatório; variável aleatória.
- e) Mensurando; incerteza; variável constante.

3. As medições indiretas podem ser modeladas matematicamente e, de acordo com este modelo matemático, é possível obter o resultado base e a incerteza de medição. Avalie as afirmações a seguir:

I. A partir da combinação das medições de grandezas de entrada não correlacionadas, bem como da combinação de suas respectivas incertezas, podemos obter o resultado de uma medição indireta.

II. No caso em que a medição indireta é obtida por meio da soma ou da subtração, temos que o quadrado do desvio padrão resultante da soma entre as grandezas associadas ao mensurando é igual à soma dos quadrados dos desvios padrão destas grandezas.

III. No caso em que a medição indireta é obtida por meio da multiplicação ou da divisão presente no modelo matemático que a descreve, temos que o quadrado da incerteza padrão relativa da combinação entre as grandezas associadas ao mensurando é igual à soma dos quadrados das incertezas padrão relativas a estas grandezas.

Considerando as afirmações de I a III, assinale a alternativa correta:

- a) Somente as afirmações I e II são verdadeiras.
- b) Somente a afirmação I é verdadeira.
- c) Somente as afirmações II e III são verdadeiras.
- d) Somente as afirmações I e III são verdadeiras.
- e) As afirmações I, II e III são verdadeiras.

Referências

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5891 – **Regras de arredondamento na numeração decimal**. 1. ed. Brasília: ABNT, 1977.

ALBERTAZZI, Armando G. J; SOUSA, André Roberto de. **Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial**. 1. ed. São Paulo: Editora Manole, 2008.

INMETRO. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. **Vocabulário Internacional de Metrologia**: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados. Rio de Janeiro: INMETRO, 2012.

LIRA, F. A. de. **Metrologia na Industria**. 3. ed. São Paulo: Ed. Erica, 2015.

LIMA JUNIOR, Paulo; SILVEIRA, Fernando Lang da. Sobre as incertezas do tipo A e B e sua propagação sem derivadas: uma contribuição para a incorporação da metrologia contemporânea aos laboratórios de física básica superior. **Revista Brasileira de Ensino de Física** (Impresso), v. 33, p. 2303, 2011.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. **Estatística Aplicada e Probabilidade Para Engenheiros**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012

SILVA, Pedro Paulo Almeida. **Metrologia nas normas, normas na metrologia**. Rio de Janeiro: PUC-Rio, 2003.

Calibração de sistemas de medição e controle geométrico

Convite ao estudo

Caro aluno, vimos, até aqui conceitos fundamentais de metrologia, como: erro de medição, estimativa de erro sistemático, erro aleatório, incerteza de medição, características metroológicas, além de medição direta e medição indireta na presença de uma ou mais fontes de incerteza. Nesta unidade, iniciaremos o estudo do processo de calibração, discutindo os métodos de calibração direta e indireta, o conceito de rastreabilidade e, então, veremos como elaborar um relatório de calibração. Esse assunto é de extrema importância na prática profissional, uma vez que há diversos laboratórios de calibração e métodos correlatos que podem ser aplicados no dia a dia de grandes indústrias.

Assim, na primeira seção da Unidade 3, adentraremos no escopo de confiabilidade metroológica, isto é, iremos refletir a respeito da rastreabilidade e da confiabilidade que se faz fundamental para servir de lastro à credibilidade dos resultados das medições. Posteriormente, na Seção 3.2, estudaremos como escolher, de forma assertiva, um sistema de medição, ponderando aspectos técnicos, econômicos e logísticos. Por fim, na Seção 3.3, vamos explorar o conteúdo de controle geométrico, enfatizando os conceitos de tolerância dimensional e geométrica e os sistemas de tolerâncias e ajustes eixo-furo.

Sob essa perspectiva, vamos considerar que você foi contratado como gestor técnico de um laboratório metroológico que atua com calibração e controle geométrico (especificamente no acoplamento eixo-furo). Sob sua supervisão, foi alocado um

recém-admitido jovem aprendiz com conhecimentos técnicos ainda básicos sobre calibração e controle geométrico, de modo que é sua responsabilidade orientá-lo e supervisionar suas atividades.

Em um primeiro momento, surge uma demanda de calibração de uma balança analítica utilizada internamente nas análises dos eixos e furos e o gestor geral pede a você para que oriente e ensine o jovem aprendiz a executar um processo de calibração. Qual método de calibração você aplicaria e qual roteiro de calibração você o ensinaria a executar para o caso específico da balança analítica?

Em um segundo momento, o gestor geral pede a você para selecionar e enviar para o departamento de compras a solicitação de um instrumento que meça a dimensão externa (como o raio, por exemplo) dos eixos que são analisados para o acoplamento, dando-lhe a opção de compra de um paquímetro ou de um micrômetro. Partindo do pressuposto que ambos os instrumentos conseguem medir a dimensão externa do objeto, quais outros critérios você adotaria para selecionar o sistema de medição mais adequado?

Em um terceiro momento, com o remanejamento do jovem aprendiz para o departamento de controle geométrico, o gestor do laboratório solicita que elabore um protocolo geral de análise de sistemas eixo-furo, explicitando os tipos de ajuste mecânico e como caracterizá-los. O que você colocaria como protocolo para a análise de sistemas eixo-furo a fim de direcionar o trabalho do jovem aprendiz?

Essas questões poderão ser respondidas ao decorrer desta unidade, conforme os conteúdos agora detalhados.

Está preparado para este desafio?

Vamos lá!

Seção 3.1

Calibração e rastreabilidade

Diálogo aberto

Nesta primeira seção, vamos refletir um pouco sobre o processo de calibração, abrangendo a calibração direta e a indireta.

Com certeza, em algum momento, você já deve ter escutado a expressão “esse instrumento está descalibrado”. Muitas vezes, de modo informal, dizemos que o instrumento está com problema, pois não está apresentando a medição correta. De fato, de modo genérico e simplificado, consideramos que a calibração está associada com o nível de credibilidade e qualidade de um resultado de medição, ou seja, podemos afirmar que, ao discutirmos sobre calibração e rastreabilidade, adentramos no escopo da confiabilidade metrológica.

Assim, nesta seção, iremos refletir a respeito da rastreabilidade e da confiabilidade que se faz fundamental para servir de lastro à credibilidade dos resultados das medições.

Considere que você foi contratado como gestor técnico de um laboratório metrológico que atua com calibração e controle geométrico (especificamente no acoplamento eixo-furo de pequena dimensão). Sob sua supervisão, foi alocado um recém-admitido jovem aprendiz com conhecimentos técnicos ainda básicos sobre calibração e controle geométrico, de modo que é sua responsabilidade orientá-lo e supervisionar suas atividades.

Em um primeiro momento, surge uma demanda de calibração de uma balança analítica (faixa de 0 a 500 g; resolução 0,01 g) utilizada internamente nas análises dos eixos e furos de pequena dimensão e o gestor geral pede que você oriente e ensine o jovem aprendiz a executar um processo de calibração.

Qual método você aplicaria e qual roteiro de calibração ensinaria ao jovem aprendiz a executar para o caso da balança analítica?

Desenvolva seu raciocínio e apresente o roteiro de calibração, conforme solicitado pelo gestor geral.

A partir de agora, mãos à obra e se empenhe com dedicação e com entusiasmo, para aproveitar esse conteúdo e fazer a diferença em sua carreira.

Tenha um excelente estudo!

Não pode faltar

Vamos começar nosso estudo refletindo a respeito de confiabilidade metrológica e a sua correlação com o processo de calibração.

Primeiramente, de acordo com o senso comum, quando nos deparamos com um instrumento que não está calibrado, intrinsecamente já começamos a pensar que os resultados advindos daquela medição podem não estar corretos, isto é, aumentamos a nossa dúvida sobre a indicação apresentada pelo sistema de medição.

Claro que o impacto de um instrumento não calibrado, ou seja, o impacto do aumento da dúvida e da taxa de erro associada à medição pode ser algo simples ou então totalmente desastroso, certo? Por exemplo, se uma dona de casa necessita fazer um bolo e, para isso, utiliza uma balança de cozinha que não esteja calibrada para medir a massa de algum ingrediente, o que pode acontecer é a receita não dar certo, desde o fato do bolo não crescer ou até não estar com um sabor agradável. Agora, imagine o caso em que uma auxiliar de enfermagem necessita fazer a diluição de um composto farmacêutico para administrar em um paciente e, para isso, seja necessário medir a massa de fármaco a ser adicionada em uma solução. Se a profissional da saúde utilizar uma balança analítica não calibrada, certamente ocorrerá um erro de diluição, de modo que o aumento da concentração do fármaco em solução pode alcançar níveis extremamente tóxicos e ser fatal ao paciente.

Assim, já vimos que os sistemas de medição possuem erros, os quais variam ao longo do tempo, afetando a qualidade dos resultados

e influenciando de modo direto a incerteza de medição. É justamente neste contexto que calibrações rotineiras dos instrumentos ou sistemas de medição tornam-se fundamentais, a fim de conferir uma otimização da credibilidade dos resultados das medições e, assim, aumentar a confiabilidade das decisões (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008).

Estamos falando sobre confiabilidade metrológica e, primeiramente, você deve entender o conceito de confiabilidade. Segundo Fogliatto e Ribeiro (2009), confiabilidade, do modo mais amplo e sob uma abordagem qualitativa, pode ser entendida como um vínculo a uma operação bem sucedida de um sistema, na ausência de quebras ou falhas.

Aprofundando o conceito, sob uma abordagem quantitativa, associamos confiabilidade à probabilidade, conforme proposto por Leemis (1995). Assim, a confiabilidade de sistema está agregada a sua probabilidade em desempenhar adequadamente o seu propósito de uso especificado, considerando um período de tempo definido e sob condições ambientais predeterminadas.

Nesta última definição, como a confiabilidade corresponde a uma probabilidade, então temos que o valor de confiabilidade deve estar entre 0 e 1, e, ainda que todos os axiomas vinculados à probabilidade também podem ser aplicados para a obtenção da confiabilidade.

O desempenho adequado de um sistema, seja sistema de medição (em metrologia) ou qualquer outro, é comumente descrito por um modelo binário, de acordo com o qual o sistema pode estar em estado de funcionamento (o que seria o desempenho adequado) ou pode estar em estado de falha.

Para distinguir o que seria um estado de funcionamento daquele de falha, comumente adota-se um padrão como referência, o qual vai corresponder ao desempenho adequado do sistema. Assim, se queremos, por exemplo, analisar um automóvel e o padrão é um carro que deve se movimentar, mesmo que o carro esteja sem o escapamento, como ainda é possível que ele se movimente, podemos dizer que este automóvel continuará a apresentar um desempenho adequado (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

Lembre-se de que na, Unidade 1, vimos a respeito de medida materializada, que serve de padrão por ter seu valor verdadeiro conhecido. Vamos retomar este assunto agora.

Repare, ainda, que confiabilidade está associada ao uso específico do sistema. Assim, um paquímetro que foi fabricado para operar na faixa de medição de até 150 mm, por exemplo, não deve ser empregado em uma medição que requeira uma faixa superior a esta, pois ele foi projetado para uma carga de uso distinta, o que pode impactar em seu desempenho.

Por fim, vale a pena ressaltar que a confiabilidade depende do tempo, de modo que é considerado o período de tempo até a falha. A consequência disso é a necessidade de manutenção periódica nos diferentes sistemas, englobando a execução do processo de calibração, quando requerido.

Assimile esses conceitos, pois vamos detalhá-los e aplicá-los para o escopo metrológico ainda nesta seção.



Assimile

Repare que o conceito de confiabilidade pode ser descrito por meio de uma abordagem qualitativa ou quantitativa, a partir da associação com probabilidade.

De qualquer forma, tenha em mente que a confiabilidade sempre está associada ao sucesso de funcionamento de uma sistema.

Segundo o Vocabulário Internacional de Metrologia, entende-se calibração como:



Operação que estabelece, sob condições especificadas, numa primeira etapa, uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas; numa segunda etapa, utiliza esta informação para estabelecer uma relação visando a obtenção dum resultado de medição a partir duma indicação. (INMETRO, 2012)

Albertazzi e Sousa (2008) colocam calibração como um processo desenvolvido experimentalmente, por meio do qual verifica-se a relação entre os valores do mensurando e os valores indicados pelo instrumento ou sistema de medição. De modo mais detalhado, os autores conceituam calibração não apenas como uma operação, mas como um conjunto de operações desenvolvidas em condições específicas, por meio das quais é possível determinar a relação entre os valores indicados por um sistema de medição e os valores equivalentes das grandezas estabelecidos por padrões.



Refleta

Refletindo a respeito do conceito de calibração, por que é necessário o uso de padrões, a fim de desenvolver esse processo?

Conforme vimos na Unidade 1, padrão vincula-se a um objeto cujo valor de referência é muito bem conhecido, isto é, é sabido o valor verdadeiro desse artefato e a sua incerteza é baixa, a fim de permitir utilizá-lo como referência para a medição. Por exemplo, podemos citar os blocos padrão de comprimento, blocos padrão de dureza, massa padrão, resistor padrão, gerador padrão de sinais, entre outros (INMETRO, 2012). A Figura 3.1 ilustra: o bloco padrão de comprimento (Figura 3.1A), o resistor padrão (Figura 3.1B) e o padrão do quilograma Figura 3.1C).

Figura 3.1 | Exemplos de padrões utilizados em metrologia, com destaque para (A) blocos padrão, (B) resistor padrão e (C) padrão do quilograma



A



B



C

Fonte: <http://www.labmetro.ufsc.br/livroFMCI/slides_powerpoint.html>. Acesso em: 28 maio 2017.

Refletindo a respeito das duas definições de calibração, podemos entender esse conceito como um processo formado por um conjunto de operações que são desenvolvidas em condições especificadas, que nos permite avaliar a relação entre os valores indicados pelo instrumento ou sistema de medição e os valores equivalentes das grandezas estabelecidas por padrões. Em metrologia, lembre-se de que as calibrações são desenvolvidas próximas a 20°C. Perceba também que o uso de padrão é fundamental para o processo de calibração, pois é ponto que serve de referência para analisar a coerência com as indicações apresentadas pelo sistema de medição (LIRA, 2015).

Vale a pena citar que a calibração não se aplica somente aos instrumentos ou sistemas de medição, de modo que é possível e fortemente recomendável que ocorra a calibração de medidas materializadas periodicamente, a fim de que continuem a cumprir o propósito para o qual foram fabricadas. Dessa forma, por exemplo, podemos atestar o valor efetivo de um bloco ou de uma massa padrão por meio da calibração e, para isso, também são empregadas medidas de referência, de forma análoga ao sistema de medição.

O intuito de calibrar refere-se ao fato de que a especificação técnica de um instrumento ou sistema de medição não garante desempenho satisfatório. Além disso, por meio da calibração, é possível assegurar a manutenção das características do sistema com o tempo. Assim, segundo Albertazzi e Sousa (2008), é esperada a calibração de um paquímetro ou de uma trena a cada 6 meses; balança a cada 12 a 36 meses; bloco padrão a cada 12 meses; massa padrão a cada 24 meses etc. Ressalta-se que esse tempo varia de acordo com a intensidade de uso, condições de medição, entre outros fatores.

Os resultados advindos do processo de calibração englobam a determinação do valor do mensurando; determinação do valor do erro do instrumento e, conseqüentemente, das correções a serem aplicadas no instrumento ou sistema de medição; análise dos efeitos das grandezas de influência, como o número de medições, técnica de medição; e comportamento em condições especiais ou adversas, como temperaturas muito altas ou muito baixas, radiação nuclear aguda, entre outros (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008).

Por meio de certificados ou relatórios de calibração, é possível documentar esse processo. Em um certificado de calibração, minimamente, é necessário que contenha:

1. Descrição e identificação do sistema de medição que será calibrado.
2. Data de calibração.
3. Identificação dos procedimentos de calibração a serem adotados.
4. Padrão que foi empregado e sua incerteza, explicitando a data e a entidade que executou a calibração deste objeto.
5. Condições ambientais sob as quais foi desenvolvida a calibração.
6. Resultados da calibração obtidos.
7. Descrição se, por ventura, houve a realização de manutenções, ajustes, regulagens ou reparos.
8. Descrição se houve limitação de uso, como faixa de medição restrita.
9. Identificação e assinaturas dos responsáveis pelo processo de calibração.
10. Número de série ou equivalente do certificado.



Pesquise mais

Podemos documentar os resultados de medição por meio de certificados de calibração ou por relatórios de calibração. É muito importante que você veja e analise um certificado de calibração para melhor compreender o seu significado. Acesse o link a seguir, do Laboratório de Metrologia e Automatização da Universidade Federal de Santa Catarina:

LABMETRO. **Calibração e sistemas de medição**. Disponível em: <http://www.labmetro.ufsc.br/livroFMCI/slides_powerpoint.html>. Acesso em: 28 maio 2017.

Previamente à execução do processo de calibração, desenvolve-se um roteiro de calibração, que contempla os itens de 1 a 5 presentes no certificado de calibração. No roteiro deve conter todas as diretrizes para a realização desse processo, desde a escolha do padrão até o procedimento experimental. Neste sentido, vale ressaltar que a escolha do padrão, está diretamente ligada à faixa de medição do

instrumento a calibrar, de modo que sempre se emprega um conjunto de padrões a fim de cobrir toda a faixa de medição do instrumento que é utilizada. Além disso, no roteiro deve conter a temperatura, umidade e outros parâmetros ambientais de desenvolvimento da calibração, que normalmente ocorre em laboratórios com condições ambientais controladas, a fim de garantir a assertividade dos resultados. Os procedimentos de calibração são de fundamental importância e devem simular as ações de uso real para aquele instrumento. Assim, por exemplo, deve contemplar como os padrões foram medidos, quantas vezes foram medidos, em quais posições foram medidos, entre outros aspectos.

Ainda sobre a calibração, podemos ter direta ou o método de calibração indireta. A principal diferença entre eles deve-se ao fato de aplicarmos o método indireto para os casos em que as grandezas a serem avaliadas não possuem um padrão. Podemos citar a velocidade, que, diferentemente de comprimento, massa, entre outros, não pode ser materializada.

Sendo assim, na calibração direta, temos que o padrão é diretamente submetido ao sistema de medição que será calibrado e, então, compara-se ao valor verdadeiro do padrão com a indicação do sistema de medição a calibrar. Já na calibração indireta, é necessário um dispositivo auxiliar, comparando a indicação do sistema de medição a calibrar com a indicação do sistema de medição padrão (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008).



Exemplificando

A título de exemplificação, podemos citar a calibração de um paquímetro ou de uma trena eletrônica por meio do emprego de blocos padrão, sendo um caso típico de calibração direta.

Um caso de calibração indireta refere-se ao procedimento executado em um velocímetro a calibrar, uma vez que não temos um padrão para velocidade. Dessa forma, utiliza-se como sistema de medição padrão uma roda auxiliar, um gerador e um voltímetro. A roda fixada na parte posterior do carro é transmitida a um gerador de corrente contínua, que

produz uma tensão elétrica de 1 volt para cada 100 rpm. O gerador está conectado a um voltímetro, capaz de indicar a tensão produzida pelo gerador. Para calcular a velocidade em km/h, é necessário multiplicar a tensão indicada pelo voltímetro pela constante do sistema de medição $15,080 \frac{\text{km/h}}{\text{V}}$. Então, compara-se a indicação da velocidade pelo velocímetro com a indicação do dispositivo auxiliar, que funciona como um sistema padrão (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008).

Quando falamos em calibração, um cuidado deve ser exercido a fim de não confundir a calibração com um simples ajuste ou uma mera verificação do sistema de medição. Assim, além da calibração, existem outras três operações correlatas: verificação, ajuste e regulagem.

A verificação pode ser entendida como uma calibração simplificada cujo intuito, como a própria denominação indica, é verificar se o sistema de medição está funcionando de acordo, isto é, verificar se a indicação do sistema de medição coincide com a medida materializada empregada. Na área de Metrologia Legal, a operação de verificação é muito utilizada, de modo que, periodicamente, os meios de medição usados no comércio (taxímetro, bomba de combustível etc.) passam por verificações.

O ajuste caracteriza-se por ser uma operação corretiva e pode ser automático, semiautomático ou manual, sendo normalmente executado por técnico da área. A função do ajuste é coincidir a indicação do sistema de medição com a especificação do padrão e, como exemplo, podemos citar o ajuste do zero de um manômetro.

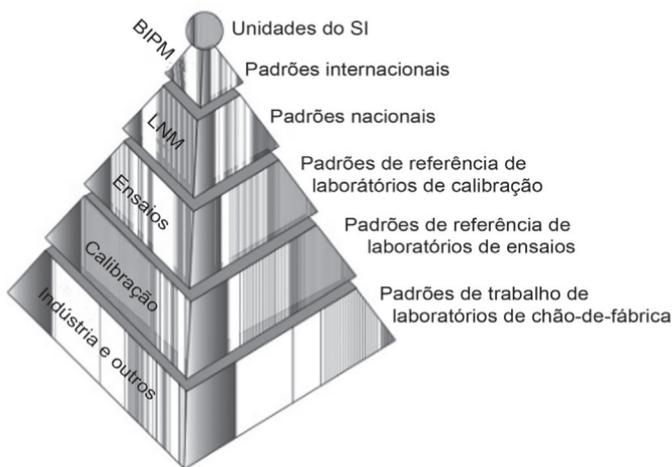
Por fim, temos a regulagem, que também é um procedimento corretivo a fim de coincidir o valor da indicação do instrumento com o valor verdadeiro da medida materializada. Na verdade, a regulagem pode ser entendida como um ajuste simplificado, podendo ser executada pelo próprio usuário, como zerar (tarar) uma balança eletrônica usando um recurso do sistema acessível ao usuário (como apertar o botão de tara, neste caso) (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008).

Entendido o conceito de calibração e a importância da medida materializada para a execução da calibração, é necessário entender

qual é a referência para a fabricação do padrão. Em outras palavras, entende-se que o padrão serve de referência para a calibração, mas, por sua vez, qual foi a referência empregada para o desenvolvimento do padrão?

Pois então, assim adentramos no conceito de rastreabilidade. Sabemos que o padrão tem uma incerteza (denominada incerteza expandida, conforme visto na Unidade 2) associada a ele, requerendo o padrão do padrão (PP). Esse padrão, por sua vez, também requer calibrações que devem ser feitas por meio do uso de outro padrão, incorrendo no padrão do padrão do padrão (PPP) (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008). Sendo assim, temos uma cadeia de relacionamentos hierárquicos que pode ser descrita por meio de uma pirâmide (Figura 3.2), na qual o elemento presente no topo refere-se à definição da unidade de medida segundo o Sistema Internacional de Unidade (SI), ou seja, trata-se do padrão com a menor incerteza possível.

Figura 3.2 | Hierarquia do sistema metrológico.



Fonte: Albertazzi e Sousa (2008, p. 142).

Perceba que, abaixo dos padrões do SI, a pirâmide segue com padrão nacional, ou seja, aplica-se os padrões nacionais como referência para rastrear todos os demais padrões de um país (LIRA, 2015). Logo, os padrões dos laboratórios de calibração são calibrados

de acordo com aqueles nacionais como referência. Esses padrões servem como referência para os padrões de laboratórios de ensaio, cuja responsabilidade engloba a avaliação de produtos que buscam certificação. Na base da pirâmide, apresentando a maior incerteza em relação aos demais padrões de referência, encontram-se os padrões de trabalho empregados no chão de fábrica, que devem ser calibrados adotando como referência os padrões dos laboratórios de ensaio.

Observamos que a pirâmide demonstra uma cadeia contínua de comparações, todas tendo incertezas estabelecidas. A partir daí, segundo o Vocabulário Internacional de Metrologia (INMETRO, 2012, p. 28), tem-se o conceito de rastreabilidade como sendo a “propriedade dum resultado de medição pela qual tal resultado pode ser relacionado a uma referência através duma cadeia ininterrupta e documentada de calibrações, cada uma contribuindo para a incerteza de medição”. Dessa forma, o gerenciamento da rastreabilidade dos padrões utilizados nas medições deve ser eficiente e de fácil gestão, a fim de assegurar a confiabilidade metrológica e servir de lastro à credibilidade dos resultados das medições (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008).

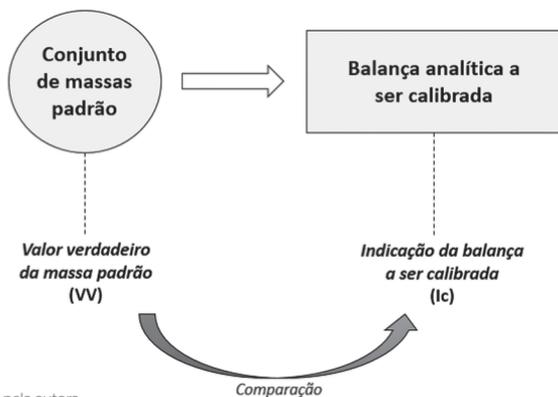
Sem medo de errar

Lembre-se de que na presente unidade você está no lugar de um gestor técnico e precisa orientar um jovem aprendiz a executar um processo de calibração. Assim, em um primeiro momento, foi solicitado a você que oriente e ensine o jovem aprendiz a executar um processo de calibração, considerando uma balança analítica.

Inicialmente, você deve esclarecer a ele que o processo de calibração partilha de dois métodos: calibração direta e calibração indireta. Na calibração direta, temos que o padrão é diretamente submetido ao sistema de medição que será calibrado e, então, compara-se o valor verdadeiro do padrão com a indicação do sistema de medição a calibrar. Já na calibração indireta, é necessário um dispositivo auxiliar, de modo que se compara a indicação do sistema de medição a calibrar com a indicação do sistema de medição padrão.

No presente caso, há uma demanda para calibrar uma balança analítica utilizada para determinar a massa dos eixos e furos que são analisados no departamento de controle geométrico. Para a balança, que é um medidor de massa, há uma grande variedade de massas padrão que podem ser facilmente empregadas a fim de calibrar este sistema de medição. Logo, inicialmente, seria importante você deixar claro ao jovem aprendiz que se utiliza o método de calibração direta para a balança analítica, considerando que um conjunto de massas padrão deve ser submetido diretamente ao sistema de medição ao ser calibrado e, então, será comparado com a indicação do sistema com o valor verdadeiro da massa padrão, conforme mostra a Figura 3.3.

Figura 3.3 | Ilustração da calibração direta para uma balança analítica a partir do emprego de um conjunto de massas padrão



Fonte: elaborada pela autora.

Quanto ao roteiro de calibração, conforme solicitado pelo gestor geral para o jovem aprendiz, lembre-se de que este deve conter: descrição e identificação do sistema de medição que será calibrado; data em que ocorrerá a calibração; identificação dos procedimentos de calibração a serem adotados; padrão que será empregado e sua incerteza, explicitando a data e a entidade que executou a calibração deste objeto; e condições ambientais sob as quais será desenvolvida a calibração.

Inicialmente, deve ser colocado no roteiro a identificação do instrumento que será calibrado: balança analítica; fabricante da balança; modelo da balança; número de série da balança; faixa de medição da balança 0 a 500 g; e resolução 0,01 g.

Posteriormente, parte-se para a escolha do padrão. A escolha do padrão está diretamente ligada à faixa de medição do instrumento a calibrar, de modo que sempre se emprega um conjunto de padrões a fim de cobrir toda a faixa de medição do instrumento que é utilizada. Logo, neste caso, poderia ser empregado um conjunto de massas padrão entre 1 a 500 g e deve ser colocada, também, a incerteza da massa padrão, além do seu número de registro e rastreabilidade.

No roteiro, deve conter a temperatura e outros parâmetros ambientais de desenvolvimento da calibração, a fim de garantir a assertividade dos resultados. Logo, deve ser assegurado que a temperatura esteja controlada a 20 graus Celsius e, de preferência, com umidade relativa do ar entre 40 a 60%. Caso as medições, em situações reais, sejam realizadas em temperaturas especiais ou adversas, deve constar no roteiro que estes testes, posteriormente, devem ser desenvolvidos nestas condições.

Os procedimentos de calibração são de fundamental importância e devem simular as ações de uso real para aquele instrumento. No caso da balança, comumente, as massas padrão podem ser medidas em três posições diferentes, simulando condições reais de medição, e também podem ser considerados cinco ciclos de medição para cada massa padrão.

Com o que estudou até aqui, você acrescentaria algo a mais no roteiro de calibração?

Pense a respeito!

Avançando na prática

Escolha de padrão para calibração de um paquímetro

Descrição da situação-problema

Suponha que você foi contratado como técnico de um laboratório de calibração e sua primeira atividade, demandada pelo gestor técnico, é direcionar a escolha de padrões para a calibração de um paquímetro que mede dimensões externas, com faixa de medição de 0 a 150 mm e resolução de 0,02 mm.

Como você escolheria esses padrões e quais as especificações que consideraria para essa escolha? Lembre-se de que você tem que embasar sua indicação em um relatório para o seu gestor.

Resolução da situação-problema

No seu relatório, será necessário salientar que a escolha do padrão está diretamente ligada à faixa de medição do instrumento a calibrar, de modo que sempre se emprega um conjunto de padrões a fim de cobrir toda a faixa de medição do instrumento.

Por se tratar de um paquímetro, que mede comprimento, emprega-se blocos padrão. Considerando a faixa de medição de 0 a 150 mm, devemos empregar blocos padrão que varram essa faixa, sendo uma indicação o seguinte conjunto: 2,500 mm; 5,000 mm; 10,000 mm; 30,000 mm; 50,000 mm; 70,000 mm; 90,000 mm; 110,000 mm; 130,000 mm; e 150,000 mm.

Deve-se considerar, além do comprimento do bloco padrão, a sua incerteza.

Caso você queira aprofundar seu relatório, poderá propor que os blocos padrão sejam medidos em três posições diferentes, simulando condições reais de medição, e também podem ser considerados cinco ciclos de medição para cada bloco padrão.

Bom trabalho!

Faça valer a pena

1. A calibração é de extrema importância para assegurar a confiabilidade metrológica. Considere as afirmações I, II e III:

I. O intuito de calibrar refere-se ao fato de que a especificação técnica de um instrumento ou sistema de medição não garante desempenho satisfatório.

II. Por meio da calibração, é possível assegurar a manutenção das características do sistema com o tempo.

III. Não é recomendável a calibração do padrão, como massa padrão, bloco padrão, entre outros.

Considerando o intuito do processo de calibração, assinale a alternativa correta:

- a) Somente a afirmação I é verdadeira.
- b) Somente as afirmações I e II são verdadeiras.
- c) Somente a afirmação III é verdadeira.
- d) Somente as afirmações II e III são verdadeiras.
- e) As afirmações I, II e III são verdadeiras.

2. Além da calibração, existem outras 3 operações correlatas que não substituem o processo de calibração, mas têm como intuito analisar e/ou corrigir o sistema de medição, a fim de que coincida a indicação do sistema de medição com a medida materializada empregada.

Assinale a alternativa que apresenta corretamente as três operações citadas:

- a) Verificação; ajuste; regulação.
- b) Verificação; correção; regulação.
- c) Correção; ajuste; regulação.
- d) Verificação; ajuste; calibração indireta.
- e) Verificação; ajuste; calibração direta.

3. A pirâmide de hierarquia metrológica demonstra uma cadeia contínua de comparações, todas tendo incertezas estabelecidas. Qual é o conceito e quais são os elementos que estão no topo e na base da pirâmide, apresentando a menor e a maior incerteza, respectivamente?

- a) Conceito de rastreabilidade; padrões nacionais; padrões do chão de fábrica.
- b) Conceito de confiabilidade; padrões do SI; padrões dos laboratórios de ensaio.
- c) Conceito de ajuste; padrões do chão de fábrica; padrões nacionais.
- d) Conceito de confiabilidade; padrões do SI; padrões nacionais.
- e) Conceito de rastreabilidade; padrões do SI; padrões do chão de fábrica.

Seção 3.2

A escolha do sistema de medição e ponderação de critérios

Diálogo aberto

Nesta seção vamos estudar como conduzir a escolha de um instrumento ou sistema de medição, pautados em critérios objetivos de cunho técnico, econômico e logístico.

Assim, ao pensarmos em comprar um instrumento de medição, devemos refletir se o dispositivo atende ao propósito da medição; se as características metrológicas do instrumento estão de acordo com o que se pretende obter, pensando em faixa de medição, faixa nominal, resolução, sensibilidade, entre outros; se o dispositivo apresenta um custo compatível com o que se está disposto a investir; se a manutenção deste instrumento é viável do ponto de vista técnico e econômico; entre outros.

Conforme veremos adiante, a escolha do sistema de medição está diretamente vinculada ao seu sucesso, sendo um fator chave, a fim de otimizar a incerteza desse processo.

Retomando o nosso contexto, vamos considerar que você foi contratado como gestor técnico de um laboratório metrológico que atua com calibração e controle geométrico (especificamente no acoplamento eixo-furo). Em um primeiro momento, você foi alocado para acompanhar o jovem aprendiz e direcionar um roteiro de calibração para a balança utilizada na determinação da massa de eixos-furos.

Agora, em um segundo momento, o gestor geral pede que você selecione, com urgência, e envie para o departamento de compras um relatório de solicitação de compra de um instrumento que meça a dimensão externa (raio) dos eixos de cerca de 35 mm e com baixa tolerância que são analisados para o acoplamento, dando-lhe a opção de compra de um paquímetro ou de um micrômetro. Partindo do pressuposto que ambos instrumentos conseguem medir a dimensão externa do objeto, quais outros critérios você adotaria para selecionar o sistema de medição mais adequado?

Desenvolva seu raciocínio e apresente a solicitação de compra ao respectivo departamento. Não se esqueça de embasar sua escolha, apontando os critérios empregados para tal ação, a fim auxiliar o time de compras.

A partir de agora, mãos à obra e se empenhe com dedicação e com entusiasmo, para aproveitar esse conteúdo e fazer a diferença em sua carreira.

Tenha um excelente estudo!

Não pode faltar

Estamos avançando nosso estudo em metrologia e, nesta seção, vamos estudar como selecionar um instrumento ou sistema de medição, considerando diferentes aspectos.

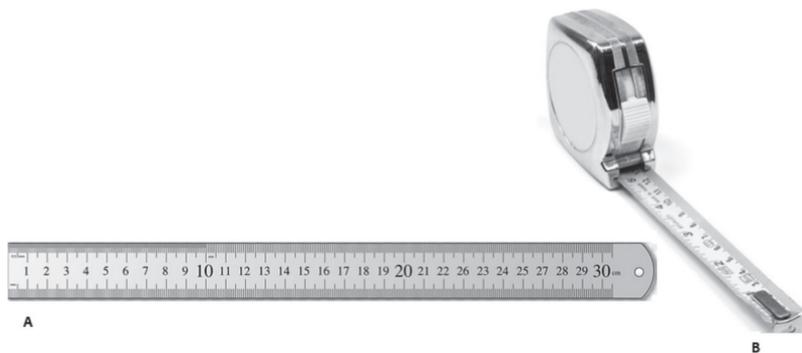
De modo geral, um ponto fundamental para nortear a escolha do dispositivo pauta-se no fato de que o instrumento ou sistema deve atender às necessidades do laboratório, da indústria ou mesmo do usuário doméstico que executará o processo de medição.

Certamente, a escolha de um instrumento em detrimento de outro faz parte do seu cotidiano, por exemplo, normalmente, como estudante, você deve trazer na sua mochila ou utilizar bastante em seu espaço de estudo uma régua de acrílico, plástico ou alumínio com faixa de medição de 0 a 30 cm e resolução de 0,1 cm, conforme mostra a Figura 3.4A. Contudo, você já refletiu do porquê de não utilizar uma trena plástica (faixa de medição 150 cm e resolução 0,1 cm) no lugar da régua, uma vez que apresenta maior faixa de medição e ainda te poupa espaço ao guardá-la junto com outros materiais, (Figura 3.4B)?

Provavelmente, você está pensando que a sua escolha pela régua não se fez devido ao simples fato de economizar ou não espaço na alocação dos seus materiais e na conveniência ou não de transporte, certo? Na verdade, ao comprar a régua, você, intuitivamente, deve ter considerado o propósito do uso desse dispositivo na faculdade; até quanto esse instrumento conseguiria medir, isto é, a faixa de

medição da régua; se era acessível obter o objeto, tanto em termos de custo quanto de facilidade em encontrar o dispositivo; entre outros aspectos.

Figura 3.4 | Exemplos de instrumentos de medição semelhantes, considerando (A) uma régua e (B) uma trena



Fonte: (A) <<https://pixabay.com/pt/%C3%A9gua-medida-comprimento-metro-cm-146428/>> e (B) <<https://pixabay.com/pt/cent%C3%ADmetro-equipamentos-polegadas-15656/>>. Acesso em: 4 jun. 2017

De fato, se refletirmos sobre o nosso cotidiano, iremos perceber que os sistemas de medição fazem parte da nossa vida em sociedade, de modo que cada sistema acaba sendo empregado para um propósito específico.

Por exemplo, um cozinheiro tem suas necessidades atendidas caso utilize uma balança de cozinha para desenvolver suas receitas, enquanto que uma farmácia de manipulação deve fazer uso de uma balança analítica com resolução milesimal para garantir a assertividade da formulação. Por sua vez, no comércio, em feiras livres, por exemplo, ainda se utiliza a balança de pratos, diferentemente, se considerarmos um processo produtivo no qual há necessidade de medir um grande volume de peças e com alta velocidade, então certamente outro sistema deve ser considerado.

Assim, ao pensarmos em selecionar um sistema de medição, devemos considerar se o dispositivo atende ao propósito da medição; se as características metrológicas do instrumento estão de acordo com o que se pretende obter; como é o atendimento pós-venda do fabricante o prazo de entrega do sistema; se o dispositivo apresenta um custo compatível com o que se está disposto a investir; se a

manutenção deste instrumento é viável do ponto de vista técnico e econômico; se o dispositivo apresenta praticidade operacional; custo de operação do sistema; entre outros.



Refleta

O avanço tecnológico foi acompanhado pela expansão da área metrológica, culminando no desenvolvimento de uma diversidade de sistemas de medição. Assim, se nesta seção vamos estudar um modo de conduzir a seleção de instrumentos ou sistemas de medição, certamente deve ser importante o fato de saber executar a escolha correta.

Logo, quais seriam os principais problemas advindos da má escolha de um sistema de medição?

A diversidade de sistemas de medição possibilita a execução de operações específicas de modo plenamente satisfatório. Contudo, deve-se ressaltar que a importância da seleção adequada do sistema de medição está diretamente relacionada com as múltiplas consequências de uma má escolha, englobando (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008):

- Incerteza de medição dos resultados de modo a não atender às necessidades do processo.
- Vida útil curta do dispositivo, bem como excesso de manutenção, uma vez que o sistema está sendo empregado de um modo diferente do especificado.
- Elevação do custo de manutenção e calibração, devido à necessidade frequente de operações com esse escopo.
- Aumento do custo ou do tempo de operação.
- Deficiência na assistência técnica.
- Impossibilidade de integração com sistemas computacionais ou outros sistemas já existentes na operação.
- Comprometimento da qualidade final do produto ou processo.

A seleção do sistema de medição deve ser pautada em critérios objetivos de cunho técnico, econômico e logístico. Exploraremos adiante cada um destes quesitos, mas já vale esclarecer que os

aspectos técnicos se referem às necessidades técnicas do processo de medição; os aspectos econômicos envolvem análise de custos vinculados à seleção de determinado sistema de medição; e os aspectos logísticos abrangem a avaliação de itens como prazo de entrega do sistema, pós-venda, manutenções, entre outros.

Assim, para começar a selecionar o sistema de medição adequado, o primeiro passo é caracterizar bem a tarefa de medição, isto é, torna-se necessário definir um conjunto de parâmetros e, depois, valorar cada sistema de medição quanto ao atendimento às especificações da tarefa de medição.

Ao se analisar a tarefa de medição, inicialmente, devemos considerar o *que medir*, sendo necessária uma definição clara do mensurando. Neste caso, exemplos de mensurando seriam a massa de cilindro; o raio de um eixo; o volume de uma esfera; a temperatura de uma câmara fria; entre outros.

Posteriormente, devemos refletir sobre o *porquê de medir*, a fim de ressaltar quais são os parâmetros principais que devem ser plenamente atendidos. Por exemplo, necessita-se medir a temperatura da câmara fria para desenvolver um processo de controle de qualidade do produto ou embasar uma pesquisa de mercado.

Depois, caracterizamos a tarefa sobre *onde medir e como medir*. O local em que será desenvolvido o processo de medição é de fundamental importância, a fim de delinear as condições de medição. Por exemplo, em muitos processos produtivos, uma medição pode ser realizada em diferentes locais, sendo necessário um instrumento portátil e adequado para a temperatura de medição do local especificado. Também, o procedimento de medição deve ser bem definido, para assegurar a confiabilidade metrológica, englobando a técnica a ser empregada, o tratamento da amostra a ser medida (se necessário), entre outros.

Desde a caracterização da tarefa, já devemos considerar a faixa de medição (faixa de valores do mensurando para a qual o sistema de medição foi desenhado para operar, sendo estabelecida pelo fabricante) e a resolução (menor diferença entre indicações que pode ser significativamente percebida) requerida para o processo de medição em análise, conforme vimos na Unidade 1.

Assim, por exemplo, se em processo produtivo necessita-se medir diferentes peças com dimensões distintas, é interessante que

se analise o conjunto de peças e sua especificidade para determinar a extensão da faixa de medição e a resolução, que pode ser mais grosseira (somente número interior, por exemplo) ou pode ser bem pequena, como nos instrumentos centesimais. A resolução está associada à exatidão esperada para a medição, de modo que quanto maior a necessidade de exatidão (por exemplo, no caso da farmácia de manipulação, os milésimos do valor de uma medição são significativos), menor deve ser a resolução do sistema.

Ainda na caracterização da tarefa de medição, consideramos a incerteza de medição. Pensando no controle de qualidade, sabemos que cada produto tem sua tolerância, correspondendo à faixa de variação aceitável para uma característica produto. Para isso, Albertazzi e Sousa (2008) propõem uma relação ideal entre intervalo de tolerância e incerteza de medição, conforme Equação 3.1:

$$IM = \frac{IT}{10} \quad (\text{Equação 3.1}),$$

IM = incerteza de medição; IT = intervalo de tolerância, que corresponde à diferença entre o maior (limite superior de tolerância) e o menor (limite inferior de tolerância) valor aceitável para a característica do produto.

Dessa forma, processos de medição com incerteza igual ou inferior a 10% do intervalo de tolerância do produto são adequados para fins de controle de qualidade



Exemplificando

Vamos refletir a respeito de como dimensionar um processo de medição compatível para o controle de qualidade de pacotes de salsicha cuja especificação da massa é de (500 ± 10) g.

A partir do valor de especificação da massa, podemos entender que a pequena diferença de 10 g a mais ou a menos no pacote de salsicha será aceitável para o consumidor.

Assim, temos que a faixa entre 490 e 510 g refere-se ao limite inferior de tolerância e limite superior de tolerância, respectivamente, incorrendo em um intervalo de tolerância igual a $IT = 510 - 490 = 20\text{g}$

Logo, considerando que a incerteza de medição ideal para processos

de controle de qualidade deve ser igual a $IM = \frac{IT}{10}$, temos $IM = \frac{20}{10} = 2 \text{ g}$.

Sendo assim, para dimensionar o processo de medição para fins de controle de qualidade, a incerteza do processo deve ser de até 2g.

Logo, para fins de controle de qualidade, deve-se empregar uma balança com um erro máximo de até 2g.

Ainda quanto à tarefa de medição, há outros requisitos que devem ser considerados de acordo com a especificidade de cada processo, como: a velocidade em que necessita-se que a medição ocorra (número de peças medidas por unidade de tempo); nível de automação da tarefa, que pode ser manual, na qual a medição e o registro da indicação são manuais: semiautomática, maneira na qual os sistemas de medição são operados manualmente, mas estão acoplados a sistemas computacionais de forma que o registro dos dados é automático: ou automática, no qual a operação, processamento e análise totalmente automatizados; entre outros.

Percebemos, então, que os parâmetros que caracterizam a tarefa são de extrema importância para a seleção do sistema de medição e, por meio deles, inicia-se o processo de escolha do instrumento adequado.

Compartilhando muitos itens em comum, a análise dos aspectos técnicos complementa a caracterização da tarefa, isto é, a clara definição da tarefa fornecerá insumos para a avaliação dos aspectos técnicos.

Primeiramente, no tocante aos quesitos técnicos, avalia-se a adequação do sistema de medição ao mensurando, ou seja, deve ser analisado se o sistema de medição atende ao mensurando especificado na tarefa, considerando os itens *o que medir e como medir* da tarefa. Por exemplo, sabemos que o instrumento de medição deve ser adequado do ponto de vista físico, de modo que se é necessário fazer a medição externa de uma peça, devemos considerar que um instrumento destinado somente à medição interna, ou que requeira modificações físicas severas para medir a dimensão externa, não seria o mais adequado.

O segundo ponto técnico a se considerar é a faixa de medição, que já foi previamente explorada na caracterização da tarefa. Ressalta-se que a faixa de medição do instrumento deve cobrir toda a faixa identificada na tarefa; contudo, em alguns casos, se for mais viável economicamente ou houver limitações técnicas, em vez de selecionar um único instrumento de medição que cubra toda a faixa da tarefa, opta-se por um conjunto de instrumentos, sendo cada um com uma faixa específica. Ainda quanto à faixa de medição, vale a pena lembrar da flexibilidade do dispositivo, considerando que há alguns sistemas que não são dedicados, mas sim flexíveis no tocante à faixa de medição, às grandezas medidas ao modo de operação, às condições de medição, entre outros. Este é o caso do multímetro, por exemplo, que mede tensão, corrente e resistência.

Outro aspecto técnico refere-se ao atendimento da incerteza de medição apontada pela definição da tarefa, sendo que o sistema de medição deve conseguir gerar resultados com incertezas de medição compatíveis com o exposto pela tarefa.

Devemos considerar, também, a resolução do mostrador do instrumento, que deve ser compatível com a resolução necessária para a tarefa, sempre evitando resoluções maiores (ou seja, mais grosseiras) que o valor alvo apontado pela tarefa.

Ainda quanto ao aspecto técnico, caso a tarefa tenha sinalizado uma necessidade especial referente ao tempo de medição, este quesito técnico deve ser ponderado na escolha do instrumento. Deve-se ressaltar que a velocidade de medição muitas vezes está associada à praticidade operacional, de modo que instrumentos pouco práticos do ponto de vista da operação devem fortemente ser evitados, a fim de não causar cansaço no operador durante o processo de medição.

A robustez operacional também é um quesito técnico que deve ser avaliado para a seleção do sistema de medição e deve ser considerada diante de condições específicas do meio que se vai operar o instrumento, incluindo vibração, choque mecânico, excesso de força, ambiente com alta temperatura, entre outros. Dessa forma, fica claro que um sistema mais sensível do ponto de vista físico, e que não foi especificado para atuar diante de condições adversas, certamente não será o mais adequado para esse tipo de processo de medição.

Por fim, outro ponto técnico que deve ser avaliado é o grau de automação do sistema, sendo que este deve ser compatível com o grau de automação necessário para a tarefa. Assim, caso seja previsto que a tarefa é totalmente automática, por exemplo, então necessariamente deve ser empregado um instrumento que também seja automático e integrado com outros programas (análise estatística, recursos gráficos, entre outros), desde o processamento até o registro e análise dos dados.

Uma vez levantados os aspectos técnicos de cada instrumento de medição, devemos valorar cada instrumento de acordo com grau de atendimento aos requisitos técnicos. Na maioria das vezes, essa valoração do sistema ocorre de forma qualitativa, utilizando uma escala Likert com cinco níveis de concordância, que, neste caso, são: 5 - pleno - atende plenamente aos requisitos; 4 - bem - atende bem aos requisitos; 3 - razoável - atende razoavelmente aos requisitos; 2 - ruim - atende mal aos requisitos; 1 - não atende - não atende aos requisitos.

Assim, por exemplo, caso a tarefa deva ser plenamente automatizada, então um instrumento que possibilite apenas uma medição semiautomática pode ser considerado uma opção com pontuação 3 ou 2. Já no caso em que a resolução do sistema deva ser milesimal, então um instrumento com incrementos decimais certamente não vai atender, recebendo a pontuação 1, devido ao fato da resolução ser muito mais grosseira do que a necessária para a tarefa.

Albertazzi e Sousa (2008) consideram a etapa de valoração dos aspectos técnicos como sendo eliminatória e classificatória, sugerindo que, caso um instrumento não atenda, ou atenda mal, a um dos requisitos técnicos, então este deve ser eliminado. Claro que isto depende do rigor da fase eliminatória, mas, intuitivamente, é importante considerar que um sistema de medição, para ser escolhido, deve minimamente atender de modo razoável a bem ao propósito da medição sob o âmbito técnico.

Além dos requisitos técnicos, há pontos econômicos que também devem ser considerados na seleção do sistema de medição, uma vez que a aquisição deste dispositivo realmente só irá ocorrer se houver viabilidade econômica, certo?

Do ponto de vista econômico, o primeiro ponto que deve ser analisado é o investimento inicial necessário para a aquisição do sistema de medição. É evidente que o investimento aumenta conforme aumenta o grau de automatização do sistema; se há necessidades de módulos adicionais; se há um imposto de importação; se é necessário um grau de exatidão muito elevado, com incerteza de medição apertada; entre outros. Assim, sempre devemos prezar pelo equilíbrio, quando a tarefa não for altamente complexa ou específica.

Posteriormente, devemos julgar os custos operacionais, ou seja, os custos necessários para manter o sistema de medição em funcionamento pleno. Estes abrangem os custos para manter o ambiente em condições adequadas para a operação do sistema (climatização do ambiente; garantia de rede elétrica estabilizada etc.); custos com a mão de obra especializada (salários, encargos etc.) para operar o instrumento; custo de manutenção e calibração; e custo de depreciação (custo de desgaste natural do sistema), que deve ser considerado, para que a empresa já se planeje financeiramente para a reposição no sistema ao final de sua vida útil. Da mesma forma que os aspectos técnicos, os aspectos econômicos também devem ser valorados para cada dispositivo, sendo uma etapa classificatória.

Finalmente, deve-se apreciar os aspectos logísticos de cada sistema de medição, que abrange principalmente o prazo de entrega do dispositivo adquirido; atendimento pós-venda (representante técnico disponível para ajuste e manutenção, treinamento dos operadores, laboratório capacitado para calibração do dispositivo etc.); e disponibilização de atualização tecnológica pelo fabricante.

De forma análoga ao desenvolvido para quesitos técnicos e econômicos, a escala Likert com os cinco níveis de concordância também deve ser aplicada para os pontos logísticos, de forma classificatória.

Posteriormente, deve ser somada a pontuação de cada sistema de medição para os aspectos técnicos, econômicos e logísticos e, então, de acordo com a particularidade de aplicação para cada empresa ou usuário, cada aspecto deve ser valorado, isto é, deve ser atribuído um peso para cada um dos três aspectos.



Assimile

Repare que a atribuição de valor para cada um dos três aspectos analisados deve ser compatível com as particularidades de aplicação para cada empresa ou usuário. Para um laboratório metrológico especializado que necessita, com urgência, de um sistema de medição excessivamente específico para uma análise, certamente o laboratório irá atribuir um peso maior aos aspectos técnicos, posteriormente, aos aspectos logísticos e, então, aos aspectos econômicos, podendo corresponder a 60%, 25% e 15%, respectivamente. Diferentemente, para um usuário doméstico que necessita fazer uma simples medição, certamente ele pode atribuir um peso semelhante para o aspecto econômico e para o aspecto técnico, sendo menos importante o aspecto logístico, podendo corresponder a 40%, 40% e 20%, respectivamente.

Por fim, para cada sistema em análise, executa-se uma média ponderada, isto é, multiplica-se a pontuação de cada aspecto pelo seu respectivo peso, soma-se todas as parcelas e divide-se pelo somatório dos pesos, alcançando, assim, a pontuação final de cada dispositivo. Dessa forma, o sistema que apresentar maior pontuação deve ser o selecionado.



Pesquise mais

Caro aluno, para uma melhor compreensão de como elaborar as tabelas para aplicação da escala Likert, durante o processo de valoração de cada sistema de medição quanto aos aspectos técnicos, econômicos e logísticos, leia o capítulo 10 do livro a seguir: ALBERTAZZI, A. G. J.; SOUSA, A. R. Fundamentos de metrologia científica e industrial. São Paulo: Manole, 2008.

Disponível em sua biblioteca virtual.

Sem medo de errar

Vamos retomar a situação em que o gestor geral pediu a você para selecionar e enviar para o departamento de compras a solicitação de um instrumento que meça a dimensão externa (como o raio,

por exemplo) dos eixos de cerca de 35 mm com baixa tolerância que são analisados para o acoplamento. Para tanto, foi lida a opção de compra de um paquímetro ou de um micrômetro, com o pressuposto de que ambos os instrumentos executam medição da dimensão externa.

Logo, a primeira análise necessária refere-se à avaliação da tarefa, isto é, para embasar seu pedido de compra, você deve caracterizar bem a tarefa de medição, a fim de definir um conjunto de parâmetros.

Ao se analisar a tarefa de medição, como você faria isso? Inicialmente, é interessante considerar *o que medir*, sendo necessária uma definição clara do mensurando. Neste caso, o instrumento será utilizado para medir o raio do eixo, sendo necessário um instrumento que meça dimensão externa, como a régua, trena, paquímetro, micrômetro etc.

Posteriormente, devemos refletir sobre o *porquê de medir*, a fim de ressaltar quais são os parâmetros principais que devem ser plenamente atendidos. Assim, necessita-se medir o raio do eixo de pequena tolerância que será acoplado ao furo. O fato do eixo ter baixa tolerância, percebemos a importância da resolução do instrumento que está associada à exatidão esperada para a medição, de modo que quanto maior a necessidade de exatidão (baixa tolerância), menor deve ser a resolução do sistema. Além disso, se for para fins de controle de qualidade, devemos considerar uma incerteza de medição igual a um décimo do intervalo de tolerância.

Depois, caracterizamos a tarefa quanto a *onde medir, como medir e faixa de medição*. O local em que será realizada a medição é um laboratório metrológico com temperatura controlada a 20 graus Celsius e o procedimento de medição deve considerar a medição repetida da dimensão externa de um eixo de cerca 35 mm, sendo que o instrumento escolhido deve ter faixa de medição maior que 35 mm.

Ainda na análise da tarefa, nada é especificado sobre a velocidade de medição ou necessidade do sistema ser automatizado. Logo, necessitamos de um instrumento que meça a dimensão externa (raio) de eixos, com faixa de medição superior a 35 mm e com resolução pequena (no mínimo, centesimal).

Do ponto de vista dos aspectos técnicos, como ambos os instrumentos medem dimensão externa, somente com essa análise você poderia escolher qualquer um deles e especificar que necessitam

de faixa de medição superior a 35 mm e com resolução pequena, como centesimal ou milesimal.

Contudo, ainda devem ser analisados os aspectos econômicos e os aspectos logísticos. Do ponto de vista econômico, você deve pesquisar, no *site* do fabricante, o investimento inicial necessário para a aquisição tanto do paquímetro quanto do micrômetro. Posteriormente, para a sua solicitação de compra, você deve julgar os custos operacionais, ou seja, os custos necessários para manter o sistema de medição em funcionamento pleno, em outras palavras, para manter o ambiente em condições adequadas para a operação do sistema (climatização do ambiente; garantia de rede elétrica estabilizada etc.); custos com a mão de obra especializada para operar o instrumento; custo de manutenção e calibração; e custo de depreciação (custo de desgaste natural do sistema), que deve ser considerado, para que a empresa já se planeje financeiramente para a reposição no sistema ao final de sua vida útil. Relevante ao paquímetro e ao micrômetro, os custos de condições do ambiente e custos de mão de obra serão praticamente os mesmos para ambos sistemas, pois o funcionamento deles é muito semelhante.

Finalmente, deve-se apreciar os aspectos logísticos tanto do paquímetro quanto do micrômetro, que neste caso abrange o prazo de entrega do dispositivo adquirido e atendimento pós-venda (representante técnico disponível para ajuste e manutenção e treinamento dos operadores, laboratório capacitado para calibração do dispositivo etc.).

Uma vez levantados todos os aspectos de cada instrumento de medição, então deve-se valorar cada instrumento de acordo com grau de atendimento aos requisitos.

Para tanto, apresente em seu relatório de solicitação a tabela a seguir para cada aspecto analisado, que mostra que essa valoração do sistema ocorre de forma qualitativa, utilizando uma escala Likert com cinco níveis de concordância, que, neste caso, são: 5 - pleno - atende plenamente aos requisitos; 4 - bem - atende bem aos requisitos; 3 - razoável - atende razoavelmente aos requisitos; 2 - ruim - atende mal aos requisitos; 1 - não atende - não atende aos requisitos.

Tabela 3.1 | Atendimento aos aspectos logísticos de acordo com cada sistema de medição

Atendimento a aspectos logísticos						Observações
	Pleno	Bom	Razoável	Ruim	Não atende	
Prazo de entrega						
Atendimento pós-venda						
Atualizações						
Aspectos adicionais						
Pontuação obtida						

Fonte: Albertazzi e Sousa (2008, p. 318).

Posteriormente, deve ser somada a pontuação de cada sistema de medição para os aspectos técnicos, econômicos e logísticos e, então, de acordo com a particularidade de aplicação, cada aspecto deve ser valorado, isto é, deve ser atribuído um peso para cada um dos três aspectos. Neste caso, por se tratar de um laboratório, podemos considerar que o aspecto técnico é de fundamental importância e, além disso, há urgência para compra, colocando o aspecto logístico como importante também. Assim, você poderia atribuir 50%, 30% e 20%, para os aspectos técnicos, logísticos e econômicos, respectivamente.

Por fim, para cada sistema em análise, executa-se uma média ponderada, isto é, multiplica-se a pontuação de cada aspecto pelo seu respectivo peso, soma-se todas as parcelas e divide-se pelo somatório dos pesos, alcançando a pontuação final de cada dispositivo. Assim, o sistema que apresentar maior pontuação deve ser o selecionado!

Concluimos mais um desafio. Parabéns!

Você proporia algum outro item para ser explorado no relatório?

Seleção de um sistema de medição

Descrição da situação-problema

Suponha que você seja responsável pelo laboratório de metrologia de uma indústria de autopeças. Diante da possibilidade de compra do instrumento A ou B, levando em consideração a economia de custos e a necessidade de ser adquirido o dispositivo para um novo departamento que surgirá futuramente na empresa de autopeças, você solicita à equipe técnica do laboratório que analise os dois instrumentos sob as esferas técnica, econômica e logística. Assim, a equipe lhe fornece um parecer de acordo com a pontuação da Tabela 3.2

Tabela 3.2 | Pontuação para os instrumentos A e B de acordo com aspectos técnicos, econômicos e logísticos

	Sistema de medição A	Sistema de medição B
Parâmetros técnicos	Valor (1 a 5)	Valor (1 a 5)
Adequação ao mensurando	4	4
Faixa de medição	5	4
Incerteza de medição	3	3
Resolução	4	3
Velocidade de medição	4	3
Praticidade operacional	3	3
Robustez operacional	2	3
Nível de automação	4	2
PONTUAÇÃO TÉCNICA	29	25
Parâmetros econômicos		
Investimento inicial	3	4
Custos operacionais: estabilização do ambiente	5	5
Custos operacionais: mão de obra	4	3
Custos operacionais: manutenções e calibrações	4	4
Custos operacionais: depreciação	5	3
PONTUAÇÃO ECONÔMICA	21	19
Parâmetros logísticos		
Prazo de entrega	3	5

Atendimento pós-venda	4	4
Atualizações	5	3
PONTUAÇÃO LOGÍSTICA	12	12

5 - pleno - atende plenamente aos requisitos; 4 - bem - atende bem aos requisitos; 3 - razoável - atende razoavelmente aos requisitos; 2 - ruim - atende mal aos requisitos; 1 - não atende - não atende aos requisitos.

Fonte: elaborada pela autora.

A partir da Tabela 3.2, qual instrumento de medição você, como responsável pelo laboratório, solicitaria ao departamento de compras? Embase sua resposta em um relatório de solicitação para ser encaminhado ao setor responsável.

Resolução da situação-problema

Primeiramente, a equipe técnica deve ter analisado a tarefa e, então, avaliado os atendimentos dos instrumentos A e B aos aspectos técnicos, econômicos e logísticos. Seu primeiro passo, a partir da Tabela 3.2, é atribuir um peso para cada aspecto de acordo com as especificidades do presente caso.

Como se trata de um laboratório, certamente o aspecto técnico é o mais importante; também, o laboratório quer reduzir custos e não há urgência de compra, embora o atendimento pós-venda seja importante.

Assim, você poderia atribuir os pesos 50%, 25% e 25% para a esfera técnica, econômica e logística, respectivamente. Logo, para cada sistema em análise, obtém-se a média ponderada, conforme segue:

$$\text{Pontuação}_A = \frac{(29 \text{ pontos}) \cdot 50\% + (21 \text{ pontos}) \cdot 25\% + (12 \text{ pontos}) \cdot 25\%}{100\%}$$

$$\text{Pontuação}_A = 22,75 \text{ pontos}$$

$$\text{Pontuação}_B = \frac{(25 \text{ pontos}) \cdot 50\% + (19 \text{ pontos}) \cdot 25\% + (12 \text{ pontos}) \cdot 25\%}{100\%}$$

$$\text{Pontuação}_B = 20,25 \text{ pontos}$$

O sistema que apresentar maior pontuação deve ser o selecionado, sendo, neste caso, o instrumento A.

Perceba que, de fato, o instrumento A foi melhor nos aspectos técnicos e econômicos que o instrumento B.

Você pensaria em algum outro ponto para embasar sua solicitação de compra?

Faça valer a pena

1. A seleção do sistema de medição de forma adequada é de suma importância para um processo de medição otimizado. Para a escolha de um sistema de medição, considere as afirmativas de I a V:

I. Ao pensarmos em selecionar um sistema de medição, devemos considerar se o dispositivo atende ao propósito da medição.

II. É necessário avaliar se as características metrológicas do instrumento estão de acordo com o que se pretende obter.

III. O atendimento pós-venda do fabricante e o prazo de entrega do sistema não devem ser considerados na seleção.

IV. É importante avaliar se o dispositivo apresenta um custo compatível com o que se está disposto a investir.

V. As manutenções e calibrações não devem ser consideradas no momento de seleção do sistema de medição.

Considerando as afirmativas de I a V, assinale a alternativa que apresenta a ordem correta de verdadeiro (V) e falso (F):

a) V, V, F, F, V.

b) V, V, F, V, F.

c) F, V, V, V, F.

d) F, F, F, V, F.

e) V, F, F, V, V.

2. A importância da seleção adequada do sistema de medição está diretamente relacionada com as múltiplas consequências de uma má escolha. Considere as afirmativas I a IV:

I. Incerteza de medição dos resultados de modo a não atender às necessidades do processo.

II. Aumento do custo ou do tempo de operação.

III. Comprometimento da qualidade final do produto ou processo.

IV. Diminuição da necessidade de manutenção e calibração.

Considerando as afirmativas de I a IV, assinale a alternativa que apresenta corretamente as consequências da má seleção do sistema de medição:

- a) I e II.
- b) I, II e IV.
- c) I, II, III e IV.
- d) I, II e III.
- e) II e III.

3. Pensando no controle de qualidade, cada produto tem sua tolerância, correspondendo à faixa de variação aceitável para uma característica do produto, de modo que há uma relação ideal entre intervalo de tolerância e incerteza de medição, a fim de nortear a escolha do sistema de medição.

Considerando IM = incerteza de medição e IT = intervalo de tolerância, assinale a alternativa que apresenta corretamente a relação entre intervalo de tolerância e incerteza de medição em casos de controle de qualidade:

- a) $IM = \frac{IT}{10}$.
- b) $IM = \frac{IT}{20}$.
- c) $IT = \frac{IM}{10}$.
- d) $IT = \frac{IM}{20}$.
- e) $IM = \frac{IT}{15}$.

Seção 3.3

Controle geométrico

Diálogo aberto

Nas seções anteriores desta unidade, estudamos o processo de calibração e aprendemos a executar a seleção de um sistema de medição pautada em critérios objetivos. Nesta seção, vamos estudar a respeito do controle geométrico sob o escopo da metrologia. Esse conteúdo é muito compartilhado com a mecânica, uma vez que prevê a compreensão de ajuste eixo-furo e as normalizações pertinentes, bem como tolerância dimensional e tolerância geométrica.

Você vai perceber que esse assunto é muito explorado em indústrias de cunho mecânico, como metal-mecânica, por exemplo, fazendo parte da rotina do profissional de metrologia que atua na fabricação e acoplamento de eixos-furo, controle de qualidade de peças etc. Logo, empenhe-se no estudo desta seção, a fim de assimilar conhecimentos que lhe serão muito úteis em sua trajetória como profissional!

Sob essa perspectiva, vamos retomar o nosso contexto no qual você foi contratado como gestor técnico de um laboratório metrológico que atua com calibração e controle geométrico (especificamente no acoplamento eixo-furo). Sob sua supervisão, foi alocado um recém-admitido jovem aprendiz com conhecimentos técnicos ainda básicos sobre calibração e controle geométrico, de modo que é sua responsabilidade orientá-lo e supervisionar suas atividades.

Em um primeiro momento, você o orientou quanto ao processo de calibração da balança empregada para a medição da massa do sistema eixo-furo. Agora, com o remanejamento do jovem aprendiz para o departamento de controle geométrico, o gestor do laboratório lhe solicita que elabore um protocolo geral de análise de sistemas eixo-furo, explicitando os tipos de ajuste mecânico e como caracterizá-

los. Logo, o que você colocaria como protocolo para a análise de sistemas eixo-furo, a fim de direcionar o trabalho do jovem aprendiz?

Refleta sobre essa indagação e comece a considerar os conteúdos que veremos nesta seção para elaborar o seu protocolo.

Ótimo estudo e um excelente trabalho!

Não pode faltar

Nesta seção iremos priorizar o estudo de conteúdos vinculados ao controle geométrico, sob o escopo da metrologia. Para tanto, vamos estudar melhor sobre tolerâncias, tanto do ponto de vista dimensional quanto do ponto de vista geométrico. Trabalharemos também com sistemas eixo-furo, para análise dos tipos de ajustes e norma.

Conforme visto na seção anterior, tolerância corresponde à faixa de variação aceitável para uma característica de um produto. Aprofundando esse conceito, Leake e Borgerson (2013) entendem que a tolerância pode ser vista como uma técnica de dimensionamento cuja função vincula-se com garantir a intercambialidade das peças de modo a controlar a variação nas dimensões.

Um exemplo claro da relação entre tolerância e intercambialidade pode ser verificado em uma ação do nosso dia a dia: o uso de um pen drive. Quando você adquire um *pen drive* fabricado na China, certamente você espera que ele tenha um tamanho compatível com a porta USB do seu computador fabricado no Brasil, certo? De forma análoga, você pode substituir esse *pen drive* chinês por outro fabricado em Taiwan e, mesmo assim, espera que ele funcione de acordo em seu computador nacional. Desta forma, há uma especificação para o *pen drive* e esta, por sua vez, prevê uma faixa de variação aceitável para essa característica do produto, garantindo que o dispositivo possa ser utilizado em qualquer computador.

Assim, a intercambialidade refere-se à propriedade que possuem os elementos mecânicos de serem produzidos independentemente uns

dos outros, contudo, possibilita a troca, a reposição ou o intercâmbio de um por outro, sem a necessidade de retrabalho (CAPTAN, 2013).

Na indústria automobilística e aeronáutica, por exemplo, há uma grande gama de conjuntos que são obtidos por meio de montagens a partir de diversas peças, de modo que uma fabricação muito cuidadosa em termos de tolerância e acabamento superficial é de extrema importância.

Assim, se o tamanho, forma e localização dos detalhes do produto estiverem em conformidade com a faixa de tolerância, então o produto funcionará de modo adequado.



Refleta

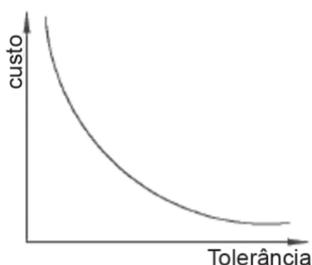
Além de assegurar a intercambialidade, quais outros impactos você julga que a tolerância pode acarretar?

Além da intercambialidade, a determinação da faixa de tolerância e seu atendimento no processo produtivo garante a qualidade do produto, uma vez que assegura a conformidade do produto com a sua especificação técnica. Ademais, o cumprimento da tolerância contribui para redução dos custos associados a retrabalhos, uma vez que diminui o número de peças fora de conformidade.

Vale ressaltar que as informações advindas da faixa de tolerância direcionam o processo de fabricação do respectivo produto, de modo que tolerâncias específicas, principalmente nos casos em que a faixa de variação aceitável é bem reduzida, condicionam o processo produtivo e vice-versa. Dessa forma, Silva et al. (2006) afirmam que, ao se especificar a tolerância para um produto, então é possível limitar os erros aceitáveis na fabricação das peças, sejam erros de natureza dimensional (tamanho) ou de natureza geométrica (forma).

Perceba que quanto mais apertada a tolerância, menor a faixa de variação aceitável e mais exata deve ser a peça, de modo que mais caro será o processo produtivo. A Figura 3.5 ilustra a correlação não linear entre a tolerância e custo de fabricação do respectivo produto.

Figura 3.5 | Dependência entre a tolerância do produto e o seu respectivo custo de fabricação



Fonte: Silva et al. (2006).

Você se lembra de que falamos na Unidade 1 sobre os padrões em metrologia, como bloco-padrão, massa-padrão etc.? Então, uma caixa de blocos padrão pode custar acima de 30 mil reais, devido à necessidade de baixíssima incerteza da peça, de modo que o processo produtivo deve ser estritamente exato para produzir peças que sirvam como padrão. Logo, as tolerâncias dos produtos devem ser as maiores admitidas, sem comprometer o funcionamento do dispositivo, equilibrando os custos com a qualidade requerida pelo produto.

No tocante à variação aceitável, temos a tolerância dimensional e a tolerância geométrica, sendo que ambas devem ser determinadas de acordo com a função da peça ou do elemento.

A tolerância dimensional trata dos desvios de tamanho (dimensão) aceitáveis para a peça sem comprometer seu funcionamento. Assim, quando no projeto é especificado que uma peça deve ter comprimento de 35 mm, por exemplo, o setor de manufatura vai ser alimentado com o desenho técnico da peça que transmite a informação de que o produto deve ser fabricado com aproximadamente 35 mm. Neste ponto, deve-se ressaltar que, do ponto de vista técnico, não há um processo produtivo que garanta 100% de exatidão na fabricação dos produtos, considerando também que o custo de operação deste processo seria elevadíssimo, conforme já vimos. Logo, a peça a ser fabricada pode ter um comprimento de 34,87; 35,09; 34,83; 35,13 mm, entre outros valores, dependendo de sua funcionalidade e tolerância previstas. Claro que algumas peças, por ventura, podem

estar fora da faixa aceitável para a variação, podendo não satisfazer os requisitos funcionais e, sendo dispensadas (SILVA et al., 2006).

Quantitativamente, a tolerância (T) dimensional é modelada pela subtração da dimensão máxima (D_{\max}) da dimensão mínima (D_{\min}) aceitável para a peça, conforme a Equação 3.2. Assim, temos que a dimensão máxima corresponde ao valor máximo admissível para a dimensão, enquanto que a dimensão mínima corresponde ao valor mínimo admissível para a dimensão.

$$T = D_{\max} - D_{\min} \quad (\text{Equação 3.2})$$

Tem-se também a dimensão nominal (D), que corresponde à dimensão efetivamente especificada para o produto e que deve ser ilustrada no desenho técnico da peça por meio de cota.

No desenho técnico, a dimensão nominal é seguida pelos valores de afastamento que correspondem aos desvios permitidos em relação à dimensão nominal da peça, tanto para mais quanto para menos. Assim, tem-se o afastamento superior (A_s), que equivale à diferença entre a dimensão máxima e a nominal; e o afastamento inferior (A_i), que equivale à diferença entre a dimensão mínima e a nominal, conforme as Equações 3.3 e 3.4, respectivamente (SILVA et al., 2006; LEAKE; BORGERSON, 2013).

$$A_s = D_{\max} - D \quad (\text{Equação 3.3})$$

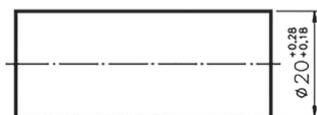
$$A_i = D_{\min} - D \quad (\text{Equação 3.4})$$



Exemplificando

A fim de melhor compreender os conceitos apresentados, vamos considerar o desenho técnico da Figura 3.6.

Figura 3.6 | Desenho técnico de um pino com a sua respectiva cota em mm



ESC 1:1

Fonte: <<http://essel.com.br/cursos/material/01/DesenhoTecnico/aula28.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2016.

Do desenho técnico, temos as seguintes especificações:

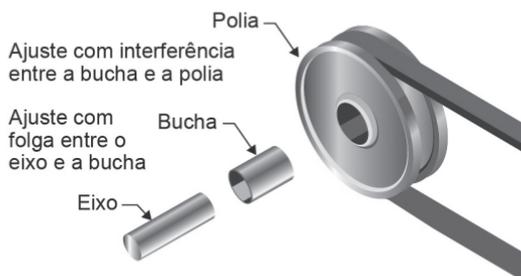
1. A dimensão nominal do diâmetro do pino é 20 mm.
2. Os afastamentos, apresentados acima e abaixo da dimensão nominal, são: +0,28 mm (afastamento superior) e +0,18 mm (afastamento inferior).
3. Os afastamentos, junto com a dimensão nominal possibilitam o cálculo da dimensão máxima e da dimensão mínima, sendo:
$$0,28 = D_{\max} - 20$$
$$D_{\max} = 20,28\text{mm}$$
$$0,18 = D_{\min} - 20$$
$$D_{\min} = 20,18\text{mm}$$
4. A tolerância é a diferença entre as dimensões máximas e mínimas, sendo $T = 20,28 - 20,18 = 0,10\text{ mm}$

No âmbito da tolerância dimensional, quando uma peça funciona acoplada a outra, a faixa aceitável de variação da característica de cada peça ganha demasiada importância e relaciona-se com o conceito de ajuste eixo-furo, que se refere ao grau de liberdade de uma peça em relação à peça vizinha.

Silval et al. (2006) apresentam um exemplo bem interessante para o estudo dos tipos de ajuste: imagine um eixo, uma bucha e uma polia, sendo que o eixo deve poder girar livremente em relação à bucha, enquanto a bucha deve ficar presa na polia, conforme a Figura 3.7.

Refletindo sobre o fato de que eixo deve girar livremente em relação à bucha, então há a necessidade de existir uma folga entre o eixo e polia, o que tecnicamente significa que há um ajuste com folga entre o eixo e a polia. Por outro lado, a bucha deve estar presa à polia sem livre movimento, que o corresponde a um ajuste com interferência entre bucha e polia.

Figura 3.7 | Dependência entre a tolerância do produto e o seu respectivo custo de fabricação



Fonte: Silva et al. (2006).

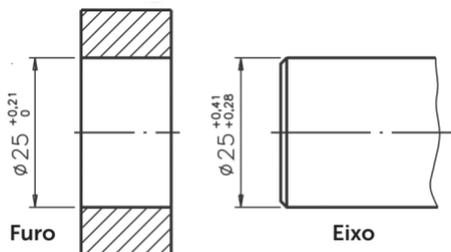
No ajuste com folga, é intuitivo pensar que deve haver uma folga entre o eixo e o furo, sendo que o eixo sempre girará livremente dentro do furo. Assim, nesse tipo de ajuste, a dimensão máxima do eixo deve ainda ser menor que a dimensão mínima do furo, considerando que o eixo sempre vai ser menor que o furo.



Exemplificando

A fim de melhor compreender os conceitos apresentados, vamos considerar o desenho técnico da Figura 3.8.

Figura 3.8 | Desenho técnico de uma sistema eixo-furo com cotas em mm



Fonte: adaptada de http://essel.com.br/cursos/material/01/DesenhoTecnico/aula28.pdf. Acesso em: 20 jun. 2016.

Os diâmetros do furo e do eixo têm a mesma dimensão nominal: 25 mm. O afastamento superior do eixo é $-0,20$ mm, de modo que a sua dimensão máxima é $-0,20 = D_{\max} - 25$, sendo $D_{\max} = 24,80$ mm. O afastamento inferior do furo é zero, sendo que a sua dimensão mínima é

$D_{\max} = 25 \text{ mm}$ Logo, percebemos que o máximo que o eixo pode atingir sempre será menor que o mínimo que o furo pode ter, sendo um ajuste com folga. O valor da folga refere-se à diferença entre as dimensões do eixo e do furo, sendo igual a **Folga = $25,00 - 24,80 = 0,20 \text{ mm}$** .

Já no ajuste com interferência, temos que o eixo entra no furo a partir de um certo esforço, de modo a ficar fixo. Dessa forma, a dimensão máxima do furo é menor ou igual à dimensão mínima do eixo, ou seja, o eixo é sempre ligeiramente maior ou igual ao furo.

Há também o ajuste incerto que, como o próprio nome diz, pode ir desde o ajuste com folga até o ajuste com interferência. Assim, o eixo pode ser maior ou menor que o furo, podendo girar livremente ou ficar preso, isto é, a dimensão máxima do eixo é maior que a dimensão mínima do furo e dimensão máxima do furo é maior que dimensão mínima do eixo (SILVA et al., 2006; LEAKE; BORGERSON, 2013).



Assimile

Vale ressaltar que a escolha do tipo de ajuste (folga, interferência ou incerto) normalmente depende de alguns fatores, tais como acabamento das superfícies em contato, movimento relativo entre as peças, velocidade de funcionamento do conjunto, tipo de material das peças, lubrificação, custo etc.

Ainda quanto à tolerância linear, um ponto relevante refere-se à qualidade da tolerância, também denominada qualidade de trabalho. A norma ISO 286-1 (*Geometrical product specifications*) caracteriza 20 classes de tolerâncias fundamentais, representadas pelas letras IT seguidas de um número de ordem: IT01, IT0, IT1, ..., IT18. A Figura 3.9 apresenta a aplicação das classes de tolerância.

Figura 3.9 | Esquema da aplicação das classes de tolerância fundamentais

		Qualidade de Trabalho																	
		IT01	IT0	IT1	IT2	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15	IT16
Eixos		mecânica extra-precisa					mecânica corrente					mecânica grosseira							
Furos		mecânica extra-precisa					mecânica corrente					mecânica grosseira							

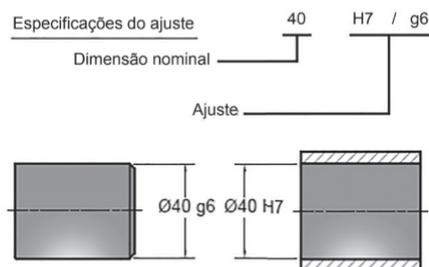
Fonte: <<http://essel.com.br/cursos/material/01/DesenhoTecnico/aula28.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2016.

Note que a qualidade de trabalho IT 01 corresponde ao menor valor de tolerância, sendo adotada na mecânica extra-precisa, isto é, para a fabricação de calibradores, padrões, entre outros elementos de baixíssima tolerância. Em contrapartida, a partir da qualidade de trabalho IT 12, adentramos na mecânica grosseira, estando mais relacionada com os processos de laminação, forjamento, fundição e estampagem. Assim, comumente, essas qualidades de tolerância são aceitas para peças isoladas, que não requerem grande exatidão (SILVA et al., 2006).

Há também a norma ANSI B4.2-1978 (R1984) - *Preferred Metric Limits and Fits*, a qual define um código especial para a tolerância, como 40H7. Neste código, o número 40, por exemplo, refere-se à dimensão nominal; a letra H refere-se ao afastamento fundamental (sendo letra maiúscula para furo e letra minúscula para eixo), de forma a estabelecer a posição do campo de tolerância em relação à dimensão nominal; e o número 7 refere-se à tolerância-padrão, de modo que quanto menor o número, menor será o campo de tolerância (LEAKE; BORGERSON, 2013).

Nesse sistema de tolerância, quando há duas peças que trabalham em conjunto (ajuste eixo-furo), então a simbologia presente no desenho técnico comumente aparece como o exemplo da Figura 3.10, que é indicado pela dimensão nominal comum às duas peças, seguida por um símbolo de tolerância para cada componente, sendo letra maiúscula para furo e letra minúscula para eixo.

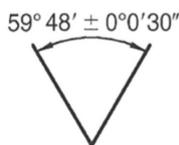
Figura 3.10 | Simbologia de tolerância para duas peças acopladas



Fonte: Leake e Borgerson (2013).

Há também as tolerâncias angulares, que não diferem muito da expressão da tolerância linear, exceto pelo fato de que, nas tolerâncias angulares, as unidades (grau, minuto e segundo) devem obrigatoriamente ser indicadas, conforme, Figura 3.11.

Figura 3.11 | Exemplo de aplicação de tolerância em ângulo



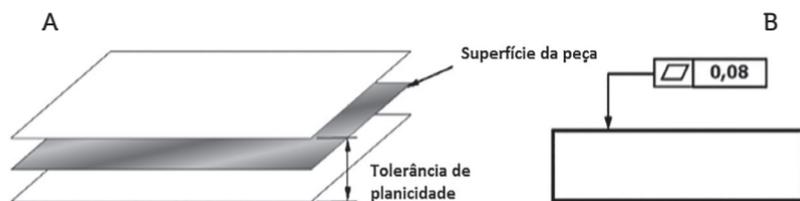
Fonte: Leake e Borgerson (2013).

Além da tolerância dimensional, conforme já mencionado, há a tolerância geométrica, que se refere aos desvios de forma que uma peça pode apresentar. Dessa forma, as tolerâncias geométricas definem os afastamentos de uma peça em relação a sua forma geométrica teórica. As tolerâncias de geometria mais comuns englobam planicidade, circularidade, paralelismo e perpendicularidade (CAPTAN, 2013).

A tolerância de planicidade refere-se à variação aceitável em relação à forma plana de um elemento, sendo representada por dois planos paralelos que delimitam os limites, tanto superior quanto inferior, da variação admissível, entre os quais deve se encontrar a superfície efetiva (medida). A Figura 3.12A mostra a tolerância de planicidade definida por dois planos e a Figura 3.12B apresenta o

símbolo da planicidade e o valor admissível de variação entre os dois planos. Os desvios mais comuns em relação à planicidade refere-se à concavidade (depressão) ou à convexidade (elevação), ressaltando que dificilmente é possível enxergar tais desvios do plano a olho nu.

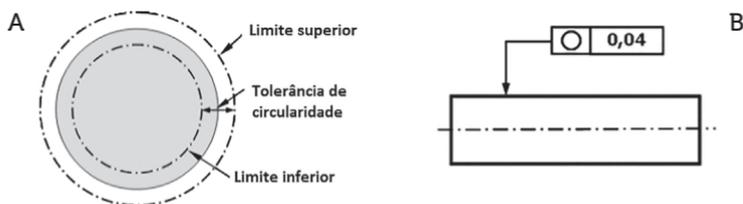
Figura 3.12 | Tolerância de planicidade, sendo (A) a representação dos dois planos paralelos e (B) o símbolo representativo da planicidade



Fonte: <http://www.exatas.ufpr.br/portal/degraf_marcio/wp-content/uploads/sites/13/2014/10/Apostila-Desenho-Mecanico-1-III-Parte-Copy.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2017.

A tolerância de circularidade é comumente importante em peças em forma de disco, cilindro ou cone, sendo representada por dois círculos concêntricos que delimitam os limites admissíveis para a variação, conforme mostra a Figura 3.13.

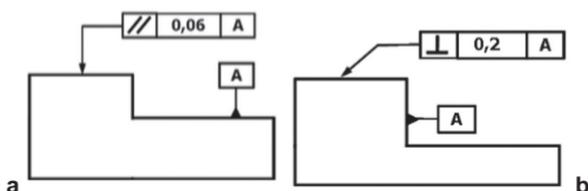
Figura 3.13 | Tolerância de circularidade, sendo (A) a representação dos dois círculos concêntricos; e (B) o símbolo representativo da circularidade



Fonte: <http://www.exatas.ufpr.br/portal/degraf_marcio/wp-content/uploads/sites/13/2014/10/Apostila-Desenho-Mecanico-1-III-Parte-Copy.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2017.

A tolerância de paralelismo (Figura 3.14a) refere-se ao desvio máximo admissível, para uma reta ou um plano, em relação à outra reta ou plano de referência. De forma análoga, a tolerância de perpendicularidade (Figura 3.14b), para uma reta ou um plano, refere-se ao desvio máximo admissível para o ângulo teórico de 90 graus em relação a outra linha reta ou plano de referência.

Figura 3.14 | Representação técnica da (a) tolerância de paralelismo e (b) tolerância de perpendicularidade, sendo A a reta ou plano de referência



Fonte: <http://www.exatas.ufpr.br/portal/deggraf_marcio/wp-content/uploads/sites/13/2014/10/Apostila-Desenho-Mecanico-1-III-Parte-Copy.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2017.

Na próxima unidade, veremos alguns sistemas de medição que podem ser empregados para medir os desvios geométricos.



Pesquise mais

A fim de entender melhor sobre tolerância geométrica, leia a norma NBR 6409 – Tolerâncias geométricas – Tolerâncias de forma, orientação, posição e batimento – Generalidades, símbolos, definições e indicações em desenho, disponível a seguir: **ABNT. NBR 6409** – Tolerâncias geométricas – Tolerâncias de forma, orientação, posição e batimento – Generalidades, símbolos, definições e indicações em desenho Disponível em: <<http://www.daelt.ct.utfpr.edu.br/professores/cassilha/NBR%206409%20-%20Tolerancias%20geometricas.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2017.

Sem medo de errar

Vamos retomar o nosso contexto no qual o gestor do laboratório de controle geométrico lhe solicita para elaborar um protocolo geral de análise de sistemas eixo-furo, explicitando os tipos de ajuste mecânico e como caracterizá-los.

Para iniciar seu protocolo, é interessante você explicar que o tipo de ajuste depende de alguns fatores, tais como acabamento das superfícies em contato, movimento relativo entre as peças, velocidade de funcionamento do conjunto, tipo de material das peças, lubrificação, custo etc.

Assim, a equipe de projeto mecânico muitas vezes já pensa nas especificações do produto considerando esses fatores, caso o elemento deva atuar em conjunto com outros elementos.

No departamento de controle geométrico, necessita estar claro para a equipe técnica que há 3 tipos de ajustes mecânicos: folga, interferência e incerto.

Na caracterização do ajuste com folga, é intuitivo pensar que deve haver uma folga entre o eixo e o furo, de modo que eixo sempre gira livremente dentro do furo. Assim, nesse tipo de ajuste, a dimensão máxima do eixo deve ainda ser menor que a dimensão mínima do furo, considerando que o eixo sempre vai ser menor que o furo. O valor da folga refere-se à diferença entre as dimensões do eixo e do furo.

Já no ajuste com interferência, temos que o eixo entra no furo a partir de um certo esforço, ficando fixo. Dessa forma, a dimensão máxima do furo é menor ou igual à dimensão mínima do eixo, ou seja, o eixo é sempre ligeiramente maior ou igual ao furo. Para obter o valor da interferência, basta calcular a diferença entre a dimensão mínima do eixo e a dimensão máxima do furo. É interessante ressaltar em seu protocolo que, como o diâmetro do eixo é maior que o diâmetro do furo, as duas peças serão acopladas sob pressão.

Há também o ajuste incerto que, como o próprio nome diz, pode ir desde o ajuste com folga até o ajuste com interferência. Assim, o eixo pode ser maior ou menor que o furo, podendo girar livremente ou ficar preso, ou seja, a dimensão máxima do eixo é maior que a dimensão mínima do furo e dimensão máxima do furo é maior que dimensão mínima do eixo.

Explorado esses pontos, você terá um protocolo direcionador do trabalho da equipe técnica do departamento de controle geométrico.

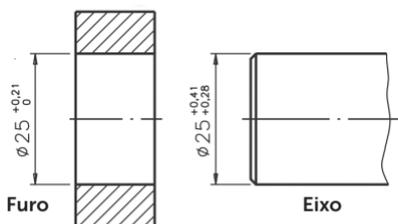
Você acrescentaria algo a mais? Como se planejaria para apresentar esses pontos ao jovem aprendiz?

Ajustagem sistema eixo-furo

Descrição da situação-problema

Como técnico de mecânica em uma empresa aeronáutica, seu gestor lhe solicita que identifique o tipo de ajuste requisitado para o acoplamento eixo-furo segundo o desenho técnico apresentado na Figura 3.15. Para tanto, você deve apresentar um parecer que descreva a ajustagem do sistema embasada em cálculos assertivos.

Figura 3.15 | Acoplamento eixo-furo de um conjunto empregado na fabricação de aeronaves, com cotas apresentadas em mm



Fonte: adaptada de <<http://essel.com.br/cursos/material/01/DesenhoTecnico/aula28.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2016.

Resolução da situação-problema

Primeiramente, no seu parecer, você deve detalhar que, de acordo com o desenho técnico do eixo e do furo, temos que a dimensão nominal do furo é 25 mm e o afastamento superior é +0,21mm. Na cota do eixo, a dimensão nominal também é 25 mm e o afastamento inferior é +0,28mm. Portanto, a dimensão máxima do furo é $0,21 = D_{\max} - 25$, em que $D_{\max} = 25,21\text{mm}$, sendo sempre menor que a dimensão mínima do eixo dada por $0,28 = D_{\min} - 25$, ou seja, $D_{\min} = 25,28\text{ mm}$.

Logo, podemos assegurar que o eixo sempre será ligeiramente maior que o furo, caracterizando um ajuste com interferência.

Para obter o valor da interferência, basta calcular a diferença entre a dimensão mínima do eixo e a dimensão máxima do furo, sendo **Interferência = 25,28 – 25,21 = 0,07mm**.

Como o diâmetro do eixo é maior que o diâmetro do furo, as duas peças serão acopladas sob pressão.

Parabéns, mais um aprendizado conquistado!

Faça valer a pena

1. A tolerância pode ser entendida como uma técnica de dimensionamento cuja função vincula-se com garantir o(a) _____ das peças de modo a controlar a variação nas dimensões.

Assinale a alternativa que preenche corretamente a frase:

- a) Confiabilidade.
- b) Intercambialidade.
- c) Independência.
- d) Estabilidade.
- e) Credibilidade.

2. No tocante à variação, temos a tolerância dimensional e a tolerância geométrica, de modo que ambas devem ser determinadas de acordo com a função da peça ou do elemento. Considere as afirmações I, II e III:

I. A tolerância dimensional trata dos desvios de tamanho (dimensão) aceitáveis para a peça sem comprometer seu funcionamento.

II. Quando é especificado que uma peça deve apresentar 78 mm de comprimento, então podemos assegurar que sempre este elemento apresentará exatamente 78 mm de comprimento.

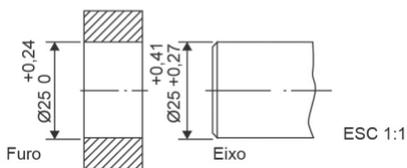
III. As tolerâncias geométricas definem os afastamentos de uma peça em relação à sua forma geométrica teórica.

IV. A tolerância geométrica mais comum é a de coaxialidade.

Assinale a alternativa que apresenta a ordem correta de verdadeiro (V) e falso (F):

- a) V, F, V, F.
- b) V, V, V, F.
- c) F, F, V, F.
- d) F, V, F, V.
- e) F, V, F, F

3. Observe a figura a seguir para analisar o tipo de ajuste:



Fonte: <<http://essel.com.br/cursos/material/01/DesenhoTecnico/aula28.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2016.

Assinale a alternativa que apresenta o tipo de ajuste correto e o valor da folga ou interferência:

- a) Folga; 0,53 mm.
- b) Interferência; 0,53 mm.
- c) Incerto; 0,27 mm.
- d) Interferência; 0,03 mm.
- e) Folga; 0,03 mm.

Referências

ABNT. **NBR 6409** – Tolerâncias geométricas – Tolerâncias de forma, orientação, posição e batimento – Generalidades, símbolos, definições e indicações em desenho Disponível em: <<http://www.daelt.ct.utfpr.edu.br/professores/cassilha/NBR%206409%20-%20-%20Tolerancias%20geomtricas.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2017.

ALBERTAZZI, A. G. J.; SOUSA, A. R. **Fundamentos de metrologia científica e industrial**. 1. ed. São Paulo: Editora Manole, 2008.

CAPTAN, M. F. **Apostila de desenho mecânico 1**: parte III. Curitiba: UFPR, 2013. Disponível em: <http://www.exatas.ufpr.br/portal/deggraf_marcio/wp-content/uploads/sites/13/2014/10/Apostila-Desenho-Mecanico-1-III-Parte-Copy.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2017.

ESSEL ONLINE. **Apostila de curso profissionalizante de desenho técnico** - aula 28. 2008. Disponível em: <<http://essel.com.br/cursos/material/01/DesenhoTecnico/aula28.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2016.

FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D. **Confiabilidade e manutenção industrial**. 1. ed. São Paulo: Campus-Elsevier, 2009.

INMETRO. **V872 Vocabulário Internacional de Metrologia**: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012). Rio de Janeiro: INMETRO, 2012.

LEAKE, J. M.; BORGERSON, J. L. **Manual de desenho técnico para engenharia**: desenho, modelagem e visualização. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

LEEMIS, L. M. **Reliability**: probabilistic models and statistical methods. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1995.

LIRA, F. A. de. **Metrologia na Indústria**. 3. ed. São Paulo: Ed. Erica, 2015

SILVA, A. et al. **Desenho técnico moderno**. 4. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2006.

Principais sistemas de medição: características e aplicação

Convite ao estudo

Caro aluno, até agora estudamos os fundamentos da metrologia, desde erro de medição; estimativa de erro sistemático e erro aleatório; resultado e incerteza de medição até medição direta e medição indireta; calibração e controle geométrico; e ajustes.

Nesta unidade, apresentaremos os princípios construtivos e de funcionamento de diferentes sistemas de medição, partindo dos instrumentos básicos, como o paquímetro e o micrômetro, até chegar aos sistemas complexos, como o projetor de perfil.

No âmbito prático, a oportunidade de executar medições com diversos sistemas será de grande valia para a sua vida profissional, propiciando a aplicação dos conceitos teóricos assimilados até agora.

Nesse contexto, considere que você foi contratado como membro da equipe técnica de um laboratório metrológico que executa testes em peças industriais, a fim de inspecionar e validar o produto.

A cada semana, um conjunto de peças para inspeção e validação é entregue ao laboratório e, então, o gestor técnico divide a demanda entre os colaboradores da equipe técnica. A você foi atribuída a execução de testes em peças distintas, sendo necessário o uso de diferentes instrumentos para medição das dimensões a serem inspecionadas. Na sua primeira demanda, como você executaria (instrumento e procedimento de medição) o teste de medição do comprimento de uma chapa

de ferro e do diâmetro interno de um orifício? Na sua segunda demanda, como você faria o teste de planicidade de um bloco retangular, ou seja, como procederia a para inspecionar se a superfície do bloco é realmente plana? Por fim, como seria feito o teste de medição em uma fina lâmina com geometria complexa? Lembre-se de que o gestor técnico já lhe delegou essas três atividades e, para cada uma delas, solicitou um relatório contendo o instrumento a ser empregado, o procedimento a ser aplicado e o caminho para obtenção do resultado de medição com sua respectiva incerteza.

Essas questões poderão ser respondidas ao decorrer desta unidade, conforme os conteúdos detalhados anteriormente.

Está preparado para esse desafio? Bons estudos!

Seção 4.1

Paquímetro e micrômetro

Diálogo aberto

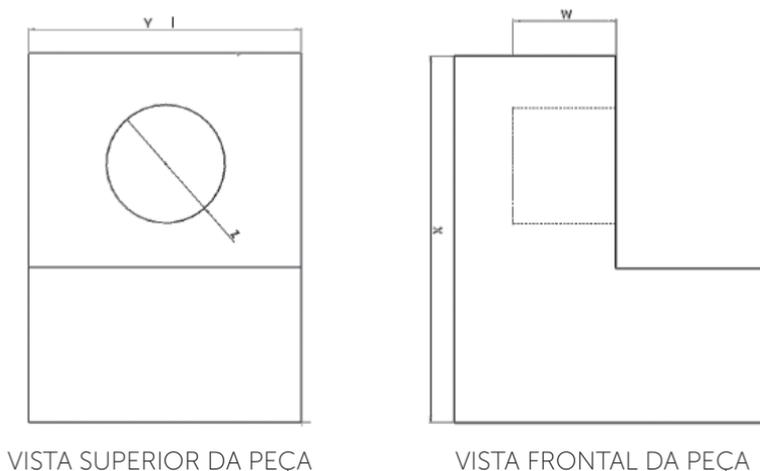
Nesta seção, desenvolveremos o estudo de sistemas de medição, suas características, os princípios de funcionamento e as principais aplicações. Ressalta-se que tal assunto tem ênfase prática, o que lhe será muito útil no mercado de trabalho, em especial, no setor industrial.

Especificamente, será tratado o paquímetro, explorando características construtivas, o princípio de nônio, recomendações de medição, tipos e uso. Também será abordado o micrômetro, explorando a característica construtiva, o princípio de funcionamento, as recomendações de medição, além dos tipos e usos.

Nesse contexto, considere que você foi contratado como membro da equipe técnica de um laboratório metrológico que executa testes em peças industriais, a fim de inspecionar e validar o produto. A cada semana, um conjunto de peças para inspeção e validação é entregue ao laboratório e, então, o gestor técnico divide a demanda entre os colaboradores da equipe técnica.

A você foi atribuída a execução de testes em peças distintas, sendo necessário o uso de diferentes instrumentos para medição das dimensões a serem inspecionadas. Na sua primeira demanda, como você executaria (instrumento e procedimento de medição) o teste de medição do comprimento de um pequeno bloco de ferro (X - valor nominal de projeto igual a 5 cm) e do diâmetro interno do orifício (Z - valor nominal de projeto igual a 1,9 cm)? A Figura 4.1 apresenta o desenho técnico da peça.

Figura 4.1 | Desenho técnico da peça para medição



Fonte: elaborada pelo autor.

Lembre-se de que o gestor técnico lhe solicitou um relatório contendo o instrumento a ser empregado, o procedimento geral a ser aplicado e o caminho para obtenção do resultado de medição com sua respectiva incerteza.

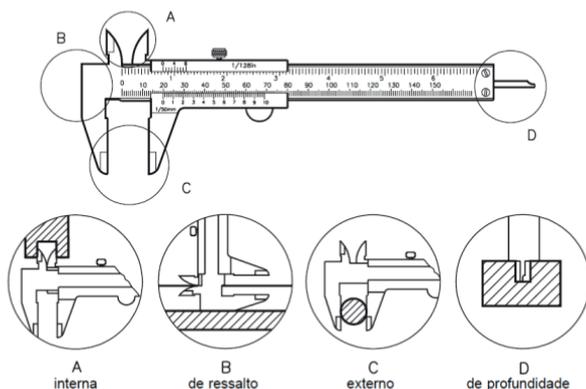
Essas questões poderão ser respondidas ao decorrer desta unidade, conforme os conteúdos detalhados no *Convite ao estudo*.

Não pode faltar

O paquímetro e o micrômetro são dois dos instrumentos de medição mais utilizados no chão de fábrica, sendo comumente empregados para medir a distância de dois pontos opostos.

Segundo Lira (2015b), o paquímetro é um instrumento usado na obtenção de medidas externas, internas, de profundidade e de ressalto, conforme Figura 4.2, e sua construção envolve uma graduação fixa e uma auxiliar que partilha do princípio do nônio.

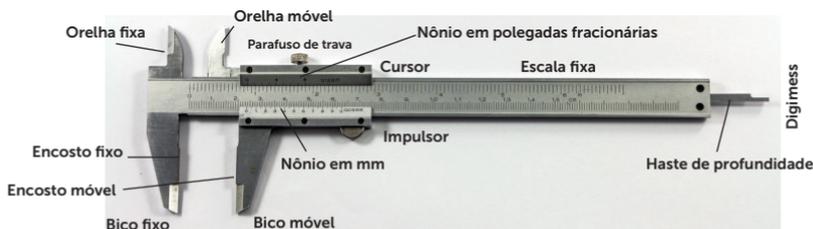
Figura 4.2 | Tipos de medições executadas por meio do paquímetro



Fonte: <<http://www.fmnovaes.com.br/aulasmetro/paqtipos.pdf>>. Acesso em: 3 jul. 2017.

Embora seja um instrumento de medição de certa simplicidade de manuseio, suas partes construtivas são um tanto quanto complexas, requerendo certo grau de conhecimento do operador. A Figura 4.3 ilustra as partes de um paquímetro universal. Vale a pena ressaltar que as orelhas do paquímetro são utilizadas para medição interna, enquanto os bicos são empregados para medição externa e de ressalto; a haste, por sua vez, é aplicada para medidas de profundidade.

Figura 4.3 | Partes construtivas de um paquímetro universal



Fonte: adaptada de: <<http://www.istockphoto.com/br/foto/compassos-de-calibre-vernier-gm531266910-93724673>>. Acesso em: 13 ago. 2017.

De acordo com o ilustrado na Figura 4.3, o paquímetro possui, ainda, um cursor que desliza sobre a régua graduada. A escala presente nesse cursor auxiliar é conhecida como nônio, em homenagem ao matemático português Petrus Nonius, que a idealizou, e possui uma divisão a mais que a unidade usada na escala fixa, de modo a possibilitar a leitura de uma fração exata de uma divisão da escala principal (Figura 4.4). Pela figura, observa-se que o nônio apresenta

10 divisões iguais a 9 mm, de modo que cada divisão equivale a 0,9 mm. Logo, há uma diferença equivalente a 0,1 mm entre o primeiro traço da escala do nônio e o primeiro traço da escala da escala fixa (LIRA, 2015a).

Figura 4.4 | Nônio e a correspondência entre escala fixa e escala auxiliar



Fonte: <<http://www.fmnoaes.com.br/aulasmetro/paqtipos.pdf>>. Acesso em: 3 jul. 2017.



Assimile

Vale a pena ressaltar que o paquímetro parte de em um princípio metrológico pioneiro que permitiu a construção de uma escala auxiliar, denominada "princípio do nônio".

Sendo assim, o operador que sabe executar medições nesse tipo de instrumento, segundo Lira (2015b), estará habilitado para medir com qualquer instrumento dotado de nônio, como o traçador de altura e o goniômetro, conforme veremos nas próximas seções.

A partir do raciocínio explicitado na Figura 4.4, podemos obter a resolução de um paquímetro. Conforme vimos na Unidade 1, uma das principais características metrológicas no tocante à indicação é a resolução, que se refere a menor diferença entre indicações que pode ser significativamente percebida. No paquímetro, a resolução é o resultado da divisão algébrica entre a unidade da escala fixa e o número de divisões do nônio. Assim, por exemplo, caso o instrumento apresente uma divisão da escala fixa de 1 mm (o que comumente ocorre) e nônio com 10 divisões, então a resolução do paquímetro será de 0,1 mm. De forma análoga, para um sistema com escala fixa de 1 mm e nônio com 20 divisões, a resolução será de 0,05 mm.

Na execução de leitura de medidas pelo paquímetro que não é digital, algumas etapas devem ser obedecidas, conforme proposto por Lira (2015a):

- Na escala fixa (mm), anote o valor inteiro que fica à esquerda da marcação de zero do nônio, ou seja, imediatamente anterior ao zero do nônio. Logo, perceba de imediato que a parte inteira da leitura é visualizada na escala fixa e sempre vai ser determinada pelo zero do nônio.
- Analise a resolução do instrumento, avaliando o resultado da divisão algébrica entre a unidade da escala fixa e o número de divisões do nônio.
- Conte os traços da escala do nônio até a posição em que um dos traços coincida com outro da escala fixa, obtendo a parte fracionária da leitura (mm).
- Some a parte inteira com a parte fracionária da leitura, obtendo a indicação final.



Exemplificando

Vamos analisar a Figura 4.5 para ver a indicação ilustrada pelo paquímetro.

Figura 4.5 | Indicação do paquímetro



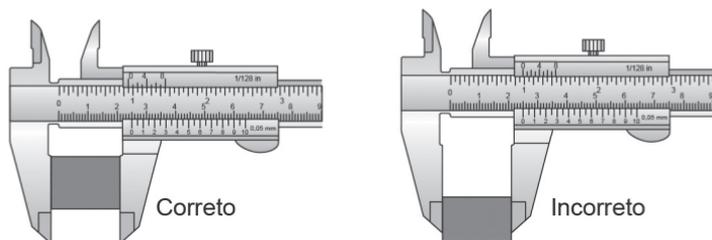
Fonte: Lira (2015a, p. 54).

- Na escala fixa (mm), anote o valor inteiro que fica imediatamente anterior ao zero do nônio. Logo, perceba o zero do nônio que está entre 149 e 150 mm, sendo 149 mm a parte inteira da leitura.
- Resolução do instrumento: a divisão da escala fixa é de 1 mm e o nônio tem 10 divisões, então a resolução é de 0,1 mm.
- Conte os traços da escala do nônio até a posição em que um dos traços coincida com outro da escala fixa. São 5 traços, o que equivale a 0,5 mm, considerando a resolução de 0,1 mm.
- Some a parte inteira com a parte fracionária da leitura (149 mm é a parte inteira e 0,5 mm é a parte fracionária), obtendo a indicação final de 149,5 mm.

Na análise de leitura da indicação do paquímetro, o erro de paralaxe é um dos mais comuns e ocorre porque os traços da escala principal não estão no mesmo plano que os traços do nônio, dificultando a visualização correta da coincidência dos traços. A fim de evitar o erro de paralaxe, o operador deve observar o paquímetro a partir de um ângulo reto em relação ao plano de referência, sem que haja inclinação. Outro erro deve-se à força aplicada no momento da medição, de modo que, se o movimento for brusco ou com excessiva força, pode incorrer em maior erro.

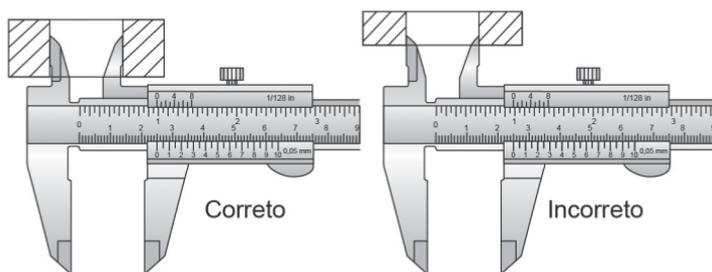
O modo de encaixar a peça nos bicos do paquímetro também pode incorrer em erro, dessa forma, o bloco a ser medido deve sempre estar no centro dos bicos e nunca nas pontas dos bicos, conforme se vê na Figura 4.6. Em medições internas, é necessário posicionar as orelhas do paquímetro o mais internamente possível, além de verificar se a peça e o paquímetro estão paralelos, conforme Figura 4.7.

Figura 4.6 | Modo de executar a medição externa no paquímetro



Fonte: adaptada de <[https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/e/e7/METROLOGIA_E_AJUSTAGEM_\(Paqu%C3%ADmetro\).pdf](https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/e/e7/METROLOGIA_E_AJUSTAGEM_(Paqu%C3%ADmetro).pdf)>. Acesso em: 3 jul. 2017.

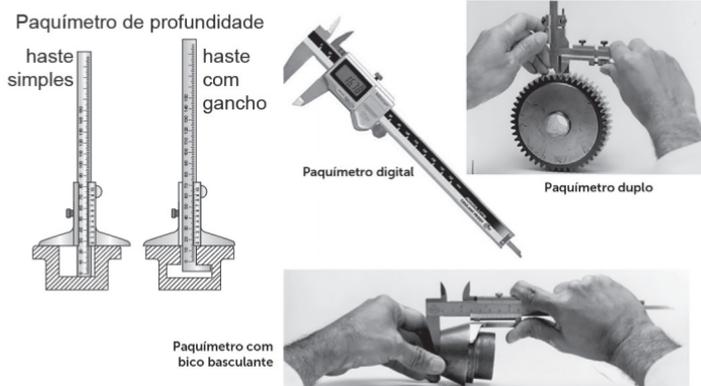
Figura 4.7 | Modo de executar a medição interna no paquímetro



Fonte: adaptada de <[https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/e/e7/METROLOGIA_E_AJUSTAGEM_\(Paqu%C3%ADmetro\).pdf](https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/e/e7/METROLOGIA_E_AJUSTAGEM_(Paqu%C3%ADmetro).pdf)>. Acesso em: 3 jul. 2017.

Além do paquímetro universal, que executa os quatro tipos de medições (interna, externa, ressalto e profundidade), há outros tipos de paquímetros (Figura 4.8): paquímetro de profundidade, empregado para medir furos, rasgos, entre outros, podendo ter haste simples ou haste com gancho; paquímetro digital, que evita erro de paralaxe e é ideal para controle estatístico da qualidade; paquímetro com bico basculante, que permite a obtenção de medidas de objetos com formatos cônicos ou com ressaltos/rebaixos; e paquímetro duplo, para medir engrenagens.

Figura 4.8 | Principais tipos de paquímetro



Fonte: <<http://www.fmnovaes.com.br/aulasmetro/paqtipos.pdf>>. Acesso em: 3 jul. 2017.

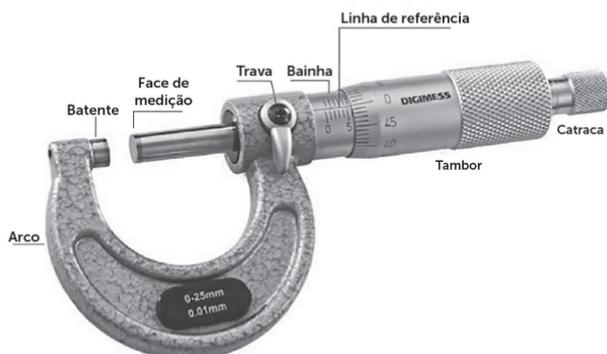


Refleta

Uma vez compreendidos os princípios e as aplicações do paquímetro, quais são as possíveis diferenciações entre paquímetro e micrômetro?

O micrômetro também é empregado para dimensões lineares e seu princípio básico de construção baseia-se no deslocamento de uma haste mediante o giro do fuso, que está acoplado a um tambor e a um cilindro fixo, conforme mostra a Figura 4.9. Trata-se de um instrumento relevante para a leitura de pequenas medidas e que pode apresentar baixa resolução em termos quantitativos (podendo alcançar resolução com até 3 casas decimais), otimizando a exatidão da medida.

Figura 4.9 | Partes construtivas do micrômetro



Fonte: Lira (2015a, p. 70).

O arco geralmente é fabricado em um aço de alta resistência ou fundido, submetido a tratamentos térmicos, de modo a reduzir tensões internas. O isolante térmico tem a função de atenuar os efeitos da transferência de calor das mãos do operador ao micrômetro. A bainha é graduada em milímetros e, na sua parte superior, existem as escalas inteiras, enquanto que, na parte inferior, se tem a escala intervalada. Há também o fuso micrométrico, que é constituído de material especial para garantir exatidão do passo da rosca. Por fim, destaca-se o tambor, que é formado por escalas divididas de acordo com a resolução do micrômetro, sendo que gira ligado ao fuso micrométrico.

Dessa forma, a cada volta do tambor, o fuso desloca uma distância equivalente ao seu passo, permitindo a obtenção da resolução do instrumento. Assim, a resolução do micrômetro equivale ao resultado da divisão algébrica do passo da rosca pelo número de divisões no tambor. Se o passo da rosca é de 0,5 mm e o tambor tem 50 divisões, a resolução será de 0,01 mm. Nos instrumentos com nônio de 10 divisões na bainha, é possível ampliar a leitura para 0,001 mm.

Para executar medições no micrômetro não digital e obter a indicação, algumas etapas devem ser seguidas:

- Fazer leitura da parte inteira na escala da bainha.
- Como a bainha é graduada a cada 0,5 mm, então, deve-se fazer a leitura dos meios milímetros (constituente da parte fracionária da leitura), também na escala da bainha.

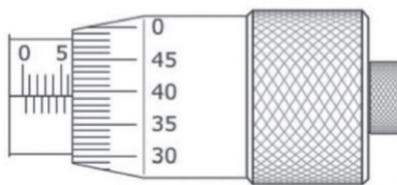
- Fazer a leitura dos centésimos de milímetro na escala do tambor, obtendo, também, a parte fracionária da indicação.
- Somar a parte inteira (bainha) com a parte fracionária (bainha + tambor) da leitura, obtendo a indicação final.



Exemplificando

Analise a Figura 4.10 para ver a indicação ilustrada pelo micrometro, que apresenta resolução de 0,01 mm.

Figura 4.10 | Indicação do micrometro



Fonte: Lira (2015a, p. 71).

- Ao fazer leitura da parte inteira na escala da bainha, observa-se, na parte superior, que há 6 traços de 1 mm indicados, ou seja, 6 mm é a parte inteira da indicação.
- Na parte inferior da bainha, observamos que não aparece o traço de 0,5 mm após o traço da indicação inteira, o que significa que o valor fracionário pela bainha é de 0,0 mm.
- A escala do tambor não coincide exatamente com a reta de referência da bainha, ficando entre 39 e 40 centésimos. Logo, a parte fracionária do tambor é de 0,39 mm.
- Some a parte inteira 6 mm com a parte fracionária (0,0 mm + 0,39 mm) da leitura, obtendo a indicação final de, aproximadamente, 6,39 mm.

De maneira semelhante ao paquímetro, o micrômetro está sujeito ao erro de paralaxe, uma vez que as escalas graduadas da bainha e do tambor não se encontram no mesmo plano. Citam-se também erros devido à pressão de medição e os erros causados pelo incorreto apoio das faces de medição na peça a ser medida.

Dentre os tipos mais comuns de micrômetro (Figura 4.11), destaca-se o micrômetro digital, que permite incertezas de medição menores,

sem erros de leitura e paralaxe; micrômetro de profundidade, que permite a medição de furos, saliências e canais; micrômetro externo com maior capacidade, empregado especificamente para obtenção de dimensões externas maiores; e micrômetro interno tipo paquímetro, utilizado para medir dimensões internas com rapidez e mais exatas.

Figura 4.11 | Principais tipos de micrômetro



Fonte: Lira (2015a, p. 80).



Pesquise mais

Assista aos vídeos a seguir para compreender melhor como executar medição com paquímetro ou micrômetro, respectivamente.

NASCIMENTO, Maércio. Aula de Paquímetro Nova. 2012. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=PqTRilxgEE>>. Acesso em: 6 jul. 2017.

_____. Aula de Micrômetro "Leitura". 2011. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=RmvOsQFN738>>. Acesso em: 6 jul. 2017.

No procedimento de medição, tanto para paquímetro quanto para micrômetro, devemos sempre executar repetidas medições do mensurando, sendo que, antes de cada medição, o instrumento deve ser zerado. Então, para obter o erro aleatório, conforme visto na Unidade 1, calculamos a incerteza padrão, que equivale ao desvio padrão (Eq. 4.1) e, então, a repetitividade (Eq. 4.2).

$$u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - I_M)^2}{n - 1}} \quad (\text{Equação 4.1})$$

$$Re = \pm(t \cdot u) \quad (\text{Equação 4.2})$$

sendo que Re = repetitividade; t = coeficiente de Student para 95,45% de probabilidade e $v = n - 1$ graus de liberdade, sendo n o número de repetições de medições; u = incerteza padrão; I_i = indicação da i -ésima medição; e I_M = indicação média.

Para obtenção do erro sistemático, já visto na Unidade 1, muitas vezes utilizamos os relatórios de calibração do equipamento, a partir do qual obtemos o parâmetro correção, que é numericamente igual e com sinal invertido ao parâmetro tendência, conforme Eq. 4.3.

$C = -Td = VV - I_M$ (Equação 4.3), sendo que Td = tendência; I_M = indicação média; VV = valor verdadeiro do mensurando.

Com base no erro aleatório e sistemático, obtemos a incerteza de medição e, então, podemos expressar o resultado de medição conforme a Equação 4.4.

$RM = RB \pm IM$ (Equação 4.4), sendo que RB = resultado base; e IM = incerteza de medição.

Vale lembrar que, quando realizamos apenas uma medição, o resultado base coincide com o resultado daquela única medição. Diferentemente, quando realizamos n medições, a indicação média torna-se o resultado base.

Sem medo de errar

Considere que você foi contratado como membro da equipe técnica de um laboratório metrológico que executa testes em peças industriais, a fim de inspecionar e validar o produto.

Na sua primeira demanda, você deve elaborar um relatório ilustrando qual o instrumento e procedimento geral de medição a ser desenvolvido para o teste de medição do comprimento (valor nominal de projeto igual a 5 cm) de um pequeno bloco de ferro e do diâmetro interno do orifício (valor nominal de projeto igual a 1,9 cm).

Inicialmente, no seu relatório, é interessante você colocar quais instrumentos são aptos a executar tais medições, do ponto de vista técnico.

O comprimento do bloco é uma medida externa de pequena magnitude, de modo que devemos empregar um instrumento com

faixa de medição compatível. Logo, podemos utilizar um paquímetro universal ou um micrômetro para dimensão externa.

Se for necessária uma indicação mais exata, isto é, resolução milesimal, dado se tratar de testes de controle, entre o paquímetro e o micrômetro, é aconselhável escolher aquela com menor resolução em termos quantitativos (maior número de casas decimais).

Quanto ao diâmetro, por ser uma medida interna, podemos utilizar um paquímetro universal ou um micrômetro interno do tipo paquímetro.

Você pode destacar no seu relatório que, se houver restrição de orçamento, com a aquisição de um paquímetro universal, é possível medir tanto o comprimento quanto o diâmetro.

Sobre o procedimento, é importante executar repetidas medições do mensurando, isto é, medir repetidas vezes tanto o comprimento quanto o diâmetro da peça em análise, sendo que, antes de cada medição, o instrumento deve ser zerado.

Então, para obter o erro aleatório, calculamos a incerteza padrão, que equivale ao desvio padrão (u) e, então, a repetitividade (Re), conforme segue:

$$u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - I_M)^2}{n - 1}}$$

$Re = \pm(t \cdot u)$, considerando que Re = repetitividade; t = coeficiente de Student para 95,45% de probabilidade e $v = n - 1$ grau de liberdade, sendo n o número de repetições de medições; u = incerteza padrão; I_i = indicação da i -ésima medição; e I_M = indicação média.

Para obtenção do erro sistemático, muitas vezes, utilizamos os relatórios de calibração do equipamento, a partir do qual obtemos o parâmetro Correção, que é numericamente igual e com sinal invertido ao parâmetro Tendência, conforme segue:

$C = -Td = VV - I_M$, sendo que Td = tendência; I_M = indicação média; e VV = valor verdadeiro do mensurando.

Com base no erro aleatório e sistemático, obtemos a incerteza de medição e, então, podemos expressar o resultado de medição conforme segue:

$RM = RB \pm IM$, sendo que RB = resultado base; e IM = incerteza de medição.

Logo, com base na peça que lhe foi solicitada, você deve apresentar o resultado de medição do comprimento e do diâmetro.

Vale lembrar que, quando realizamos apenas uma medição, o resultado base coincide com o resultado daquela única medição. Diferentemente, quando realizamos n medições, a indicação média torna-se o resultado base.

O que mais você colocaria em seu relatório?

Parabéns por mais um desafio vencido e mais um novo assunto assimilado!

Avançando na prática

Recomendações e cuidados para uso do paquímetro e micrômetro

Descrição da situação-problema

Como gestor técnico de laboratório de chão de fábrica de um indústria metal-mecânica, você analisa que os operadores estão cometendo erros triviais ao operar o paquímetro e o micrômetro. A partir de então, ao transmitir essa informação ao gerente geral, ele lhe solicita o desenvolvimento de um breve documento que apresente os tipos principais de erros que ocorrem na operação desses instrumentos, a fim de servir de alerta para os operadores. Quais são os principais tipos de erros na utilização do paquímetro e do micrômetro que devem constar no documento?

Resolução da situação-problema

Para iniciar o documento, no tocante ao paquímetro, os principais erros que devem constar são:

- **Erro resultante da flexão do braço principal:** a flexão pode ocorrer ao longo da superfície de referência (caso essa superfície flexione) ou ao longo da superfície da escala graduada. Geralmente, a causa de erros

devido à flexão da escala graduada é resultante da operação incorreta, ou mesmo do desgaste da superfície de referência.

- **Erro de paralaxe:** é um dos mais comuns e ocorre porque os traços da escala principal não estão no mesmo plano que os traços do nônio, dificultando a visualização correta da coincidência dos traços. A fim de evitar o erro de paralaxe, o operador deve observar o paquímetro a partir de um ângulo reto em relação ao plano de referência, sem que haja inclinação.
- **Erro de encaixe da peça no instrumento:** o modo de encaixar a peça nos bicos do paquímetro também pode incorrer em erro, de forma que o bloco a ser medido deve sempre estar no centro dos bicos e nunca nas pontas dos bicos. Em medições internas, é necessário posicionar as orelhas do paquímetro o mais internamente possível, além de verificar se a peça e o paquímetro estão paralelos.

Quanto ao micrômetro, é interessante que você destaque em seu documento os seguintes erros:

- **Erro de paralaxe:** ocorre porque as escalas graduadas da bainha e do tambor não se encontram no mesmo plano, dificultando a visualização correta da coincidência dos traços. A fim de evitar o erro de paralaxe, o operador deve observar o micrômetro a partir de um ângulo reto em relação ao plano de referência, sem que haja inclinação.
- **Erro de força aplicada ao instrumento:** erros devido à pressão de medição são muito comuns no micrômetro e podem chegar a comprometer o funcionamento do instrumento. Dessa forma, ao executar medidas no micrômetro, o operador deve evitar movimentos bruscos e aplicação excessiva de força.

Assim, você finaliza seu documento e ajuda os colaboradores a ficarem atentos aos principais erros de medição vinculados ao paquímetro e micrômetro, diminuindo a incerteza de medição.

Faça valer a pena

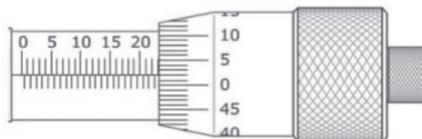
1. O paquímetro e o micrômetro são dois dos instrumentos de medição mais utilizados no chão de fábrica, sendo comumente empregados para medir a distância de dois pontos opostos. O paquímetro é um instrumento usado na obtenção de medidas externas, internas, de profundidade e de _____, e sua construção envolve uma graduação fixa e uma auxiliar que partilham do princípio do _____.

Assinale a alternativa que preenche corretamente a frase:

- a) Ressalto; tendência.
- b) Ressalto; nônio.
- c) Circularidade; Vernier.
- d) Desvio; nônio.
- e) Desvio; tendência.

2. Considere o instrumento apresentado na figura a seguir, que possui resolução de 0,01 mm, e analise sua indicação:

Figura 4.12 | Indicação do micrômetro



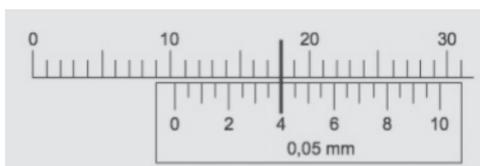
Fonte: Lira (2015a, p. 71).

Assinale a alternativa que apresenta corretamente a indicação do micrômetro:

- a) 22,00 mm.
- b) 23,52 mm.
- c) 23,70 mm.
- d) 23,20 mm.
- e) 23,02 mm.

3. Considere o instrumento apresentado na figura a seguir e analise sua indicação:

Figura 4.13 | Indicação do paquímetro



Fonte: Lira (2015a, p. 55).

Assinale a alternativa que apresenta corretamente a indicação do paquímetro:

- a) 11,40 mm.
- b) 11,04 mm.
- c) 10,18 mm.
- d) 10,40 mm.
- e) 10,04 mm.

Seção 4.2

Relógio comparador e traçador de altura

Diálogo aberto

Nesta seção, daremos continuidade ao estudo de sistemas de medição, suas características, os princípios de funcionamento e principais aplicações. Ressalta-se que tal assunto tem ênfase prática, o que lhe será muito útil no mercado de trabalho, em especial no setor industrial.

Especificamente, estudaremos sobre o relógio comparador, explorando características construtivas, princípio de funcionamento, recomendações de medição, tipos e uso. Também será abordado o traçador de altura, explorando característica construtiva, princípio de funcionamento e recomendações de medição.

Nesse contexto, considere que você foi contratado como membro da equipe técnica de um laboratório metrológico que executa testes em peças industriais, a fim de inspecionar e validar o produto. A você foi atribuída a execução de testes em peças distintas, sendo necessário o uso de diferentes instrumentos para medição das dimensões a serem inspecionadas.

Na sua segunda demanda, o gestor solicitou que você avaliasse se um bloco retangular apresenta desvio geométrico, especificamente quanto à planicidade. Diante disso, como você faria o teste de planicidade do bloco retangular, ou seja, como procederia para inspecionar se a superfície do bloco é realmente plana?

Lembre-se de que o gestor técnico lhe solicitou um relatório contendo o instrumento a ser empregado e o procedimento a ser aplicado.

A partir de agora, mãos à obra e se empenhe com dedicação e entusiasmo, para aproveitar esse conteúdo e fazer a diferença em sua carreira.

Tenha um excelente estudo!

Não pode faltar

Na busca constante por controle e melhoria de processos e produtos, são necessários variados instrumentos de medição um tanto quanto sofisticados e de grande versatilidade, sendo o relógio comparador um típico exemplo.

Conforme apresentado por Lira (2015b) e detalhado mais adiante, o relógio comparador é um medidor de deslocamento com ênfase em amplificar o movimento linear em um movimento circular, ou seja, esse dispositivo transforma deslocamentos lineares de um fuso móvel, por meio de um procedimento mecânico, em deslocamentos circulares de um ponteiro, apresentando o resultado em um indicador.

Além do sistema mecânico de amplificação, há também amplificação com sistemas digitais, elétricos e pneumáticos.

No tocante ao aspecto construtivo do relógio comparador, esse sistema é constituído por um mostrador giratório analógico ou digital graduado, possuindo um ponteiro indicador de voltas completas e um indicador adicional para o deslocamento.

Vale ressaltar que, como o mostrador é giratório, utiliza-se deste ponto para zerar o instrumento, ou seja, ajustar o ponteiro no zero do mostrador.

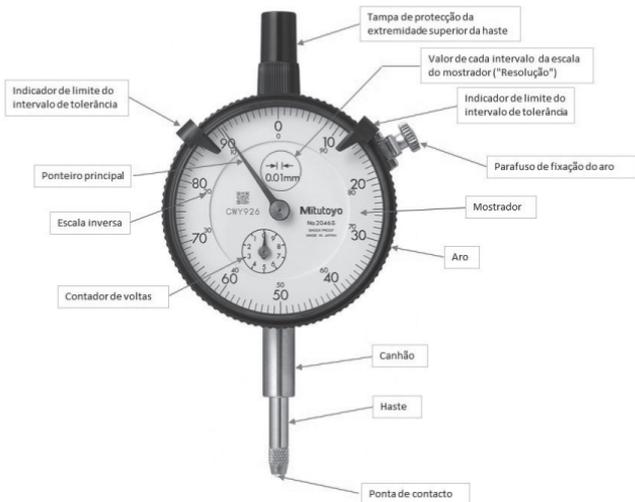
O dispositivo apresenta, também, uma ponta de contato que toca na peça e um fuso alinhado com um conjunto de engrenagens. Logo, conforme a Figura 4.14, temos como principais partes construtivas do relógio (LIRA, 2015b):

- O mostrador giratório, que possui escala graduada, possibilitando o ajuste do zero do ponteiro sem necessitar de cargas prévias.
- O ponteiro principal, que indica o deslocamento do fuso em alinhamento com a escala graduada.
- O contador de voltas inteiras, sendo constituído por uma escala circular e um ponteiro, visando à indicação do número de voltas inteiras do ponteiro principal.
- O fuso, que tem em sua constituição uma cremalheira acoplada, geralmente, a um conjunto de engrenagens, a fim de amplificar o deslocamento, conforme será explicado mais detalhadamente a seguir (mecanismos de amplificação).

- A ponta de contato, sendo utilizada em contato com a peça para fazer as leituras.

Há outros componentes, tais como o aro, que funcionam como uma capa de proteção; canhão, por meio do qual o relógio comparador é fixado nos suportes para efetuar as medidas; capa do fuso; limitador móvel de tolerância, que pode ser ajustado nos valores máximo e mínimo aceitáveis para a peça em análise; entre outros.

Figura 4.14 | Partes construtivas de um relógio comparador



Fonte: <http://bricolagetotal.com/wp-content/uploads/2013/04/Comparador_010.jpg>. Acesso em: 24 out. 2017.

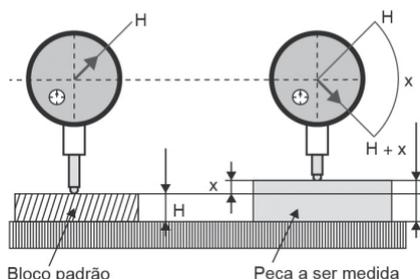
O relógio comparador é um instrumento aplicado na medição de peças que se encontram posicionadas entre sua ponta de contato e uma superfície de referência, sendo muito aplicado na indústria.

Embora sua faixa de medição seja menor quando comparada à faixa de outros instrumentos, seu uso mais comum é na medição comparativa, de modo que blocos padrão ou gabaritos, com dimensões padronizadas e assertivamente conhecidas, são usados com a finalidade de "zerar" a indicação. Depois, esses blocos são substituídos pelas peças a serem medidas, com o intuito de se obter um comparativo no tocante à dimensão analisada, de modo que se utiliza a diferença entre o padrão e a peça para se obter a medida efetiva desta (LIRA, 2015b), conforme a Figura 4.15.

Em relação ao seu princípio de funcionamento, o dispositivo apresenta a ponta de contato que, quando movimentada, causa uma

alteração no indicador do instrumento. Se a ponta for submetida a uma pressão, tem-se que o ponteiro gira no sentido horário, significando que há uma diferença positiva entre a peça medida e o padrão, ou seja, a peça possui dimensão maior que o adequado. Diferentemente, caso o ponteiro sofra um giro no sentido oposto, a peça possui dimensões menores que as predefinidas, sendo a diferença negativa (LIRA, 2015a).

Figura 4.15 | Medição comparativa por meio do uso de um relógio comparador



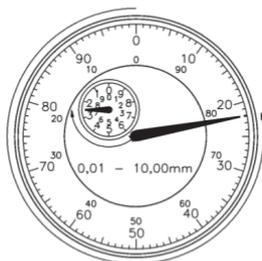
Fonte: <https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Rel%C3%B3go_comparador.jpg>. Acesso em: 19 jul. 2017.



Assimile

Vale ressaltar que, normalmente, o relógio comparador apresenta graduações tanto para a direita quanto para a esquerda, uma vez que, quando a ponta de contato sofre uma pressão, há um deslocamento do ponteiro no sentido horário, equivalendo a uma diferença positiva entre a peça e o gabarito. Diferentemente, o ponteiro pode se deslocar no sentido anti-horário, indicando uma diferença negativa entre o padrão e a peça. A Figura 4.16 ilustra bem o mostrador de um relógio comparador.

Figura 4.16 | Relógio comparador, destacando graduações no mostrador tanto no sentido horário quanto no sentido anti-horário



Fonte: <<http://www.fmnovaes.com.br/aulasmetro/relógio.pdf>>. Acesso em: 16 jul. 2017.

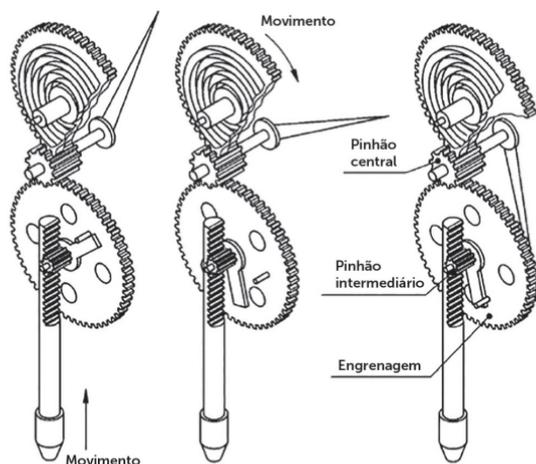
Logo, o relógio comparador atua, principalmente, no controle dimensional de peças, efetuando a comparação dessas com um protótipo de dimensões conhecidas.

A resolução de um relógio comparador está ligada à magnitude de amplificação do deslocamento, e os principais relógios comparadores utilizados na indústria apresentam resoluções de 0,01 mm, 1 mm e 10 mm.

Dentre os sistemas de amplificação, tem-se a amplificação por engrenagem, por alavanca ou mista (engrenagem e alavanca). Comumente, os dispositivos de medição comparativa baseiam-se no uso de engrenagens, de modo que, geralmente, no relógio comparador, temos uma amplificação por procedimento mecânico, a fim de amplificar o deslocamento e mostrar o resultado em um indicador por meio de um sistema de engrenagens.

A amplificação por engrenagem (Figura 4.17) ocorre por meio de um sistema constituído de uma cremalheira e engrenagens. Vale explicar que a cremalheira é uma peça mecânica que, em conjunto com uma engrenagem, transforma o deslocamento linear em deslocamento circular. Assim, a ponta de contato movimentada pelo fuso bem onde existe uma cremalheira; por sua vez, essa cremalheira aciona o pinhão com um conjunto de engrenagens ao qual está acoplado, movimentando o ponteiro do mostrador analógico (FRACARO, 2014).

Figura 4.17 | Amplificação por engrenagem



Fonte: Fracaro (2014, p. 16).

O sistema de amplificação por alavanca, empregado nos indicadores por alavanca, é mais simples, mas permite medições mais exatas (baixa resolução), apresentando alto custo e sendo aplicado, principalmente, no controle de nível, paralelismo e alinhamento de peças.

No sistema misto de amplificação, tem-se alavanca e engrenagem trabalhando juntas e isso permite aumentar a resolução do instrumento até 0,001 mm, sem reduzir a capacidade de medição (FRACARO, 2014).

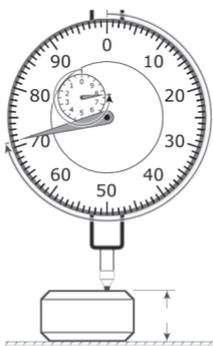
A leitura no relógio comparador é simples de ser executada, de modo que, por exemplo, em um relógio com 100 divisões na escala principal, sendo que cada divisão corresponde a 0,01 mm, mede, portanto, 1 mm a cada volta completa do ponteiro. As voltas inteiras são indicadas no contador de volta.



Exemplificando

Vamos tomar como exemplo a Figura 4.18, a qual mostra um deslocamento do ponteiro no sentido horário, ou seja, é sabido que a peça apresentou uma diferença positiva em relação ao padrão.

Figura 4.18 | Indicação em um relógio comparador



Fonte: <<http://www.stefanelli.eng.br/relogio-comparador-virtual-simulador-milimetro/>>. Acesso em: 16 jul. 2017

Temos um relógio com 100 divisões na escala principal e cada divisão equivale a 0,01 mm (resolução do instrumento). Assim, cada volta completa do ponteiro maior equivale a 1 mm. Primeiro, fazemos a leitura do ponteiro menor (que indica a quantidade de voltas completas realizada pelo ponteiro maior). O ponteiro menor indica o número

de voltas inteiras e, neste caso, encontra-se entre a graduação 7 e 8, correspondendo, então, a 7 voltas completas.

O ponteiro maior indica o deslocamento e, neste caso, está apontando para a graduação 71 do mostrador, indicando 0,71 mm de deslocamento. Logo, tem-se uma indicação de 7,71 mm.

Quanto aos diferentes usos do relógio comparador, a Figura 4.19 apresenta alguns casos em que esse instrumento é utilizado em medições comparativas. Repare que em todos os casos temos análise de forma, algo está diretamente ligado à tolerância geométrica que estudamos na Unidade 3.

Sendo um tipo de relógio comparador, com mesmo mecanismo de funcionamento e leitura da indicação, destaca-se também o relógio apalpador, que possui ponta de contato do tipo alavanca. Seu uso é mais apropriado na medição da excentricidade, centralização e alinhamento de peças, paralelismo, medições em locais de acesso difícil, medições internas etc. (LIRA, 2015a).



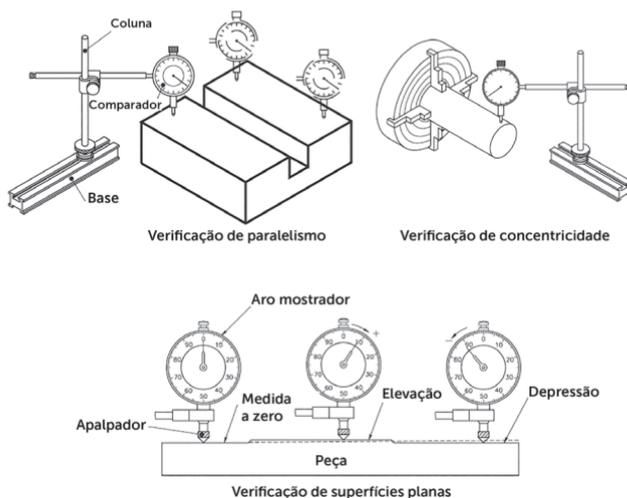
Pesquise mais

A fim de assimilar mais pontos sobre o relógio comparador, assista ao vídeo a seguir e veja exemplos de ensaios que conseguimos fazer com esse dispositivo.

Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=im5HJczp2L0>>.

Ressalta-se que alguns cuidados devem ser considerados no uso do relógio comparador: não utilizar ponta de contato desgastada; montar o relógio comparador perpendicularmente à peça a ser medida; fazer leituras sempre de frente para o mostrador, a fim de evitar erro de paralaxe; etc. (LIRA, 2015b).

Figura 4.19 | Aplicações de relógios comparadores



Fonte: Fracaro (2014, p. 24-30).



Refleta

Vimos até aqui que o relógio comparador é empregado na medição comparativa, de modo que se utilizam, por exemplo, blocos padrão ou gabaritos para executar as medições. Logo, como você considera que poderia ser realizada a calibração neste tipo de instrumento?

Antes de iniciar o dia de trabalho com o relógio comparador, é sugerida a verificação das condições do instrumento. Dessa forma, são usados blocos padrão, a fim de verificar se as medidas indicadas no relógio são condizentes com as medidas dos blocos.

Estudado o relógio comparador, vamos nos debruçar no traçador de altura, que é, basicamente, um dispositivo constituído por uma régua graduada fixa a uma base plana (denominada desempeno), conforme apresentado na Figura 4.20. Seu princípio de funcionamento é igual ao do paquímetro, ou seja, baseia-se no princípio do nônio visto na seção anterior.

O traçador de altura possui uma escala fixa, normalmente graduada em milímetros (na qual 1 divisão é igual a 1 mm), com cursor na vertical. Quando o dispositivo tem a graduação em milímetro, a

escala do nônio tem 50 divisões, conferindo ao instrumento uma resolução de 0,02 mm (LIRA, 2015a).

Figura 4.20 | Traçador de altura



Fonte: adaptada de: <goo.gl/Uf35QV>. Acesso em: 13 ago. 2017.

No traçador de altura, não há problema vinculado ao erro de paralaxe, pois o nônio está no mesmo plano da escala principal. Contudo, alguns cuidados devem ser aplicados quanto ao posicionamento da peça, à aplicação de força, ao apoio da base em superfície irregular, entre outros (LIRA, 2015b).

Esse dispositivo é comumente utilizado na traçagem de peças, como riscador, ou na medição de alturas e ressaltos, bem como na análise de desvios de forma, estando, neste caso, associado a um relógio comparador, conforme a Figura 4.21.



Pesquise mais

A fim de assimilar mais pontos sobre o traçador de altura, faça a leitura do Capítulo 7 do livro a seguir:

LIRA, F. A. de. **Metrologia dimensional**: técnicas de medição e instrumento para controle e fabricação industrial. São Paulo: Érica, 2015.

Lembre-se de que este livro está disponível em sua biblioteca virtual!

Figura 4.21 | Traçador de altura acoplado a um relógio comparador para análise de desvios de planicidade em relação ao desempenho



Fonte: Lira (2015a, p. 93).

Sem medo de errar

Como membro da equipe técnica de um laboratório metrológico, foi lhe solicitado, pelo gestor técnico, avaliar se um bloco retangular apresenta desvio geométrico, especificamente quanto à planicidade.

Primeiramente, em seu relatório, é importante você esclarecer que a verificação de planicidade refere-se a uma análise de desvio de forma (associada à tolerância geométrica) e, comumente, é executada por meio de um relógio comparador.

Posteriormente, é interessante você colocar as etapas do procedimento de verificação de planicidade:

1. Inicialmente, o instrumento deve ser afixado em um suporte que atua em conjunto com um desempenho, sendo que este vai garantir que a medição ocorra em um plano perfeito.
2. Coloque a ponta de contato do instrumento no desempenho e ajuste o zero do dispositivo, girando o mostrador até a marcação do zero ficar alinhada com o ponteiro.
3. Sem fazer um movimento brusco, levante o fuso até que tenha espaço suficiente para a entrada da peça que se quer analisar.

4. Retorne o fuso até encostar na peça, com cuidado.
5. Com ponta de contato posicionado em um ponto inicial da peça, deslize cuidadosamente a peça, sempre com a ponta de contato no objeto, e analise o movimento dos ponteiros.
6. Vale ressaltar que, para percorrer a peça com a ponta de contato, pode-se optar por movimentos horizontais, verticais e inclinados. Assim, é possível analisar se há desvio de planicidade em todas as direções da peça.
7. Caso o ponteiro gire no sentido horário, significa que a peça apresenta uma elevação, ou seja, uma diferença positiva como desvio de planicidade. Diferentemente, caso o ponteiro gire no sentido anti-horário, significa que a peça apresenta uma depressão, ou seja, uma diferença negativa como desvio de planicidade.
8. Para fazer a leitura da indicação do relógio, leia o contador de volta inteira, bem como o ponteiro principal de deslocamento.

Parabéns, mais um conhecimento construído e desafio vencido!

Avançando na prática

Processo de verificação de relógio comparador

Descrição da situação-problema

Imagine-se como gestor técnico de um laboratório de chão de fábrica de uma indústria automobilística. Ao analisar o trabalho de sua equipe na verificação de desvios de forma em peças por meio do emprego de um relógio comparador, você percebe que, ao iniciar o dia de trabalho, nenhum membro da equipe realiza a verificação das condições do dispositivo.

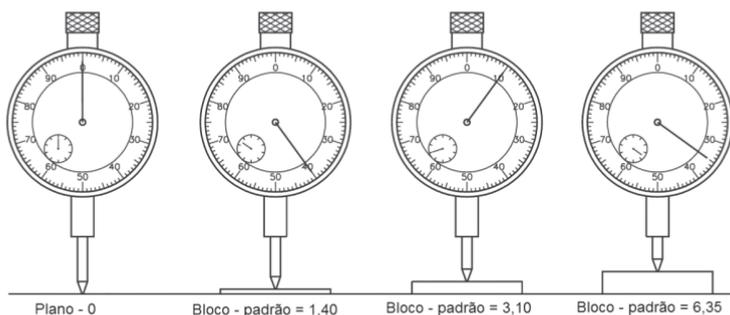
Ao abordar esse fato com o gestor geral do chão de fábrica, ele lhe solicita desenvolver um protocolo, explicando o procedimento de verificação do relógio comparador. Nesse contexto, o que você colocaria no seu documento?

Resolução da situação-problema

Inicialmente, é interessante você colocar no seu parecer a importância da verificação do instrumento a cada uso, a fim de garantir a confiabilidade metrológica.

No tocante ao relógio comparador, é válido inserir uma figura (Figura 4.22) bem didática que mostre o uso de blocos padrão como provas de gabarito para o processo de verificação.

Figura 4.22 | Processo de verificação de um relógio comparador



Fonte: Fracaro (2014, p. 24).

No primeiro procedimento, com o instrumento fixado no suporte, o ponteiro do relógio comparador deve ficar em uma posição bem próxima ao zero, antes de tocar na peça. Assim, ao começar o processo de verificação, coloque a ponta de contato do relógio no desempenho e ajuste o zero do dispositivo, girando o mostrador até a marcação do zero ficar alinhada com o ponteiro.

Então, escolha pelo menos três blocos padrão de dimensões distintas e, para cada padrão, coloque o relógio sempre em uma posição perpendicular em relação à peça, a fim de evitar erros de medição.

Ao se efetuar a medição de cada padrão, a indicação apresentada pelo dispositivo deve ser comparada com a dimensão sabida do padrão.

Podemos assegurar que o dispositivo está nas melhores condições se a indicação coincidir com o valor real do padrão; caso contrário, é interessante orientar a equipe a solicitar a calibração do relógio comparador.

Você colocaria algo mais no seu relatório?

Faça valer a pena

1. Quanto ao relógio comparador, analise as afirmativas a seguir:

I. Trata-se de um dispositivo de medição comparativa, que emprega blocos padrão ou gabarito como referência de medição.

II. Comumente, utiliza sistema de amplificação por engrenagem, de modo que, por meio de um processo elétrico, amplifica-se o deslocamento.

III. Em relação ao seu princípio de funcionamento, o dispositivo apresenta a ponta de contato que, quando movimentada, causa uma alteração no indicador do instrumento. Se a ponta for submetida a uma pressão, tem-se que o ponteiro gira no sentido horário, significando que há uma diferença positiva entre a peça medida e o padrão.

Analisando as afirmações de I a III, assinale a alternativa correta:

- a) Somente III é correta.
- b) Somente II e III são corretas.
- c) Somente I e II são corretas.
- d) Somente I é correta.
- e) Somente I e III são corretas.

2. No traçador de altura, não há problema vinculado a _____, pois o nônio está no mesmo plano da escala principal. Contudo, alguns cuidados devem ser aplicados quanto ao posicionamento da peça, aplicação de força, apoio da base em superfície irregular, entre outros.

Esse dispositivo, comumente, é utilizado na traçagem de peças, como riscador, ou na medição de alturas e ressaltos, bem como na análise de desvios de forma, estando, neste caso, associado a um _____.

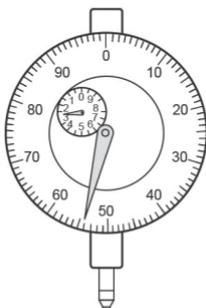
Assinale a alternativa que completa a frase corretamente:

- a) Erro de paralaxe; relógio comparador.
- b) Erro de pressão; micrômetro.
- c) Erro de paralaxe; micrômetro.
- d) Erro de pressão; relógio comparador.
- e) Erro de paralaxe; paquímetro.

3. Analise a indicação mostrada no relógio comparador, de acordo com

a figura a seguir:

Figura 4.23 | Indicação do relógio comparador



Fonte: Lira (2015a, p. 113).

Assinale a alternativa que indica corretamente a indicação apresentada na figura, considerando a resolução do instrumento como 0,01 mm e deslocamento no sentido horário:

- a) 0,54 mm.
- b) 2,54 mm.
- c) 3,54 mm.
- d) 7,54 mm.
- e) 8,54 mm.

Seção 4.3

Projektor de perfil e instrumentos de medição auxiliares

Diálogo aberto

Nesta seção, finalizaremos o estudo dos principais sistemas de medição, suas características, os princípios de funcionamento e as principais aplicações. Ressalta-se que tal assunto tem ênfase prática, o que lhe será muito útil no mercado de trabalho, em especial, no setor industrial. Vale lembrar que até agora já estudamos o paquímetro, o micrômetro, o relógio comparador e o traçador de altura.

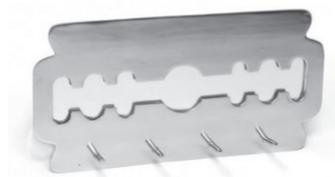
Agora vamos estudar sobre o projetor de perfil, explorando características construtivas, princípio de funcionamento, recomendações de medição, tipos e uso. Também serão abordados instrumentos de medição auxiliares, como régua graduada, trena, goniômetro e calibradores.

Nesse contexto, vamos retomar o fato de que você foi contratado como membro da equipe técnica de um laboratório metrológico que executa testes em peças industriais, a fim de inspecionar e validar o produto.

A cada semana, um conjunto de peças para inspeção e validação é entregue ao laboratório e, então, o gestor técnico divide a demanda entre os colaboradores da equipe técnica. A você foi atribuída a execução de testes em peças distintas, sendo necessário o uso de diferentes instrumentos para medição das dimensões a serem inspecionadas.

Na sua última demanda, você deve executar o teste de medição em uma pequena lâmina com geometria complexa (Figura 4.24). Qual instrumento e procedimento de medição você adotaria para garantir resultados assertivos?

Figura 4.24 | Pequena lâmina com geometria complexa para análise no laboratório metroológico



Fonte: <<http://www.casadiseno.com.br/porta-chaves-lamina>>. Acesso em: 23 jul. 2017.

Lembre-se de que o gestor técnico lhe solicitou essas informações em formato de relatório.

A partir de agora, mãos à obra e se empenhe com dedicação e entusiasmo, para aproveitar esse conteúdo e fazer a diferença em sua carreira.

Tenha um excelente estudo!

Não pode faltar

Na indústria, muitas vezes, nos deparamos com peças muito pequenas e com geometria complexa, cujas dimensões e detalhes dificilmente poderiam ser obtidos por meio do emprego de paquímetro e micrômetro.

Observe, por exemplo, a Figura 4.25, a qual ilustra uma chave com muitos detalhes, de pequenas dimensões, em sua geometria. De acordo com o estudado até aqui, você acredita que poderíamos empregar, por exemplo, o paquímetro para obter todas as medidas da peça?

Figura 4.25 | Chave com geometria complexa



Fonte: <<https://brasilde longe.com/tag/bloco-chave-de-ouro/>>. Acesso em: 23 jul. 2017.

Por mais que possamos assegurar que o paquímetro tenha faixa de medição e resolução compatível com o necessário para medir a peça, certamente, as angulações não poderiam ser obtidas com esse instrumento, além de que seria muito complicado ajustar os bicos do paquímetro para medições tão pequenas, uma vez que se trata de medição com base em contato.

Dessa forma, temos um sistema de medição mais complexo, que é muito utilizado no âmbito metrológico industrial, denominado **projedor de perfil**. Segundo Lira (2015a), o projetor de perfil permite medições mais exatas e sem distorções, a partir da aplicação da projeção ampliada do objeto em um anteparo, fazendo uso de peças ópticas, conforme será detalhado em uma figura adiante.



Assimile

Perceba que o projetor de perfil é semelhante a um projetor de imagens que apresenta, em seu visor, a imagem ampliada da peça. Além disso, pode ser entendido como um medidor a duas coordenadas, sendo recomendável seu uso para medição de peças pequenas e com geometria complexa, possibilitando a obtenção do perfil, com suas respectivas dimensões, do objeto em análise.

Uma das vantagens do emprego do projetor de perfil refere-se ao fato de que peças de plástico ou borracha podem ser analisadas diretamente pelo dispositivo sem que ocorram deformações, uma vez que não há contato físico na medição (LIRA, 2015b).

A projeção do objeto em análise pode ocorrer de três formas distintas: **projeção diascópica**, **projeção episcópica** e **projeção mista**.

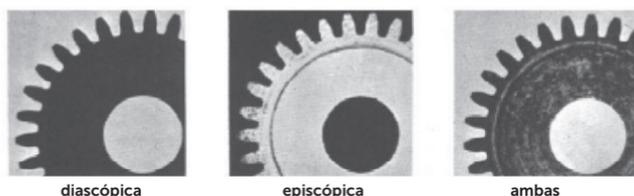
Na projeção diascópica, liga-se a lâmpada L1 e ocorre a concentração do feixe de luz por meio de uma lente (condensador), o qual é desviado por um espelho plano, de modo a iluminar a peça em análise (presente na mesa de medição do sistema) por baixo. Nesse tipo de projeção, os detalhes do contorno (sombra projetada) da peça ficam evidentes em um anteparo.

Na projeção episcópica, que se liga à lâmpada L2, também ocorre a concentração do feixe de luz por meio de uma lente (condensador),

mas ele incide em um espelho parcial (refletor) sob um ângulo de 45 graus. Como a luz é refletida para baixo, tem-se, então, toda a superfície da peça iluminada, passando pelo refletor e sendo desviada para o anteparo.

Na projeção mista, a peça é iluminada pelos dois feixes, de modo que é possível analisar a imagem projetada tanto do contorno quanto da superfície da peça (LIRA, 2015a). A Figura 4.26 apresenta a diferença entre os tipos de projeção de acordo a imagem obtida.

Figura 4.26 | Diferença entre os tipos de projeção de acordo a imagem obtida

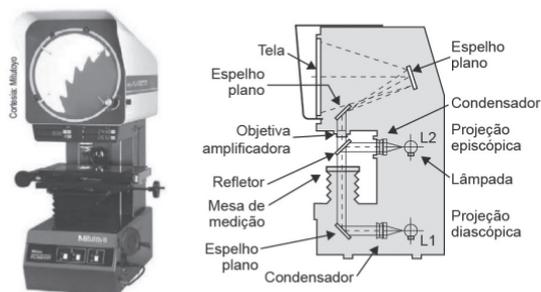


Fonte: <goo.gl/z2LYib>. Acesso em: 13 ago. 2017.

A Figura 4.27 ilustra o esquema do projetor de perfil. Repare que, dentre as partes construtivas do sistema, temos a mesa de medição, que é móvel e possibilita selecionar a parte da peça que vai ser iluminada, seja por baixo e/ou por cima, através da placa de vidro em sua área central.

Assim, no momento em que se coloca o objeto a ser medido sobre a mesa, a peça é iluminada e a imagem ampliada é projetada na sua tela do projetor, na qual estão gravadas duas linhas perpendiculares, que podem ser utilizadas como referência nas medições (LIRA, 2015a).

Figura 4.27 | Projetor de perfil e suas partes construtivas



Fonte: Lira (2015a, p. 155).



Certamente, um tipo de projeção é mais recomendável que outro de acordo com o que se quer medir na peça.

Logo, qual é a diferença de propósitos de medição, considerando o tipo de projeção em um projetor de perfil?

No tocante ao procedimento de medição, existem algumas etapas a serem seguidas, a fim de se ter um resultado de medição assertivo:

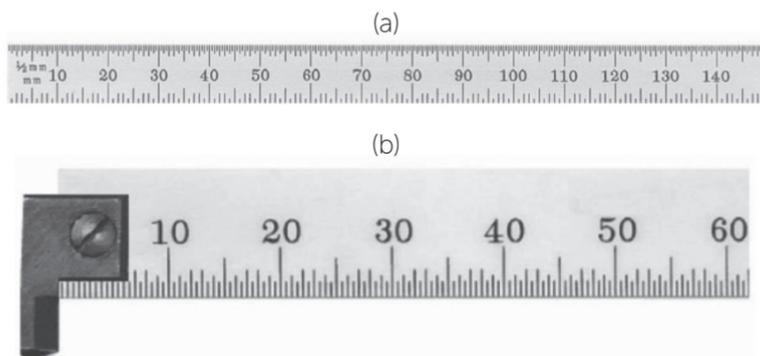
1. Inicialmente, deve-se posicionar a peça na mesa de medição.
2. Então, escolhe-se a melhor lente de ampliação (5x, 10x, 20x, 50x e até 100x) e o tipo de projeção, de acordo com o que se quer analisar da peça.
3. Ajusta-se o zero da peça com a linha da tela de projeção e desloca-se a mesa de medição até a linha atingir o outro ponto da peça.
4. Observa-se a indicação da medida da peça na tela do projetor e, para medições de ângulos, é interessante empregar o giro da tela de projeção.

No tocante aos instrumentos de medição auxiliares, vale destacar: **régua graduada, trena, goniômetro e calibradores.**

Comumente, as réguas graduadas apresentam-se como uma lâmina metálica flexível ou semiflexível, sendo fabricada em aço inoxidável ou aço-carbono e servindo de base para medições diretas de comprimento. Nesses instrumentos, são marcadas as unidades de medida de comprimento do sistema métrico (milímetros e centímetros) ou do sistema inglês (polegadas e suas respectivas frações); podem haver também alguns dispositivos que possuem as unidades gravadas em ambos os sistemas de medida (LIRA, 2015a).

As escalas mais comuns são de 150 e de 300 mm, mas é possível encontrar instrumentos com escala entre 200 e 3000 mm. Outra distinção refere-se às escalas sem encosto ou com gancho. O primeiro caso (Figura 4.28a) é o tipo mais utilizado em oficinas, laboratórios e indústria, sendo que o modo mais fácil de se efetuar medições com esse dispositivo é fazer a diferença entre a leitura obtida e um ponto de referência da peça. No segundo caso (Figura 4.28b), réguas com gancho permitem a obtenção de medições de cantos redondos e ajuste de compassos.

Figura 4.28 | régua com encosto (a) e régua com gancho reversível (b)



Fonte: Lira (2015a, p. 42).

Quanto aos cuidados com a régua graduada, deve-se evitar quedas e choques, para não causar deformidades no dispositivo. Também, não se deve flexionar ou torcer a régua, com o risco de empená-la, além de que é importante efetuar uma limpeza posterior ao uso, removendo umidade e impurezas que possam resultar em oxidação.

A trena também é muito utilizada em medição direta de comprimento, principalmente em dimensões lineares de grande magnitude. Em termos construtivos, trata-se de um instrumento constituído por fita de aço tratada termicamente e temperada, conferindo flexibilidade e estabilidade dimensional. Quanto aos tipos de uso, o espectro é vasto, desde uso doméstico até industrial, tratando-se de um instrumento barato e versátil.

Para a execução de medidas, a fita deve ficar apoiada de modo bem esticado e retilíneo. Além disso, em medições internas, sempre acrescenta-se o comprimento do estojo ao qual está acoplada a trena; em contrapartida, em medições externas, emprega-se o gancho para identificar o ponto de referência inicial da medição. Destaca-se que, no mercado, há trenas digitais a *laser*, as quais possuem faixa de medição de até 50 m, e os cuidados com o instrumento equivalem àqueles da régua graduada (LIRA, 2015b).

Quando se tem a medição de ângulo, na metrologia, comumente, utiliza-se um goniômetro (Figura 4.29), isto é, um transferidor universal constituído por uma escala graduada circular e um nônio.

Cada divisão no disco do nônio equivale a 5' (cinco minutos) e o instrumento ajusta-se à peça, permitindo uma leitura exata do objeto.

Vale ressaltar, também, que o disco apresenta graduações à esquerda e à direita do zero até 90 graus; do mesmo modo, o nônio, que apresenta graduações à esquerda e à direita do zero com 12 traços de 5' cada (LIRA, 2015a).

Figura 4.29 | Goniômetro e suas partes construtivas



Fonte: Lira (2015a, p. 98).



Exemplificando

Considere a indicação apresentada na Figura 4.30:

Figura 4.30 | Indicação em um goniômetro



Fonte: Lira (2015a, p. 98).

Inicialmente, com base no princípio do nônio aplicado ao paquímetro, vamos analisar onde o zero do nônio coincide com a escala do disco. percebemos que está entre 50 e 51 graus, de modo que temos uma indicação de 51 graus.

Quanto à leitura de minutos, à esquerda do nônio, percebemos que o quarto traço a partir do zero do nônio coincide com o traço do disco. como temos um deslocamento de 5 minutos a cada traço, então, considera-se um total de 20 minutos ao coincidir com o quarto traço.

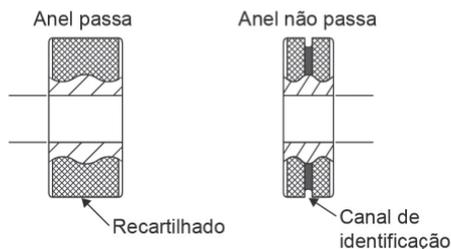
Logo, a indicação final do goniômetro é de 51 graus e 20 minutos.

Quanto aos calibradores, podemos dizer que estes são utilizados no controle dimensional (tolerância dimensional), e um dos tipos mais utilizados é o calibrador anel, que pode ser liso ou roscados. O calibrador anel, comumente utilizado na inspeção de pinos, eixos e parafusos, é empregado por meio da formação de um jogo passa e não passa.

O tipo anel liso cilíndrico é utilizado na calibração de micrômetro interno e de paquímetro, bem como no ajuste do zero de outros instrumentos de medição.

Na verificação de eixos lisos por meio desse tipo de calibrador, pode-se assegurar que o eixo em análise estará dentro de suas especificações, caso entre no calibrador anel passa (verificação do diâmetro externo máximo do eixo) e não entre no calibrador anel não passa (verificação do diâmetro externo mínimo do eixo). A Figura 4.31 apresenta uma ilustração do anel passa e do anel não passa para o calibrador tipo anel liso.

Figura 4.31 | Calibrador anel liso passa e calibrador anel liso não passa



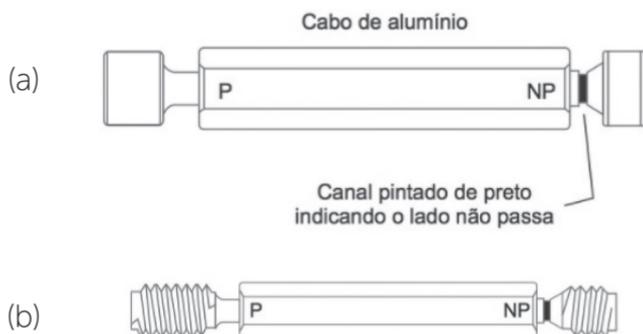
Fonte: Lira (2015a, p. 146).

Há também o calibrador anel roscado cilíndrico e anel roscado cônico, e ambos são empregados formando o jogo passa e não passa para a inspeção de eixos roscados, de modo análogo ao calibrador do tipo anel liso.

Para a inspeção de furos, são utilizados calibradores do tipo tampão, que também funcionam por meio do jogo passa e não passa. Dessa forma, o furo em análise estará em conformidade com a tolerância especificada, caso o calibrador tampão passa entrar no furo e o calibrador tampão não passa não entrar no furo (LIRA, 2015a).

Tem-se o calibrador tampão liso, que verifica furos lisos, e o calibrador tampão roscado, que inspeciona furos roscados, conforme se vê na Figura 4.32.

Figura 4.32 | Calibrador tampão liso (A) e calibrador tampão roscado (B), sendo que P equivale ao passa e NP equivale ao não passa



Fonte: Lira (2015a, p. 144).



Pesquise mais

Ainda no âmbito de calibradores e similares, vale a pena ler a respeito de verificadores, no Capítulo 9, do livro a seguir:

LIRA, F. A. de. **Metrologia dimensional**: técnicas de medição e instrumento para controle e fabricação industrial. São Paulo: Érica, 2015. p. 103-110.

Lembre-se de que este livro se encontra disponível em sua biblioteca virtual.

Sem medo de errar

Vamos retomar o fato de que você foi contratado como membro da equipe técnica de um laboratório metrológico que executa testes em peças industriais, a fim de inspecionar e validar o produto.

Na sua última demanda, você deve executar o teste de medição em uma pequena lâmina com geometria complexa, sendo de sua responsabilidade redigir um relatório apresentando o instrumento e o procedimento de medição a serem adotados.

Assim, no início do seu relatório, já é interessante você pontuar que, por mais que possamos assegurar que um paquímetro ou um micrômetro tenham faixa de medição e resolução compatível com o necessário para medir a peça, certamente, as angulações presentes na lâmina não poderiam ser obtidas com esses instrumentos, além de que seria muito complicado ajustar esses sistemas para medições tão pequenas, uma vez que se trata de medição com base em contato, no caso do paquímetro e do micrômetro.

Dessa forma, temos um sistema de medição mais complexo, o qual é muito utilizado no âmbito metroológico industrial, denominado projetor de perfil.

No tocante ao procedimento de medição, considerando a lâmina que se quer analisar, existem algumas etapas a serem seguidas, a fim de se ter um resultado de medição assertivo:

1. Inicialmente, deve-se posicionar a lâmina na mesa de medição.
2. Então, escolhe-se a melhor lente de ampliação (10x, 20x etc.) de acordo com o detalhamento que se quer da peça.
3. Posiciona-se a chave que permite a projeção de acordo com o que se quer analisar na lâmina. Como neste caso pretende-se medir a peça por completo, o ideal é você sugerir em seu relatório o emprego da projeção mista, que ilumina a peça por baixo e por cima, de modo a ampliar tanto o contorno quanto a superfície da lâmina.
4. Ajusta-se o zero da lâmina com a linha da tela de projeção e desloca-se a mesa de medição até a linha atingir o outro ponto da peça.
5. Observa-se a indicação da medida da peça na tela do projetor e, para medições de ângulos presentes na lâmina, é interessante empregar o giro da tela de projeção, a fim de obter as medidas.

Você acrescentaria algo em seu relatório?

Parabéns, mais um desafio vencido!

Calibradores

Descrição da situação-problema

Como consultor na área de metrologia, você é contratado por uma indústria de fabricação de peças para motocicletas com o propósito de auxiliar na implementação da atividade de verificação quanto ao controle dimensional, de eixos e furos no departamento de controle geométrico da empresa. Assim, o gestor lhe solicita a elaboração de um protocolo geral que sirva de diretriz para a equipe técnica fazer a inspeção de eixos e furos, a fim de verificar se as peças atendem à tolerância dimensional. Considerando essa demanda, o que você colocaria em seu protocolo?

Resolução da situação-problema

Inicialmente, procure colocar no seu protocolo que, para inspeção/verificação de peças com fins de controle dimensional, comumente, empregam-se calibradores.

O calibrador anel seria a opção para a equipe técnica inspecionar eixos e parafusos, sendo empregado por meio da formação de um jogo passa e não passa. Tem-se dois tipos principais de calibrador tipo anel: calibrador anel liso e calibrador anel roscado. A diferença entre eles está no fato de que o primeiro é utilizado na verificação de eixos lisos, enquanto o segundo na inspeção de eixos roscados.

De acordo com o jogo passa e não passa, pode-se assegurar que o eixo em análise estará dentro de suas especificações, caso entre no calibrador anel passa (verificação do diâmetro externo máximo do eixo) e não entre no calibrador anel não passa (verificação do diâmetro externo mínimo do eixo).

Para a inspeção de furos, são utilizados calibradores do tipo tampão, que também funcionam por meio do jogo passa e não passa. Dessa forma, o furo em análise estará em conformidade com a tolerância especificada, caso o calibrador tampão passa entrar no furo e o calibrador tampão não passa não entrar no furo.

Logo, é interessante colocar todas essas informações no seu protocolo, com o objetivo de direcionar o trabalho do time técnico do departamento de controle geométrico.

Faça valer a pena

1. Quanto ao projetor de perfil, avalie as afirmativas de I a III:

I. O projetor de perfil pode ser entendido como um medidor a duas coordenadas (dimensões x e y).

II. É recomendável seu uso para medição de peças pequenas e com geometria complexa, possibilitando a obtenção do perfil, com suas respectivas dimensões, do objeto em análise.

III. Uma das vantagens do emprego do projetor de perfil refere-se ao fato de que peças de plástico ou borracha podem ser analisadas diretamente pelo dispositivo, sem que ocorra deformações, uma vez que não há contato físico na medição.

Assinale a alternativa que contém as afirmativas corretas:

- a) Somente III é correta.
- b) Somente I e II são corretas.
- c) Somente I e III são corretas.
- d) I, II e III são corretas.
- e) Somente II e III são corretas.

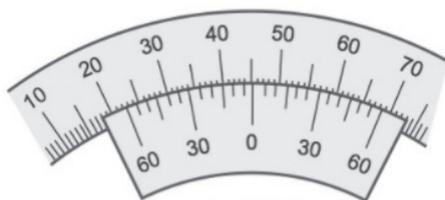
2. Os(as) _____ apresentam-se como uma lâmina metálica flexível ou semiflexível, sendo fabricada em aço inoxidável ou _____ e servindo de base para medições diretas de comprimento. Nestes instrumentos, são marcadas as unidades de medida de comprimento do sistema métrico (milímetros e centímetros) ou do _____ (polegadas e suas respectivas frações); podem haver também alguns dispositivos que possuem as unidades gravadas em ambos os sistemas de medida.

Assinale a alternativa que preenche corretamente a frase:

- a) Trenas digitais; aço-carbono; sistema inglês.
- b) Réguas graduadas; aço-carbono; sistema inglês.
- c) Réguas graduadas; ferro; sistema francês.
- d) Paquímetros; aço-carbono; sistema americano.
- e) Micrômetros; aço-carbono; sistema inglês.

3. Considere a indicação de um goniômetro, conforme figura apresentada a seguir:

Figura 4.33 | Indicação do goniômetro



Fonte: Lira (2015a, p. 98).

Assinale a alternativa que apresenta a indicação correta do goniômetro:

- a) 45 graus.
- b) 40 graus.
- c) 55 graus e 30 minutos.
- d) 45 graus e 55 minutos.
- e) 45 graus e 30 minutos.

Referências

FRACARO, J. **Relógio Comparador**. Arquivos de aula – UTFPR, 2014. Disponível em: <paginapessoal.utfpr.edu.br/janainaf/metrologia/aulas/AULA_15.pdf>. Acesso em: 16 jul. 2017.

LIRA, F. A. de. **Metrologia dimensional**: técnicas de medição e instrumento para controle e fabricação industrial. São Paulo: Érica, 2015a.

_____. **Metrologia na Indústria**. 3. ed. São Paulo: Érica, 2015b.

ISBN 978-85-522-0192-2



9 788552 201922 >