

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Samuel Mendes
Franco E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 28/06/96
Olívio Novaski
ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Requisitos Para Aplicação e Avaliação de Confiabilidade Metrológica em Laboratório de Metrologia

Autor : Samuel Mendes Franco

Orientador : Olívio Novaski

PUBLICAÇÃO

FEM 35/96

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**

Requisitos Para Aplicação e Avaliação de Confiabilidade Metrológica em Laboratório de Metrologia

Autor: **Samuel Mendes Franco**

Orientador: **Olivio Novaski**

Curso: Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Dissertação de mestrado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 1996

S.P. - Brasil



UNIDADE	700
N.º CHAMADA:	T/UNICAMP
	F848r
V.	Ex
TRABO B.	129133
PRCC	667/96
C	☐
D	☒
PRECO	R\$ 11,00
DATA	26/11/96
N.º CPD	

CM.00095016-3

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

F848r

Franco, Samuel Mendes

Requisitos para aplicação e avaliação de confiabilidade
metroológica em laboratório de metrologia / Samuel
Mendes Franco.--Campinas, SP: [s.n.], 1996.

Orientador: Olivio Novaski.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Metrologia. 2. Calibração. 3. Técnicas de medição.
4. Instrumentos de medição. 5. Medição.
6. Normalização. 7. Tolerância (Engenharia). I. Novaski,
Olivio. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade
de Engenharia Mecânica. III. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Requisitos Para Aplicação e Avaliação de Confiabilidade Metrológica em Laboratório de Metrologia

Autor: **Samuel Mendes Franco**

Orientador: **Olivio Novaski**



**Prof. Dr. Olivio Novaski, Presidente
DEF / FEM / UNICAMP**



**Prof. Dr. Paulo Magalhães
FEAGRI / UNICAMP**



**Prof. Dr. Antonio Batocchio
DEF / FEM / UNICAMP**

Campinas, 28 de junho de 1.996

Dedicatória:

Dedico meu esforço

À minha família
À Aline Fernanda

Agradecimentos

Gostaria de Expressar meus sinceros agradecimentos:

Ao Prof. Dr. **Olivio Novaski** pela orientação, pela atenção dispensada e por confiar na minha capacidade no desenvolvimento desse trabalho;

À **minha família**, pelo estímulo, apoio e confiança em mim depositada;

À **Aline Fernanda** pela paciência, compreensão, apoio e estímulo dedicados durante este período;

Aos meus amigos do LAMEDI Centro de Tecnologia da Unicamp pela atenção e apoio na execução dos trabalhos práticos;

Aos meus amigos da FATEC pelo incentivo e pela confiança.

*Ciência perfeita é só a de Deus,
Altíssimos são os pensamentos seus;
Por Ele e d'Ele é tudo a que há;
É Deus que, aos homens, sustento sempre dá.*

*A sabedoria com Deus está,
O conhecimento não nos negará;
Riquezas perpétuas só Ele é que tem;
A Ele a glória eternamente. Amém.*

Sumário

Dedicatória	i
Agradecimentos	ii
Sumário	iv
Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas	viii
Nomenclatura	ix
Resumo	xiii
Abstract	xiv

1. Introdução

1.1 Evolução da Tecnologia de Medição	01
1.2 Objetivo	05
1.2 Justificativa	06
1.4 Conteúdo do Trabalho	07
1.4 Alguma Definições	08

2. Medição

2.1 O Processo De Medição	09
2.2 Métodos Básicos de medição	12
2.3 Procedimento de Medição	13
2.4 O Sistema Generalizado de Medição	14

3. Os Parâmetros Característicos dos Sistemas de Medição

3.1 Principais Parâmetros	17
-------------------------------------	----

4. Erros de Medição

4.1 Definição de erro	26
4.2 Tipos de Erros	27
4.3 Quantificação de Erros	33
4.4 Fontes de Erros	36

5. Estatística Aplicada

5.1 Distribuição Normal	37
5.2 Medida de Tendência Central	39
5.3 Medidas de Dispersão	40
5.4 Análise de Variância	41
5.5 Combinação de Variância	44

6. Incerteza de Medição

6.1 Introdução	45
6.2 Definição	48
6.3 Avaliação da Incerteza Padrão	51
6.4 Determinação da Incerteza Padrão Combinada	57
6.5 Determinação da Incerteza Expandida	58
6.6 Resumo do Procedimento para Avaliação e Expressão da Incerteza	59

7. Propagação de Incerteza

7.1 Fórmula de Propagação de Incerteza	60
7.2 Fórmula de Propagação de Incerteza para Variáveis Dependentes	65

8. Regras de Compatibilização de Valores

8.1 Regras de Arredondamento de Valores	67
8.2 Número de Algarismos na Incerteza de Medição	68
8.3 Regras de Arredondamento para Operações Algébricas	69
8.4 Regras de Compatibilização de valores	70

9. Resultado de Medição

9.1 Introdução	72
9.2 Grandeza Variável e Invariável	74
9.3 Determinação do Resultado de Medição	77

10. Calibração

10.1 Padrões de Calibração	80
10.2 Classificações dos Padrões	81
10.3 Garantia da Qualidade	83

11. Avaliação da Comprovação Metrológica na Calibração de Blocos Padrão

11.1 Método de Calibração	86
11.2 Procedimento de Calibração	86
11.3 Sistema de Medição	89
11.4 Padrões de Referência	90
11.5 Instalação e Condições Ambientais	91
11.6 Capacidade Técnica	91
11.7 Incerteza de Medição	91
11.8 Avaliação da Incerteza de Medição	92

12. Análise dos Resultados

12.1 Resultados e Discussões	97
------------------------------------	----

13. Conclusão

13.1 Conclusão	104
13.2 Proposta de Trabalhos Futuros	106

Referências Bibliográficas	107
----------------------------------	-----

Bibliografia Adicional	110
------------------------------	-----

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Exemplo de operação de medição com paquímetro	11
Figura 2.1 - Exemplo de operação de medição com relógio comparador	11
Figura 2.3 - Sistema generalizado de medição	14
Figura 2.4 - Três exemplos de dinamômetros	15
Figura 2.5 - Elementos funcionais de um termômetro	16
Figura 3.1 - Curva de erro de um relógio comparador	23
Figura 5.1 - Distribuição normal ou Gaussiana	37
Figura 5.2 - Erro sistemático	39
Figura 5.3 - Melhor estimativa de y_{pc}	39
Figura 9.1 - Anel padrão	75
Figura 9.2 - Posições de calibração de um anel padrão	76
Figura 11.1 - Ficha de calibração	88
Figura 12.1 - Comparação entre as expressões (36) e (37)	99
Figura 12.2 - Comparação de incerteza de medição na calibração de blocos padrão	100
Figura 12.3 - Comparação da incerteza de medição em função da variação de temperatura	101
Figura 12.4 - Comparação entre incertezas	103

Lista de Tabelas

Tabela 4.1 - Limite de rejeição de Chauvenet	32
Tabela 4.2 - Valores do coeficiente de Student t	35
Tabela 5.1 - Intervalo de confiança	38
Tabela 5.2 - Fator de multiplicação C	42
Tabela 5.3 - Razão de variâncias F	43
Tabela 7.1 - Exemplos de fórmulas de propagação de incerteza	64
Tabela 8.1 - Maneiras corretas e incorretas de indicar a incerteza	68
Tabela 12.1 - Comparação entre a incerteza calculada e a incerteza utilizada	100
Tabela 12.2 - Incerteza de medição em função da variação da temperatura	101
Tabela 12.4 - Comparação entre incertezas	103

Nomenclatura

Letras Latinas

$^{\circ}\text{C}$ - grau celsius

a^{+} - limite de tolerância superior

a^{-} - limite de tolerância inferior

B - bloco padrão de referência

$B_{\text{méd}}$ - valor médio do bloco padrão de referência

C - fator de correção

D - desvio

dch - limite de rejeição de Chauvenet

dh - variação de altura

div - divisão

dV - variação volumétrica

dyi - desvio das medidas

F - razão de variância

f - relação funcional

F_t - razão de variância tabelado

g - unidade de medida de massa (grama)

k - fator de confiança

K - Kelvin - unidade térmica

L - comprimento

• L_p - comprimento do bloco padrão de referência

M - medida

n - numero de medidas

n_i - graus de liberdade

P - bloco padrão a calibrar

pb - probabilidade estatística definida

$P_{\text{méd}}$ - valor médio do bloco padrão a calibrar

R - amplitude

r - coeficiente de correlação

S - desvio padrão amostral

s - segundos
 S^2 - variância
 S^2c - variância combinada
 S^2m - variância média
 t - coeficiente de Student
 U - incerteza expandida
 u - incerteza padrão
 u^2 - variância padrão
 u^2c - variância padrão combinada
 u_c - incerteza padrão combinada
 V - Voltz
 x_i - grandezas de entrada
 y - medida
 Y - mensurando
 $\bar{y}_m$ - médias aritmética das medidas
 y_v - valor verdadeiro
 y_{vc} - valor verdadeiro convencional

Letras gregas

α - coeficiente de dilatação linear
 ∂ - derivada
 σ - desvio padrão da população
 η - erro de medição
 η - erro máximo
 Σ - somatória
 π - valor constante = 3.1415
 Δ - variação
 η_a - erro aleatório
 μm - micrometro = milésima parte do milímetro
 μs - erro sistemático
 Δt - variação de temperatura

Superescritos

n - numero de medidas

Subscritos

- i - relativo à i -ésima leitura de um conjunto
- k - numero de medições
- y_i - medidas i -ésima

Abreviações

- dm - dispersão de medição
- FO - faixa de operação
- GM - grandeza à medir
- ID - incremento digital
- IE - incremento de escala
- im = incerteza de medição
- IR - incerteza do resultado
- ism - incerteza do sistema de medição
- mm - milímetro - milésima parte do metro
- ms - massa padrão
- nm - nanometro - milionésima parte do milímetro.
- RA - resultado atribuído ao mensurando
- RM - resultado da medição
- SI - Sistema Internacional de unidades
- SM - sistema de medição
- smc - sistema de medição à calibrar
- smp - sistema de medição padrão

Siglas

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia e Normalização da Qualidade Industrial

ISO - International Organization for Standardization

LAMEDI - Laboratório de Medidas Dimensionais da Unicamp

RBC - Rede Brasileira de Calibração

VIM - Vocabulário Internacional de Metrologia

CIPM - Comité International des Poids et Measures

Resumo

FRANCO, Samuel Mendes, Requisitos para Aplicação e Avaliação de Confiabilidade Metrológica em Laboratório de Metrologia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1996. 106 p. Tese (Mestrado)

Para atender as atuais exigências metrológicas, um laboratório de metrologia deve assegurar que as medições sejam realizadas com a exatidão pretendida, caso este laboratório, pretenda ser reconhecido como capacitado para realizar calibrações e ensaios específicos. O objetivo deste trabalho é apresentar os requisitos para aplicação e avaliação de confiabilidade metrológica em laboratório de metrologia e, através destes requisitos, avaliar a comprovação metrológica de um laboratório de metrologia pertencente à RBC (Rede Brasileira de Calibração) para a calibração de blocos padrão. Neste sentido, foi determinada a incerteza de medição, aplicada aos blocos padrão, e avaliado o resultado obtido pelo cálculo, com o fornecido pela recomendação do INMETRO. Observou-se que, os valores recomendados, fornecidos pelo INMETRO podem ser utilizados, desde que, as diferenças, em relação às expressões determinadas, sejam pequenas.

Palavras Chave

Metrologia, Calibração, Medição

Abstract

FRANCO, Samuel Mendes, Requisitos para Aplicação e Avaliação de Confiabilidade Metrológica em Laboratório de Metrologia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1996. 106 p. Tese (Mestrado)

To answer the present is metrological requirements a metrological laboratory shall assure that the measurements are performed according to the intended accuracy, in case this laboratory want to be recognized competent to carry out specific calibrations or tests. The goal of this work is to report the requirements for application and evaluation of metrological traceability in metrology laboratory and through these requirements to evaluate the metrological confirmation of a metrology laboratory belonging to RBC (Rede Brasileira de Calibração) to the gauge blocks calibration. In this sense the measurement uncertainty was determined, applied to gauge blocks, and evaluated the result obtained through calculuses with the one provided for recommendation of INMETRO was evaluated. It was observed that the recommended values provided for INMETRO can be used since that, the differences related to the determined expressions, are small.

Key Words

Metrology, Calibration, Measurement

Capítulo 1

Introdução

1.1 Evolução da Tecnologia de Medição

O conceito de quantificar grandezas existe há milhares de anos. No princípio, as unidades de medida baseavam-se em partes do corpo humano. Por exemplo, a antiga unidade de medida egípcia para comprimento era o cúbito real, definido como o comprimento do antebraço do faraó reinante.

Com a expansão do comércio, e especialmente do comércio internacional, os metrologistas desenvolveram sistemas internacionais de unidades de medida, sendo os principais o métrico e o inglês. O sistema métrico é inteiramente baseado na notação decimal e usa essencialmente unidades de medida desenvolvidas por cientistas nos séculos XIX e XX. No início da década de 1970, todos os países industrializados, com a única exceção dos Estados Unidos, já haviam adotado o sistema métrico ou haviam decidido fazê-lo. Mais recente, foi elaborado um Sistema Internacional de Unidades (SI) que consiste em:

- Sete unidades fundamentais de medida, para: comprimento, massa, tempo, corrente elétrica, temperatura, intensidade luminosa e quantidade de substância.
- Duas unidades suplementares para ângulos planos e sólidos.
- Uma longa lista de unidades derivadas
- Uma terminologia padronizada para múltiplos e submúltiplos de todas as unidades de medida.

Exceto pela inspeção visual, a medição do comprimento é a forma mais antiga de medição. No entanto, essa velha forma de medição passou por várias revoluções apenas no século 20. Essas revoluções incluem (JURAN&FRANK,1992):

• Obsolescência de Medidores de Limites Fixos

No início do século, as tolerâncias de produtos para corte de metal eram geralmente da ordem de 0,005 a 0,10 polegadas, ou cerca de 0,10 a 0,25 (mm). Com tais tolerâncias, os medidores de limites fixos, apesar do erro de "sensibilidade" e apesar da informação simplesmente "bom ou ruim" que proporcionavam, eram um meio adequado, barato e rápido para inspeção de produtos. Em consequência, a predominância dos medidores era do tipo limites fixos. Embora houvesse disponibilidade de outros medidores tais como: aferidores com mostrador, paquímetro, etc., os medidores de limites fixos dominavam o uso. Formas ainda mais exatas de medição encontravam-se disponíveis, mas essas eram usualmente realizadas nos laboratórios de precisão (chamados na época) e não na produção da fábrica.

Ao longo de algumas décadas, as tolerâncias para corte de metal foram reduzidas, tornando o medidor de limites fixos bastante obsoleto devido ao alto erro em relação ao nível de tolerância e à informação inadequada de "bom ou ruim" para propósitos de controle do processo.

• Novos Princípios Tecnológicos

Os métodos mais antigos para medir comprimento utilizavam princípios mecânicos. Para medir as numerosas configurações especiais (por exemplo, diâmetros internos, profundidades, conicidades) muitas ferramentas especiais foram desenvolvidas, tais como: placas de desempenho, escalas, paquímetros, micrômetros, mecanismos com mostrador, blocos padrão. Essas ferramentas foram levadas a níveis cada vez mais altos de exatidão. Por fim, as condições econômicas para continuar a melhorar a exatidão através da expansão de princípios mecânicos atingiram seu limite e tornou-se necessário usar outros princípios, principalmente eletrônicos, pneumáticos e óticos. Existem ainda outros meios para medir comprimentos, tais como: raio laser, radiação, raios ultra sônicos, etc. Além disso, os laboratórios de pesquisa continuam a desenvolver novos princípios ou novas aplicações de velhos princípios

• Teste Não-Destrutivo

Esse termo amplo, descreve os testes feitos para detectar falhas em materiais e componentes e medir propriedades físicas tais como dimensões, dureza, condutividade, composição, constantes magnética e elástica. Esses testes são feitos sem prejudicar a subsequente utilidade do produto.

• Surgimento de Novas Funções Associadas à Medição

Os medidores mais antigos eram projetados para classificar o produto como bom ou ruim. A hierarquia de padrões e de laboratórios serviu para assegurar que esses medidores fizessem um trabalho correto de classificação. Desde então, a ênfase na prevenção de defeitos e no planejamento da qualidade exigiu que o equipamento de teste na fábrica fosse utilizável para funções adicionais, principalmente:

1. Indicar: Os medidores devem mostrar a leitura em uma escala de medição. Essas leituras tornam-se o *feedback* para operadores no controle do processo e para inspetores nas decisões sobre conformidade do produto.
2. Regular: Em algumas aplicações, é econômico utilizar medições diretamente no processo, de forma que o medidor feche o círculo para tornar o processo auto-regulável.
3. Registrar: Cada vez mais a tarefa de registrar dados de medição é transferida dos operários e inspetores para instrumentos especialmente projetados. Esses registros não são meramente uma série de leituras expressa em números; incluem gráficos mostrando os dados em progressão de tempo e relacionados à tolerância ou a limites de controle.
4. Computar, resumir e reportar: Um passo seguinte é introduzir os dados em computadores. Alguns desses computadores são usados para calcular média e desvios padrão. Outros resumem dados e preparam relatórios para exames dos supervisores e gerentes. Essas novas múltiplas funções fizeram surgir o nome "equipamento de informação da qualidade" para enfatizar que o papel dominante é prover informações.

Coletivamente, essas e outras novas funções relacionadas à medição revolucionaram a natureza do equipamento e, em consequência, os problemas de

manter tudo calibrado. Já não é suficiente assegurar que o mecanismo que mede o comprimento da peça permaneça calibrado; além disso, toda a série de acessórios que indicam controle, registro, computação etc. deve também permanecer calibrada.

Portanto, para atender as exigências atuais, não é apenas necessário a calibração, mas sim, a comprovação metrológica.

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é o de apresentar os requisitos para aplicação e avaliação de confiabilidade metrológica em laboratório de metrologia e avaliar a comprovação metrológica na calibração de blocos padrão num laboratório pertencente à Rede Brasileira de Calibração (RBC). Basicamente, este laboratório de metrologia possui uma sala destinada para as atividades didáticas, proporcionando um embasamento dos conceitos mais fundamentais relativos à metrologia dimensional e três salas específicas, destinadas à calibração de instrumentos ou grandezas corporificadas. Estes instrumentos ou grandezas, após calibradas, na maioria das vezes, são padrões de referência ou padrões de trabalho, utilizados pelas indústrias para garantir a qualidade de um produto. Portanto, para que um laboratório seja reconhecido como capacitado para realizar calibrações e ensaios específicos, é necessário implantar confiabilidade metrológica, para assegurar que as medições sejam realizadas com a exatidão pretendida. Para se obter confiabilidade metrológica, são necessários, entre outros requisitos, estabelecer os métodos e procedimentos de medição, determinar e quantificar os erros de medição, possuir rastreabilidade e comprovação metrológica. Assim, este trabalho apresenta e utiliza estes requisitos para avaliar a comprovação metrológica na calibração de blocos padrão.

Gostaríamos de deixar claro que não é nosso objetivo esgotar esse assunto, o que seria impossível devido as diversas atuações de um laboratório de metrologia, ao contrário, deseja-se que este trabalho seja um estímulo para trabalhos e desenvolvimentos futuros, que possa ir se complementando nas outras áreas tais como temperatura, vibração, pressão, vazão, massa, força.

1.3 Justificativa

Com o atual nível de exigência do mercado consumidor interno e principalmente do externo quanto à qualidade de produtos industrializados, tem sido cada vez maior o número de empresas que buscam a implantação de Sistemas de Qualidade de acordo com as normas internacionais ISO da série 9000 ou a certificação de seus produtos, para evidenciar qualidade e torná-los mais competitivos OLIVEIRA(1993). Entretanto, aquele que almeja realmente a qualidade, quando se trata de produtos, deve considerar a normalização e a confiabilidade metrológica como sendo bases para o pleno êxito.

A confiabilidade metrológica não consiste apenas do certificado de calibração para se ter evidências objetivas quanto à rastreabilidade de padrões e instrumentos. Na maioria das vezes o certificado de calibração é desejado porque a empresa irá passar por uma auditoria, ficando posteriormente este certificado esquecido num arquivo.

Um certificado de calibração emitido não é um atestado de que o instrumento ou padrão estejam isentos de erros ou que os mesmos sejam desprezíveis. Ele tem como objetivo mostrar as condições metrológicas dos instrumentos e padrões, tornando necessário muitas vezes, o uso de correções nas medições realizadas em comparação a estes padrões ou por estes instrumentos.

É comum também existirem dúvidas entre os termos rastreabilidade no sentido metrológico e a expressão confiabilidade metrológica. A rastreabilidade de instrumentos e padrões dentro de períodos pré-estabelecidos, levando em considerações seus erros, é apenas um dos itens a ser atendido quando se deseja implantar confiabilidade metrológica.

Para obtê-la vários outros itens devem ser atendidos, como, por exemplo, a capacitação do corpo técnico envolvido nas medições, procedimentos técnicos, condições ambientais, instrumentos adequados, determinação da incerteza de medição, etc.

Pelas razões expostas, fica evidente a necessidade de aplicação e avaliação da confiabilidade metrológica em laboratórios de metrologia, e este desenvolvimento vem de encontro à essa proposta.

1.4 Conteúdo do Trabalho

Este trabalho será desenvolvido com a seguinte distribuição:

Capítulo 2: Medição - será apresentado um sistema generalizado de medição e abordado sobre o processo, método e procedimento de medição.

Capítulo 3: Neste capítulo são definidos os parâmetros característicos dos sistemas de medição.

Capítulos 4, 5, 6 e 7: Nestes capítulos são conceituados os erros de medição, definidos os conceitos estatísticos para a análise dos erros e apresentado os procedimentos para avaliação e propagação da incerteza de medição.

Capítulo 8 e 9: Apresenta-se as regras para compatibilização de valores e os procedimentos para a determinação do resultado de uma medição.

Capítulo 10: Neste capítulo, define-se a calibração e os padrões de calibração e, apresenta os requisitos para se obter a garantia da qualidade.

Capítulo 11: Neste capítulo é apresentado a avaliação da comprovação metrológica, executada num laboratório de metrologia.

Capítulo 12 e 13: Apresenta-se a análise dos resultados e a conclusão.

1.5 Algumas Definições

1.5.1 Confiabilidade Metrológica

Conjunto de requisitos e técnicas para avaliar a eficiência de ensaios e produzir resultados confiáveis.

1.5.2 Metrologia

É a ciência da medição. A metrologia abrange todos os aspectos teóricos e práticos às medições, qualquer que seja a incerteza, em quaisquer campos da ciência ou tecnologia (INMETRO, 1995).

1.5.3 Comprovação metrológica

Conjunto de operações necessárias para assegurar-se de que um dado equipamento de medição está em condições de conformidade com os requisitos para uso pretendido (ISO10012-1, 1993).

1.5.4 Credenciamento

É uma ação do INMETRO que consiste no conhecimento formal da competência do Laboratório, avaliada segundo critérios internacionalmente reconhecidos e utilizados.

Capítulo 2

Medição

2.1 O Processo de Medição

Medição é o conjunto de operações que tem por objetivo determinar um valor de uma grandeza. Estas operações podem ser realizadas automaticamente (INMETRO,1995).

Medir é um procedimento experimental pelo qual o valor momentâneo de uma grandeza física (grandeza a medir) é determinado como um múltiplo e/ou uma fração de uma unidade, estabelecida por um padrão, e reconhecida internacionalmente (GONÇALVES,1993).

A operação de medição é realizada, genericamente, por um sistema de medição (SM).

O Sistema de medição (SM) é o conjunto completo de instrumentos de medição e outros equipamentos acoplados para executar uma medição específica. Este sistema poderá incluir medidas materializadas, como exemplo: para a calibração de paquímetro são utilizados os blocos padrão. Quando um SM é instalado de forma permanente este é denominado instalação permanente.

Da operação de medição obtem-se uma leitura que é caracterizada por um número (lido pelo operador) acompanhado da respectiva unidade de leitura. Para que a medição tenha sentido, é necessário determinar a chamada medida (M). A medida corresponde ao valor momentâneo da grandeza a medir no instante da leitura, e é acompanhada da unidade que descreve a grandeza a medir.

A medida é obtida pela aplicação dos parâmetros característicos dos *SM* à leitura. Estes parâmetros característicos devem ser conhecidos pelo usuário do *SM* antes do início da operação de medição. Podem ser expressos através de constantes aditivas e/ou multiplicativas, equações lineares ou não lineares, tabelas ou gráficos.

A figura 2.1 ilustra a operação de medição realizada através de um *SM* denominado paquímetro. A medição é obtida através de 2 escalas:

a) inicialmente é determinada a leitura na escala principal; sabe-se que na escala principal a constante multiplicativa é unitária, logo a medida resulta em:

$$M_1 = 50 \text{ (mm)};$$

b) a leitura obtida na escala do nônio é 19 divisões; sabe-se que a transformação da leitura em medida é efetuada através da constante multiplicativa 0.02 (mm/div), assim a medida da escala do nônio é:

$$M_2 = 19 \text{ (div)} * 0,02 \text{ (mm/div)} = 0.38 \text{ (mm)};$$

A medição é determinada pela adição das 2 medidas, assim sendo:

$$M = M_1 + M_2 = 50.38 \text{ (mm)}$$

A figura 2.2 mostra um outro exemplo de *SM*. Deste *SM* faz parte um relógio comparador, que mede o deslocamento vertical da sua haste. A medição é efetuada em três etapas:

- a) inicialmente um padrão de ajuste de 50 (mm) é aplicado sobre o *SM*;
- b) o *SM* é regulado para que, neste caso, a leitura obtida seja nula;
- c) o padrão de ajuste é retirado e a peça a medir é submetida ao *SM*;

A leitura obtida, neste caso, é de 19 divisões, e está associada à diferença entre os comprimentos da peça a medir e o padrão de ajuste. A determinação da medida envolve uma constante aditiva igual ao comprimento do padrão de ajuste e uma constante aditiva relacionada com a resolução do relógio comparador, isto é, com a relação mm/divisão deste relógio comparador. Assim a medida é:

$$M = 50 \text{ (mm)} + 19 \text{ (div)} * 0,02 \text{ (mm/div)}$$

$$M = 50,38 \text{ (mm)}$$

Sistema de Medição: Paquímetro

Faixa de operação : 0 - 150 (mm)

Constante multiplicativa:

- Escala principal: 1 (mm/divisão)
- Escala do nônio: 0.02 (mm/divisão)

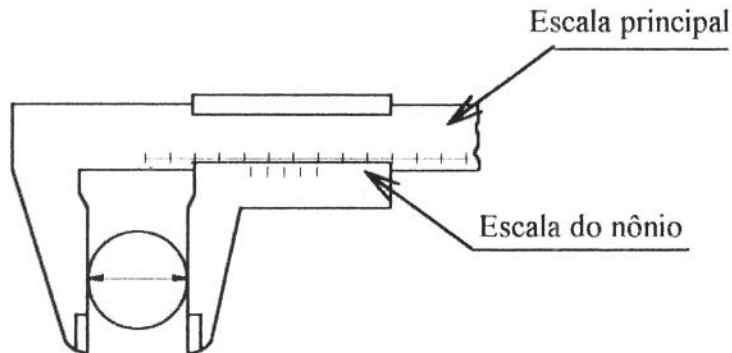


Figura 2.1 - Exemplo de operação de medição com paquímetro

Sistema de medição: Dispositivo de medição diferencial

Relógio comparador:

Incremento de escala: 0.02 (mm)

Bloco padrão:

Dimensão: 50.000 (mm)

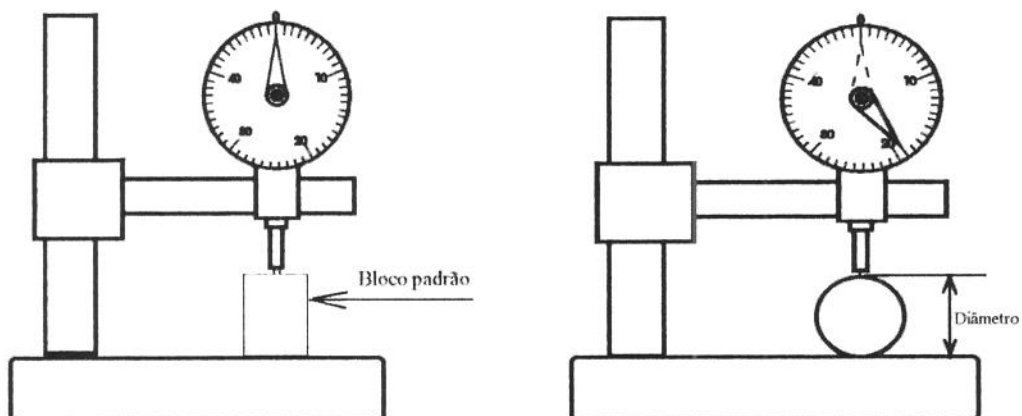


Figura 2.2 - Exemplo de operação de medição com relógio comparador

2.2 Métodos Básicos de Medição

Para descrever o valor momentâneo de uma grandeza como um múltiplo e uma fração decimal de uma unidade padrão, um *SM* pode operar segundo um método de medição, que é, uma sequência lógica de operações, descritas genericamente. Estes métodos de medição podem ser qualificados de várias maneiras, citadas abaixo.

2.2.1 O Método da Indicação ou Deflexão

Em um *SM* que opera segundo o método da indicação, a leitura é diretamente obtida sobre um mostrador de ponteiro, indicador digital ou registrador gráfico, à medida em que a grandeza a medir é aplicada sobre este *SM*. São inúmeros os exemplos de *SM* que operam por este princípio, exemplos: termômetro de bulbo ou digitais, manômetro, balança digital, balança de mola, etc..

2.2.2 O Método "de Zero"

No método "de zero", procura-se gerar uma grandeza com intensidade conhecida, equivalente e oposta à grandeza a medir, de forma que as duas, atuando sobre o dispositivo comparador, indiquem diferença zero. A balança de prato é um exemplo clássico de *SM* que opera por este princípio: procura-se formar em um dos pratos uma combinação de massas padrão que tendem a contrabalançar a massa desconhecida colocada no outro prato. Ambas são equivalentes quando a balança atingir o equilíbrio.

2.3 Procedimento de Medição

O procedimento de medição é um conjunto de operações descritas especificamente, de acordo com um dado método para a realização de uma medição.

Um procedimento de medição é usualmente registrado em um documento, que algumas vezes é denominado procedimento de medição ou método de medição e normalmente possui detalhes suficientes para permitir que um operador execute a medição sem informações adicionais.

2.4 Sistema Generalizado de Medição

A maioria dos *SM* podem ser divididos em três elementos funcionais bem definidos, HOLMAN(1977) BECKWITH(1982) DOEBELIN(1983) o transdutor, o condicionador de sinais e o indicador. Cada elemento constitui uma unidade independente ou pode estar fisicamente integrada ao *SM*. A figura 2.3 mostra genericamente este *SM*.

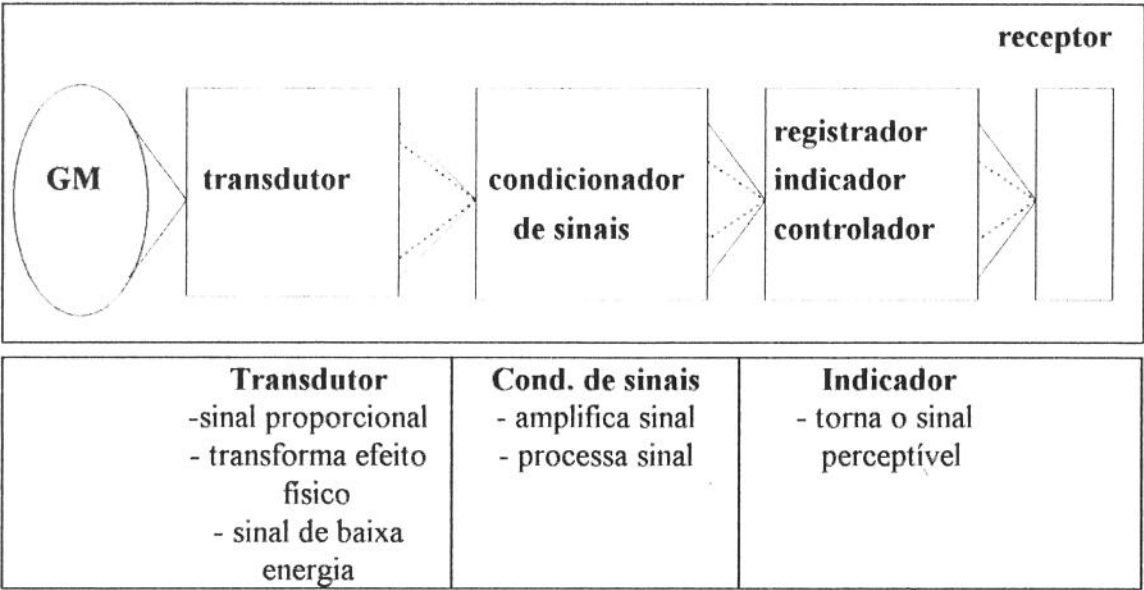


Figura 2.3 - Sistema Generalizado de Medição

O transdutor é o módulo do *SM* que está em contato com a grandeza a medir. O transdutor transforma a grandeza a medir em um sinal proporcional (mecânico, pneumático, elétrico ou outro) segundo uma função transferência, isto é, uma lei bem definida, baseada em um ou mais fenômenos físicos. Em termos gerais, um transdutor transforma um efeito físico em outro; é também chamado de sensor.

O sinal gerado pelo transdutor normalmente é um sinal de baixa energia, difícil de ser diretamente indicado. O condicionador de sinais, além da amplificação da potência do sinal, pode assumir funções de filtragem, compensação, integração, processamento, etc.

O indicador recebe o sinal tratado (amplificado, filtrado, etc) e através de recursos mecânicos, eletro-mecânicos, eletrônicos ou outro qualquer, transforma-o em um número inteligível ao usuário, isto, é produz uma leitura perceptível. Esse módulo subentende também unidades de registro, responsáveis pela descrição analógica ou digital do sinal ao longo do tempo ou outra grandeza independente.

A figura 2.4 exemplifica três tipos de dinamômetros, onde são identificados estes elementos funcionais. Na figura 2.4a, a mola é o transdutor do dinamômetro e transforma a força em deslocamento da sua extremidade, que é diretamente indicado sobre uma escala. Neste caso não há o condicionador de sinais. A figura 2.4b, já apresenta os três elementos funcionais, onde, a mola está transformando a força em deslocamento e este pequeno deslocamento da extremidade da mola é mecanicamente amplificado por meio de uma alavanca que, indica sobre uma escala, a leitura da força. A figura 2.4c, representa um outro dinamômetro: o transdutor é composto dos seguintes elementos funcionais: a força é transformada em deslocamento por meio da mola, em cuja extremidade está fixado um núcleo de material ferroso que, ao se mover provoca variação da indutância de uma bobina, que provoca um desbalanceamento elétrico em um circuito, provocando uma variação de tensão proporcional. Este sinal é amplificado pelo condicionador de sinais, composta de circuitos elétricos, e indicado através de um ponteiro galvanométrico.

A figura 2.5 ilustra os três elementos funcionais de um termômetro. A temperatura a medir é absorvida pelo fluido no interior do bulbo, que é o transdutor deste sistema, e sofre variação volumétrica. Esta variação é imperceptível a olho nu. O tubo capilar do termômetro tem por finalidade amplificar este sinal, transformando a variação volumétrica em grande variação da coluna do fluido, o que caracteriza o condicionador de sinais deste sistema. O indicador é formado pela coluna do líquido contra a escala.

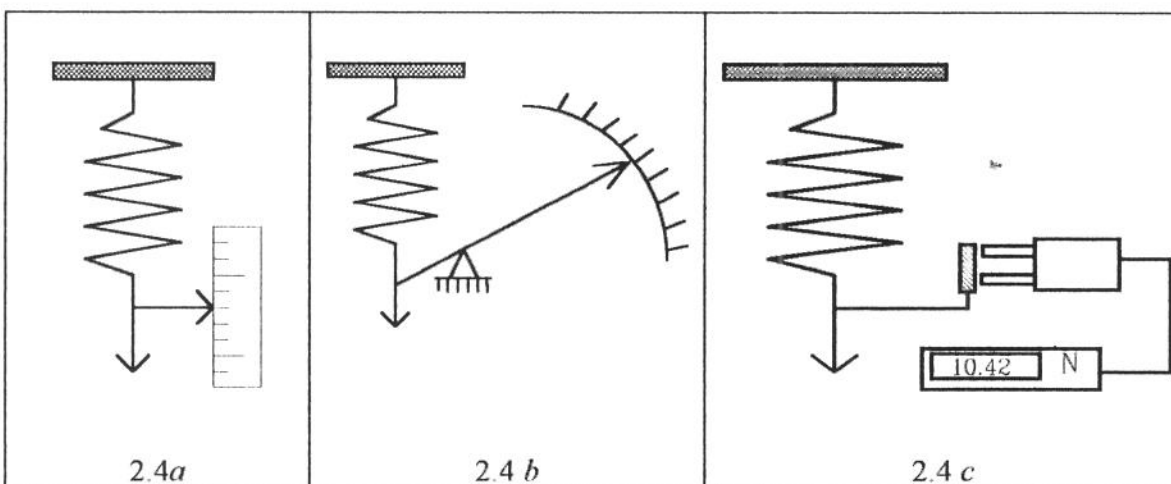


Figura 2.4 - Três exemplos de dinamômetros

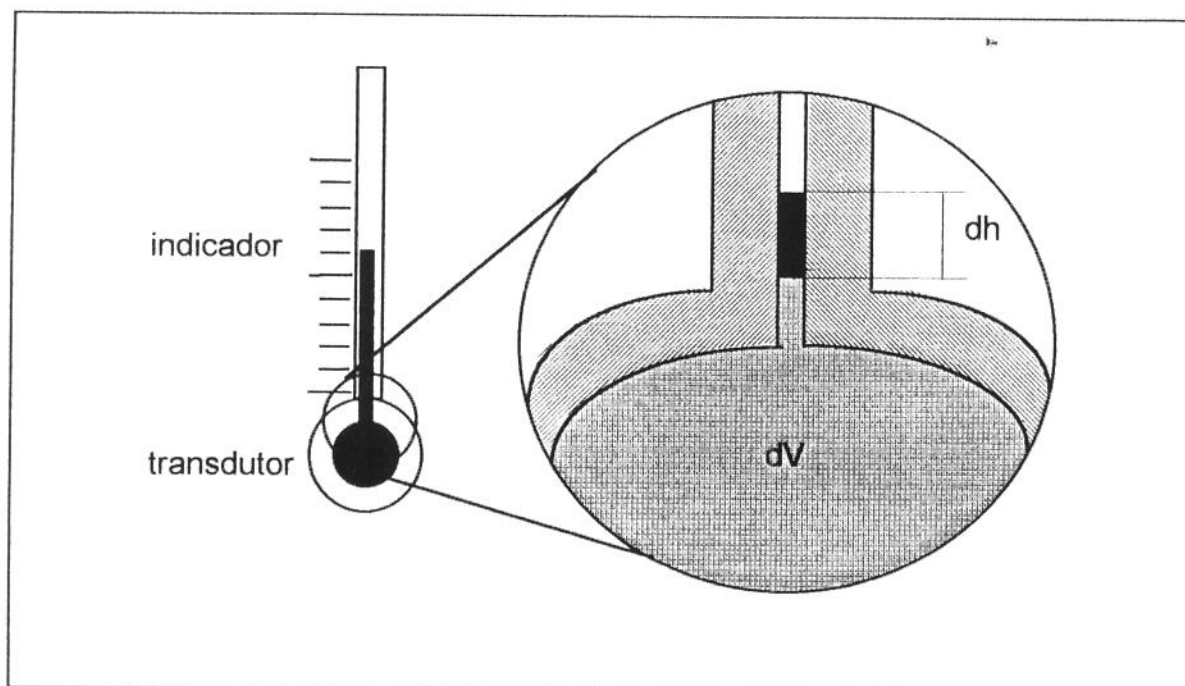


Figura 2.5 - Elementos funcionais de um termômetro

Capítulo 3

Parâmetros Característicos de Um Sistema de Medição

3.1 Principais parâmetros

Para caracterizar o comportamento metrológico de um sistema de medição, são empregados alguns parâmetros metrológicos. Estes parâmetros podem ser expressos na forma de um simples número, uma faixa de valores ou na forma de um gráfico (INMETRO,1995). Neste capítulo, são descritos os principais parâmetros.

3.1.1 Faixa Nominal

A faixa nominal é a faixa de indicação que se pode obter em uma posição específica dos controles de um instrumento de medição. A faixa nominal normalmente é definida em termos de seus limites inferiores e superiores. Exemplos:

- termômetro: 100 °C a 200 °C
- Manômetro: 0 bar a 20 bar
- Contador: 5 dígitos (isto é 99999 pulsos)

Quando o limite inferior é zero, a faixa nominal pode ser definida unicamente em termos do limite superior, por exemplo: a faixa nominal de 0V a 100V é expressa como "100 V".

3.1.2 Amplitude da Faixa Nominal

A amplitude da faixa nominal é a diferença, em módulo, entre os dois limites de uma faixa nominal. Exemplo: Para uma faixa nominal de $-10V$ a $+10V$ a amplitude da faixa nominal é $20V$. Em algumas áreas, a diferença entre o maior e o menor valor é denominado faixa.

3.1.3 Faixa de Medição

A faixa de medição, também denominada faixa de trabalho, é o conjunto de valores de um mensurando para o qual admite-se que o erro de um instrumento de medição mantém-se dentro dos limites especificados. Exemplo: Num relógio Apalpador a faixa de medição é de $\pm 50 \mu m$ (ou $-50 \mu m$ a $+50 \mu m$).

A faixa de medição é menor ou, no máximo, igual a faixa nominal. O valor da faixa de medição pode ser obtida através:

- do manual de operação do SM;
- de sinais gravados sobre a escala;
- das especificações de normas técnicas;
- dos relatórios de calibração.

3.1.4 Divisão de Escala

É a parte de uma escala compreendida entre duas marcas sucessivas quaisquer.

3.1.5 Comprimento de uma Divisão

É a distância entre duas marcas sucessivas quaisquer, medidas ao longo da linha do comprimento de escala. O comprimento de uma divisão é expresso em unidades de comprimento, qualquer que seja a unidade do mensurando ou a unidade marcada sobre a escala.

3.1.6 Valor de uma Divisão

O valor de uma divisão é a diferença entre os valores da escala correspondente a duas marcas sucessivas.

3.1.7 Condições de Utilização

São as condições de uso para as quais as características metrológicas especificadas de um instrumento de medição mantém-se dentro de limites especificados.

3.1.8 Condições de Referência

As condições de referência são as condições usuais prescritas para ensaio de desempenho de um instrumento de medição ou para intercomparação de resultados de medições. Estas condições geralmente incluem os valores de referência ou as faixas de referência para as grandezas de influência que afetam o instrumento de medição.

3.1.9 Característico de Resposta

É a relação entre um estímulo e a resposta correspondente, sob condições definidas. Exemplo: a força eletromotriz (fem) de um termopar como função da temperatura. A relação poderá ser expressa na forma de uma equação matemática, uma tabela numérica ou um gráfico

3.1.10 Sensibilidade

A sensibilidade é caracterizada pela variação da resposta de um instrumento de medição dividida pela correspondente variação do estímulo. Nos instrumentos com indicador de ponteiro comumente se estabelece a sensibilidade como sendo a relação entre o deslocamento da extremidade do ponteiro (em mm) e o valor unitário da grandeza a medir.

3.1.11 Limiar de Mobilidade

É a maior variação no estímulo que não produz variação detectável na resposta de um instrumento de medição, sendo a variação no sinal de entrada lenta e uniforme.

O limiar de mobilidade (também chamado *threshold*) pode depender, por exemplo, de ruído (interno e externo) ou atrito. Pode depender também, do valor do estímulo.

3.1.12 Resolução

A resolução é a menor diferença entre as indicações de um dispositivo mostrador que pode ser significativamente percebida. A avaliação da resolução é executada em função do tipo de instrumento:

a) Para dispositivo mostrador digital, a resolução é a variação na indicação quando o dígito menos significativo varia de uma unidade.

b) Nos sistemas de medição com dispositivo mostrador analógico, a resolução é função das limitações do executor da leitura, da qualidade do indicador e da própria necessidade de leituras mais ou menos criteriosas.

3.1.13 Estabilidade

A estabilidade é a aptidão de um instrumento de medição em conservar constantes suas características metrológicas ao longo do tempo. A estabilidade pode ser quantificada de várias maneiras, por exemplo: pelo tempo no qual a característica metrológica varia de um valor determinado, ou, em termos da variação de uma característica em um determinado período de tempo.

3.1.14 Discrição

Caracteriza a aptidão de um instrumento de medição em não alterar o valor do mensurando. Por exemplo: Uma balança é um instrumento discreto para medição de massas, pois o sistema de medição não altera o valor da massa. Um termômetro de resistência que aquece o meio ambiente no qual a temperatura está sob medição, não é discreto.

3.1.15 Deriva

A deriva é a variação lenta de uma característica metrológica de um instrumento de medição.

3.1.16 Tempo de Resposta

É o intervalo entre o instante em que um estímulo é submetido a uma variação brusca e o instante em que a resposta atinge e permanece dentro de limites especificados em torno do seu valor final estável.

3.1.17 Exatidão de Um Instrumento de Medição

A exatidão é a aptidão de um instrumento de medição para dar respostas próximas a um valor verdadeiro (também denominada de acurácia). A exatidão é um conceito qualitativo, não devendo ser confundido com precisão.

3.1.18 Classe de Exatidão

Classe de instrumentos de medição ou medidas materializadas, que satisfazem a certas exigências metrológicas para conservar os erros dentro de certos limites especificados. Uma classe de exatidão é usualmente indicada por um número ou símbolo adotado por convenção e denominado de índice de classe, por exemplo: jogo de blocos padrão classe 0.

3.1.19 Erro de Indicação em um Instrumento de Medição

Este erro é determinado pela diferença da indicação de um instrumento de medição e um valor verdadeiro da grandeza de entrada correspondente. Uma vez que um valor verdadeiro não pode ser determinado, então na prática é utilizado um valor verdadeiro convencional. Este conceito de erro aplica-se principalmente quando o instrumento é comparado a um padrão de referência. Para uma medida materializada, o erro é caracterizado entre a indicação e o valor atribuído a ela.

3.1.20 Erros Máximos Admissíveis

São os valores extremos de um erro admissível por especificações, regulamentos, etc, para um dado instrumento de medição. Também denominado de Limites de Erros Admissíveis.

3.1.21 Tendência

A tendência é o erro sistemático da indicação de um instrumento de medição (também denominado: *bias of a measuring instrument*, *erreur de justesse*). A tendência de um instrumento de medição é normalmente estimada pela média dos erros de indicação de um número apropriado de medições repetidas.

3.1.22 Isenção de Tendência

Aptidão de um instrumento de medição em dar indicações isentas de erros sistemáticos.

3.1.23 Repetitividade

A repetitividade é a aptidão de um instrumento de medição em fornecer indicações muito próximas, em repetidas aplicações do mesmo mensurando, sob as mesmas condições de medição. Estas condições incluem:

- redução ao mínimo das variáveis devido ao observador;
- mesmo procedimento de medição;
- mesmo observador;
- mesmo equipamento de medição, sendo utilizado nas mesmas condições;
- mesmo local;
- repetições em um curto período de tempo.

A repetitividade pode ser expressa quantitativamente em termos das características da dispersão das indicações.

3.1.24 Histerese

A histerese de um instrumento de medição é um erro de medição, que ocorre quando há diferença entre a medida para um dado valor do mensurando quando esta foi atingida por valores crescentes e a medida quando atingida por valores decrescentes do mensurando (figura 3.1). Este valor poderá ser diferente se o ciclo de carregamento e descarregamento for completo ou parcial. A histerese é um fenômeno bastante típico nos instrumentos mecânicos, tendo como fonte de erro, principalmente, folgas e deformações associadas ao atrito.

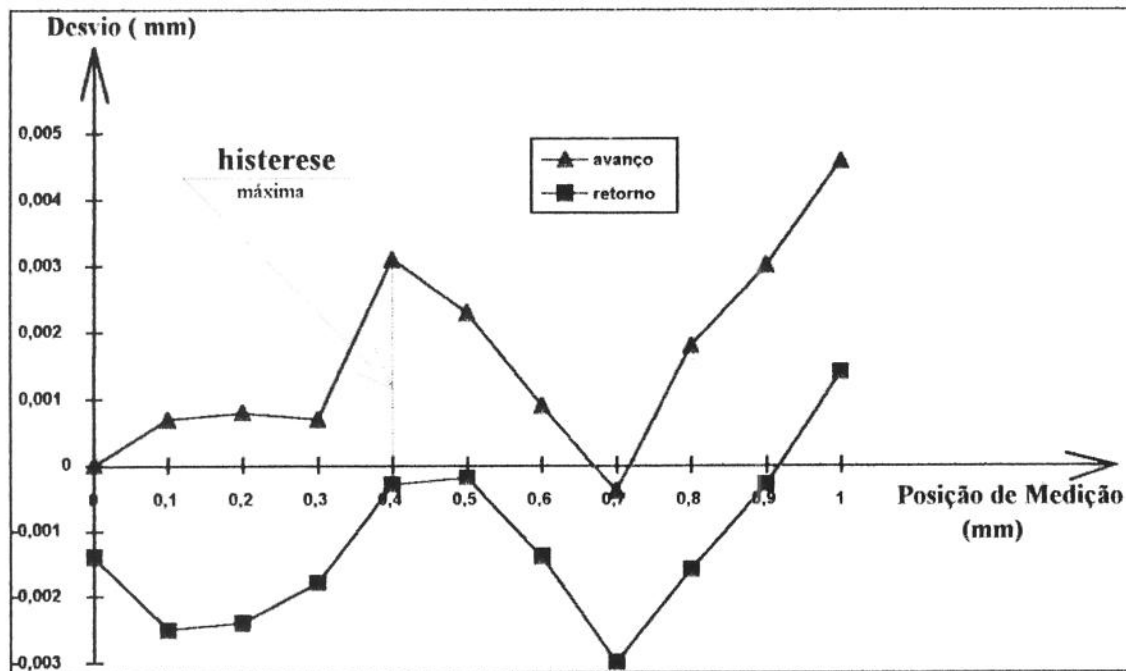


Figura 3.1 - Curva de Erro de um Relógio Comparador

Capítulo 4

Erros de Medição

Na realização de medições existem várias influencias que geram erros nos resultados obtidos, de modo que não existe uma medição perfeita, ou seja, sem erros. DIN1319 (1977), ADAMS (1975), HOLMAN (1977), BECKWITH (1982), MIODUSKI (1982), BARNEY (1988), ISO (1993).

A medição é obtida através de um sistema de medição *SM* que não é perfeito. Aspectos tecnológicos forçam que qualquer sistema de medição construído resulte imperfeito: suas dimensões, formas geométricas, material, propriedades elétricas, ópticas, pneumáticas, etc, não correspondem exatamente à ideal. As leis e princípios físicos que regem o funcionamento de alguns sistemas de medição nem sempre são perfeitamente lineares como uma análise simplista poderia supor. A existência de desgaste e deterioração de partes agravam ainda mais esta condição. Nestes, casos, o sistema de medição gera erros de medição.

As perturbações externas, como, por exemplo, as condições ambientais, podem provocar erros, alterando diretamente o sistema de medição ou agindo sobre a grandeza a medir, fazendo com que o comportamento do sistema de medição se afaste ainda mais do ideal. Variações de temperatura provocam dilatações nas escalas de um sistema de medição de comprimento, variações nas propriedades de componentes e circuitos elétricos, que alteram o valor indicado por um sistema de medição. Vibrações ambientais, a existência de campos eletromagnéticos, umidade do ar excessiva, diferentes pressões atmosféricas podem, em maior ou menor grau, afetar o sistema de medição.

O operador e a técnica de operação empregada podem, também, afetar a medição. O uso de força de medição irregular ou excessiva, vícios de má utilização ou

sistema de medição inadequados, podem levar a erros imprevisíveis. A forma, tamanho ou capacidade do sistema de medição pode não ser a mais indicada para aquela aplicação.

As grandezas a medir não possuem valores únicos ou estáveis. Não se consegue fabricar peças com formas geométricas matematicamente perfeitas. Características da máquina operatriz empregada, dos esforços de corte, do material ou ferramenta empregada afastam a forma geométrica obtida da ideal. Mesmo que, se disponha de um sistema perfeito, verifica-se que diferentes medições de diâmetro em diferentes ângulos de uma mesma secção transversal de um cilindro ou ao longo de diferentes posições ao longo do eixo de um cilindro, levam a diferentes números.

Portanto o erro de medição existe. A seguir será apresentado a convivência com o erro de medição.

4.1 Definição de Erro

Se y é a medida de um mensurando que possui um valor verdadeiro y_v , então o erro η é definido por:

$$\eta = y - y_v \quad (1)$$

Uma vez que o valor verdadeiro y_v de uma grandeza é desconhecido, é evidente que o erro η também é desconhecido, por isso o erro η só pode ser conhecido em termos de probabilidades VUOLO(1992). Geralmente, o erro η tem diversas causas, que será verificado nos tipos de erros.

O valor verdadeiro, é por natureza, indeterminado (INMETRO,1995). Usa-se então o chamado valor verdadeiro convencional y_{vc} , isto é, um valor atribuído a uma grandeza específica e aceito, às vezes por convenção, como tendo uma incerteza apropriada para uma dada finalidade. Em determinado local, o valor atribuído a uma grandeza, por meio de um padrão de referência, pode ser tomado como um y_{vc} . Neste caso, o erro de medição é calculado por:

$$\eta = y - y_{vc} \quad (2)$$

onde: η = erro de medição
 y = medida
 y_{vc} = valor verdadeiro convencional

O erro de medição é impossível de ser eliminado, porém é possível ao menos delimitá-lo. Mesmo sabendo da sua existência, ainda é possível obter informações confiáveis de uma medição, desde que a ordem de grandeza e a natureza deste erro sejam conhecidas.

4.2 Tipos de Erros

Geralmente, ocorrem erros de vários tipos em uma mesma medida. Entretanto, esses diferentes tipos de erros podem ser separados em dois grandes grupos que são *erros aleatórios* e *erros sistemáticos*, além dos *erros grosseiros* KOTTAUS (1971), WAENY (1978), GONÇALVES (1993), INMETRO(1995).

4.2.1 Erros Aleatórios

Quando uma medição é realizada em condições de repetitividade, observam-se variações nos valores obtidos. Em relação ao valor médio, nota-se que estas variações ocorrem de forma imprevisível, tanto para valores acima do valor médio quanto para abaixo.

Os erros aleatórios, também denominados erros estatísticos, resultam de variações aleatórias no valor medido de uma grandeza, devido a fatores que não podem ser controlados ou que por qualquer motivo não são controlados. Geralmente, essas variações se devem somente ao processo de medida, mas em alguns casos, as variações aleatórias também ocorrem na própria grandeza.

Por exemplo, ao se realizar medidas de massa em uma balança, as correntes de ar ou vibrações (fatores externos) podem introduzir erro aleatório na medida. Mas estes erros podem ser reduzidos ou praticamente eliminados, colocando-se a balança em uma mesa a prova de vibrações e protegendo-se a balança em uma caixa de vidro ou mesmo em vácuo quando se desejar elevada exatidão.

Uma solução para minimizar os efeitos de erros aleatórios consiste em repetir medidas, uma vez que o valor médio de um grande número de medidas tem erros aleatórios menores.

Diversos fatores contribuem para o surgimento dos erros aleatórios. A existência de folgas, vibrações, flutuações de tensão elétrica, instabilidades internas ou das condições ambientais, etc. contribui para o aparecimento deste tipo de erro.

4.2.2 Erros Sistemáticos

O erro sistemático é a parcela de erro sempre presente nas medições realizadas sob condições de repetitividade. Um indicador com seu ponteiro "torto" é um exemplo clássico de erro sistemático, que se repetirá enquanto o ponteiro estiver torto.

Estes erros podem ter diversas causas e geralmente se enquadram em um dos tipos definidos a seguir VUOLO (1992):

Erros Sistemáticos Instrumentais

Erro sistemático instrumental é o erro que resulta da calibração de um instrumento de medição. Além do erro de calibração inicial do instrumento, deve ser observado que a calibração pode ser alterada em função de diversos fatores, tais como temperatura, alteração das características dos materiais e componentes, desgaste de partes móveis e outros fatores.

Estes erros podem, em princípio, ser reduzidos ou praticamente eliminados, por meio de uma recalibração e ajuste do instrumento de medição ou correção dos resultados.

Erros sistemáticos teóricos

O erro sistemático teórico resulta do uso de fórmulas teóricas aproximadas ou uso de valores aproximados para eventuais constantes físicas que sejam utilizadas. Na realização de uma experiência, geralmente é necessário utilizar um modelo para o fenômeno físico em questão. Conforme o modelo adotado, as fórmulas teóricas podem não ser suficientemente exatas. E grandezas físicas obtidas por meio destas fórmulas terão erros sistemáticos. O mesmo vale com relação a valores de constantes físicas utilizadas em cálculos.

Estes erros sistemáticos teóricos podem ser geralmente reduzidos ou praticamente eliminados utilizando-se modelos físicos, fórmulas e valores para as constantes suficientemente exatos para o fenômeno em questão. Mas também poderá ocorrer que não existam modelos e fórmulas mais adequadas que as disponíveis.

Um exemplo de erro sistemático é o que ocorreu na famosa experiência de Millikan, em 1916, que permitiu determinar a carga do elétron. O valor encontrado

por Millikan era 0,6 % menor devido ao fato que ele utilizou um valor um pouco incorreto para a viscosidade do ar em seus cálculos. Este erro sistemático foi corrigido somente 16 anos mais tarde.

Erros Sistemáticos Ambientais

É um erro causado devido a efeitos do ambiente sobre a medição. Fatores ambientais tais como temperatura, pressão, umidade, aceleração da gravidade, campo magnético terrestre, ondas de rádio, luz e outros podem introduzir erros nos resultados de uma medida.

Por exemplo, numa experiência para medir o campo magnético de um ímã, o instrumento de medida indicará o campo magnético do ímã superposto com o campo magnético da terra. Pode-se dizer que a medida do campo magnético do ímã tem erro sistemático ambiental devido ao campo magnético terrestre.

Os erros sistemáticos ambientais podem, em geral, ser reduzidos ou praticamente eliminados se as condições ambientais forem bem conhecidas e de preferência controladas. Entretanto, alguns fatores ambientais como temperatura, umidade, luminosidade e outros fatores ambientais podem ser controlados, além de serem medidos.

Nas experiências laboratoriais, a boa prática experimental é registrar o maior número de grandezas ambientais, mesmo que não tenham relação muito direta com a medida em questão. Assim, deveriam ser sempre registradas as condições ambientais, tais como temperatura, pressão, umidade, luminosidade, vibração, campo magnético, ruído eletromagnético, e outros.

Erros Sistemáticos Observacionais

Erro sistemático observacional é um erro sistemático devido a falhas ou limitação do próprio operador. Este erro não deve ser confundido com enganos ou erros grosseiros que serão discutidos a seguir.

O erro sistemático mais comum deste tipo é devido ao efeito de paralaxe na leitura de escalas de instrumentos. O erro de paralaxe na leitura de um instrumento analógico é devido ao não alinhamento correto entre o olho do observador, o ponteiro indicador e a escala do instrumento. Podem resultar, por exemplo, leituras sempre

sistematicamente maiores que as reais, se o instrumento estiver colocado frontalmente ao observador, mas deslocado à sua direita. Disparar um cronômetro sempre atrasado na medida de um intervalo de tempo é outro exemplo deste tipo de erro.

Erros desse tipo podem ser reduzidos seguindo-se cuidadosamente os procedimentos corretos para uso dos instrumentos. Entretanto, mesmo que os procedimentos corretos sejam rigorosamente seguidos, ainda poderá existir erro sistemático devido às limitações humanas.

O tempo típico de reação do ser humano a um estímulo é da ordem de:

$$\tau_t \approx 0.1 \text{ segundos (tempo de reação humana)}$$

Assim, uma medida de tempo com cronômetro acionado manualmente pode apresentar um erro sistemático desta ordem de grandeza.

Analogamente, a resolução típica do olho humano normal é da ordem de:

$$\theta_s \approx 0,008^\circ \cong 0.00014 \text{ rd (resolução do olho humano)}$$

Isto significa que o olho humano pode distinguir 2 pontos separados de 0,14 (mm) a 1 (m) de distância. Esta resolução é muito melhor que a necessária para realizar leituras em escalas de instrumentos e geralmente permite realizar operações de ajuste e alinhamentos com muita exatidão.

Erros Sistemáticos Residuais

Os erros sistemáticos residuais podem geralmente ser reduzidos ou podem ser feitas correções aos resultados finais. Entretanto, nem sempre isto é possível na prática. Por motivos diversos, pode ser que não seja possível reduzir ou estabelecer correções para erros sistemáticos.

Às vezes, eliminar um erro sistemático relativamente pequeno em uma medição, pode custar muito tempo e dinheiro, sendo inviável qualquer procedimento para a correção do erro.

Erros sistemáticos de qualquer tipo, que não possam ser reduzidos a um valor baixo ou para os quais não sejam possível fazer correções são chamados **erros sistemáticos residuais**.

4.2.3 Erros grosseiros

O erro grosseiro, também chamados *erro ilegível*, consiste de *enganos* que, eventualmente podem ocorrer no procedimento de medida ou na realização de cálculos. Quando existir suspeita de que houve um engano em alguma medida de um instrumento de medição, esta medida deve ser repetida, se possível, ou eliminada do conjunto de dados. Critérios mais quantitativos para a rejeição de medidas são descritos a seguir.

Enganos podem evidentemente ocorrer na tomada de dados ou nos cálculos. Entretanto é inadmissível apresentar resultados que contenham erros grosseiros; as regras básicas consistem em *repetir medidas e conferir cuidadosamente os cálculos*. Dois critérios quantitativos para a rejeição de medidas, são citados abaixo HOLMAN (1977), VUOLO (1992).

4.2.3.1 Critério de rejeição de medidas

Neste item será apresentado dois critérios para a rejeição de medidas.

Critério 1. Quando uma grandeza y é medida n vezes, pode ocorrer que o desvio $d_y = (y_i - y_m)$ de uma determinada medida seja muito grande comparada com o desvio padrão do conjunto de medidas. Isto pode ocorrer devido a erros grosseiros ou eventuais falhas momentâneas do equipamento de medição. Em um dos casos, é razoável eliminar y_i do conjunto de dados.

Um critério simples consiste em rejeitar o resultado y_i se a probabilidade de ocorrência é menor que um valor p_0 . Um valor arbitrário, mas razoável é: $p_0 = 1 / 1000$. Isto significa que y_i deve ser rejeitado se este resultado tem probabilidade menor que 1 em 1000 de ocorrer (0,1%).

No caso da distribuição gaussiana de erros, um resultado y_i deve ser rejeitado se o erro for maior que $3,29\sigma$, ou seja, a medida deve ser rejeitada se:

$$|d_y| = |y_i - y_m| > 3,29 \sigma \quad (03)$$

Critério 2. O critério anterior tem como inconveniente o fato que aumentado o número *n* de medidas, também aumenta a probabilidade de ocorrências de grandes desvios nos conjuntos de medidas. Por exemplo, em 2000 medidas, a probabilidade de ocorrer desvio maior que 3,29σ é grande e não tem sentido descartar a medida. O critério de *Chauvenet* elimina este problema. Conforme este critério, uma medida *y_j* deve ser rejeitada se:

$$|d_y| = |(y_i - y_m)| > d_{ch} \tag{04}$$

onde, *d_{ch}* é o limite de rejeição de *Chauvenet*.

A tabela 4.1 mostra os valores dos limites de rejeição em função das *n* quantidades de medidas.

Tabela 4.1 - Limite de rejeição de Chauvenet (PARADINE&RIVETT, 1974)

n	d _{ch}		n	d _{ch}
2	1.15σ		20	2.24σ
3	1.38σ		30	2.39σ
4	1.54σ		40	2.50σ
5	1.65σ		50	2.58σ
6	1.73σ		100	2.80σ
8	1.76σ		200	3.02σ
10	1.96σ		500	3.29σ
12	2.04σ		1000	3.48σ
15	2.13σ		2000	3.66σ

4.3 Quantificação dos Erros

4.3.1 Erro Sistemático

O erro sistemático é caracterizado pela média que resultaria de um infinito número de medições do mesmo mensurando, efetuadas sob condições de repetitividade, menos o valor verdadeiro do mensurando (INMETRO, 1995).

Analogamente ao valor verdadeiro, o erro sistemático e suas causas não podem ser completamente conhecidos.

Quando a medição é repetida várias vezes, nota-se que a média do erro aleatório tende a zero, uma vez que este tende a distribuir-se simetricamente em valores positivos e negativos. Desconsiderando o erro grosseiro, pode-se afirmar que restará apenas o erro sistemático. Logo, em um ponto da faixa de operação de um sistema de medição, o erro sistemático é dado por:

$$\eta_s = y_m - y_{vc} \quad (5)$$

onde: η_s = erro sistemático

y_m = média das medidas

y_{vc} = valor verdadeiro convencional

Para um instrumento de medição o *erro sistemático* é denominado de *tendência* ver item 3.2.21.

4.3.2 Erros Aleatórios

O erro aleatório é caracterizado pelo resultado de uma medição menos a média que resultaria de um infinito número de medições do mesmo mensurando efetuadas sob condições de repetitividade.

Em razão de que apenas um finito número de medições pode ser feito, é possível apenas determinar uma estimativa do erro aleatório.

Sabendo-se que o erro aleatório distribui-se em torno da média das medidas, é possível isolar seu valor individual para uma determinada medida através de:

$$\eta a = y_i - y_m \quad (6)$$

onde: ηa = erro aleatório

y_i = medida individual

y_m = média das medidas

Porém, este erro varia de medida para medida de forma totalmente imprevisível. O valor momentâneo do erro aleatório tem pouco ou nenhum sentido prático, uma vez que é imprevisível.

A caracterização do erro aleatório é efetuada através de recursos estatísticos. Portanto, erro aleatório é uma parcela da incerteza de medição.

4.3.3 Dispersão da Medição

A dispersão da medição dm , é definida como a faixa de valores dentro da qual, com uma probabilidade estatística definida, se situará o erro aleatório de uma medição.

A dispersão da medição dm , é dada por:

$$dm_{(pb)} = \pm t S \quad \dots \quad (07)$$

onde: dm = dispersão de medição

(pb) = probabilidade estatística definida (normalmente 95%)

t = é o coeficiente de Student

S = desvio padrão da amostra de n medidas

O coeficiente de Student, é obtido em função da probabilidade desejada e do número de medidas da amostra, conforme tabela 4.2.

O desvio padrão, é detalhado no capítulo 5.

Tabela 4.2 - Valores do coeficiente de Student t (PARADINE&RIVETT, 1974)

Número de valores individuais n	Valores de t			
	1σ P = 68,3%	1.96σ P = 95 %	2.58σ P = 99,73 %	3σ P = 99 %
2	1.8	12.7	64	235
3	1.32	4.3	9.9	19.2
4	1.20	3.2	5.8	9.2
5	1.15	2.8	4.6	6.6
6	1.11	2.6	4.0	5.5
8	1.08	2.4	3.5	4.5
10	1.06	2.3	3.2	4.1
20	1.03	2.1	2.9	3.4
30	1.02	2.0	2.8	3.3
50	1.01	2.0	2.7	3.1
100	1.00	2.0	2.6	3.1
200	1.00	1.9	2.6	3.0
acima de 200	1.00	1.96	2.58	3.0

4.3.4 Incerteza do Sistema de Medição

A incerteza do sistema de medição ism , expressa o maior erro que o mesmo poderá impor à medida ao longo da faixa de operação.

Numericamente, a ism é dada por:

$$ism = \pm | \eta_{m\acute{a}x} | \quad (08)$$

ou

$$ism = \pm | dsm_{(95\%)} + \eta_s | \quad (09)$$

onde: $\eta_{m\acute{a}x}$ = erro máximo

η_s = erro sistemático

A incerteza do sistema de medição ism é o parâmetro reduzido que melhor descreve a qualidade do instrumento, pois expressa os limites do erro de medição associado a este sistema de medição. A determinação da ism é obtida através de uma operação denominada calibração, detalhada no capítulo 10.

4.4 Fontes de Erros

Como apresentado anteriormente, na realização de medições existem várias influências que geram erros nos resultados obtidos, de modo que não existe uma medição perfeita, ou seja, sem erros. Estes erros são provocados pela ação isolada ou combinada do operador e o sistema de medição. O comportamento metrológico de um sistema de medição é influenciado por perturbações externas e internas. O operador pode cometer erros de interpolação da leitura e erros inerentes à aplicação indevida do sistema de medição.

As perturbações externas podem provocar erros, alterando o comportamento do sistema de medição ou agindo sobre a grandeza a medir. O perturbador mais crítico, em geral, é a variação da temperatura ambiente, se bem que outras grandezas como vibrações mecânicas, variações de pressão atmosférica ou umidade, tensão da rede elétrica, também possam ter alguma influência.

A variação da temperatura também pode ser uma perturbação interna. Como exemplo, tem-se a não estabilidade dos sistemas elétricos de medição, por determinado espaço de tempo, após terem sido ligados. Em função da liberação de calor nos circuitos elétricos e/ou eletrônicos ocorre uma variação das características elétricas de alguns componentes e assim do sistema de medição. Portanto, há necessidade de aguardar uma estabilização térmica, o que minimizará os efeitos da temperatura. A existência de atrito, folgas, imperfeições construtivas e o comportamento não ideal dos sistemas físicos são outros exemplos de perturbações internas.

Outras fontes de erros podem ser classificadas como:

- Erros de medição causadas pela ação de forças, tais como: achatamento causado pela força de contato e compressão causada pelo peso próprio e pela força de contato;
- Erros de medição provocados pela paralaxe, que aparece nos instrumentos indicadores quando o ponteiro estiver a uma distância da escala e a sua posição não for lida num plano perpendicular da escala.

Capítulo 5

Estatística Aplicada

5.1 Distribuição Normal

Uma das distribuições estatísticas mais comumente encontradas na prática é a distribuição normal ou *Gaussiana*, também chamada de *distribuição normal de erros*. Esta distribuição gaussiana, foi deduzida por K.F. Gauss em 1795 HOLMAN (1977), MORETTIN (1990), VUOLO (1992).

A distribuição normal é uma distribuição simétrica em relação à média e cujo gráfico assemelha-se com a forma de um sino, como mostra a figura (5.1). O desvio padrão desta distribuição corresponde à distância entre a média e o ponto de inflexão da curva; e avalia o quanto os valores estão dispersos em torno da média.

A distribuição normal é o resultado da atuação conjunta de causas aleatórias, e é amplamente utilizada para descrever os erros aleatórios.

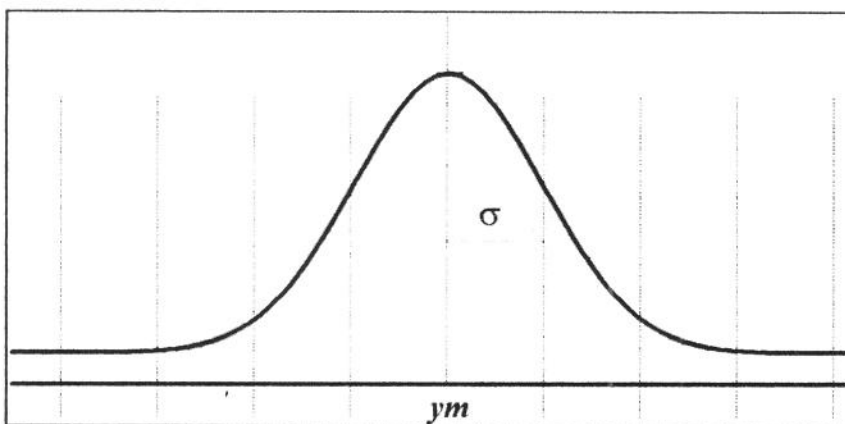


Figura 5.1 - Distribuição normal ou Gaussiana

Para uma função aleatória com distribuição normal, valor médio y_m e desvio padrão σ , é possível obter a probabilidade de y_m , em função do intervalo de confiança e do fator k , apresentado na tabela 5.1.

120

Tabela 5.1 - Intervalo de Confiança (LEAL, 1971)

Intervalo de Confiança	Probabilidade	k
$(y - 0.67\sigma) < y_m < (y + 0.67\sigma)$	50,0%	0.67
$(y - \sigma) < y_m < (y + \sigma)$	68,3 %	1.00
$(y - 1.64\sigma) < y_m < (y + 1.64\sigma)$	90.0 %	1.64
$(y - 1.96\sigma) < y_m < (y + 1.96\sigma)$	95.0%	1.96
$(y - 2\sigma) < y_m < (y + 2\sigma)$	95,4 %	2.00
$(y - 2.58\sigma) < y_m < (y + 2.58\sigma)$	99,0 %	2.58
$(y - 3\sigma) < y_m < (y + 3\sigma)$	99,7 %	3.00
$(y - 3.29\sigma) < y_m < (y + 3.29\sigma)$	99,9 %	3.29

5.2 Medida de Tendência Central

As medidas de tendência central são: média, mediana e moda. A mediana, em um conjunto de números ordenados em ordem de grandeza, é o valor do meio; e a moda, em um conjunto de valores, é o valor que ocorre com mais frequência, isto é, o valor mais comum. A média pode ser obtida por quatro meios, sendo: média aritmética, média ponderada, média geométrica e média harmônica. Neste trabalho, onde se referir à média das medidas y_m , deve ser considerado a média aritmética.

Devido a erros aleatórios, os resultados de n medidas sob condições de repetitividade são geralmente diferentes. Indicando os resultados por:

$$y_1, y_2, y_3, \dots, y_i, \dots, y_n$$

a média aritmética y_m para n medidas das grandezas y é definida por:

$$y_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (10)$$

Para um determinado conjunto de medidas de uma grandeza, pode existir erro sistemático. Assim, a média y_m não é o valor verdadeiro convencional da grandeza. A diferença entre a média y_m e o valor verdadeiro convencional y_{vc} é o erro sistemático η_s das medidas (figura 5.2).

Portanto, a média y_m de um conjunto de n medidas, isenta do erro sistemático, é a melhor estimativa que pode ser obtida para o valor verdadeiro convencional y_{vc} de uma grandeza (figura 5.3).

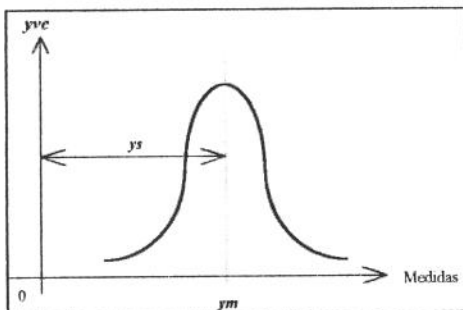


Figura 5.2 - Erro sistemático

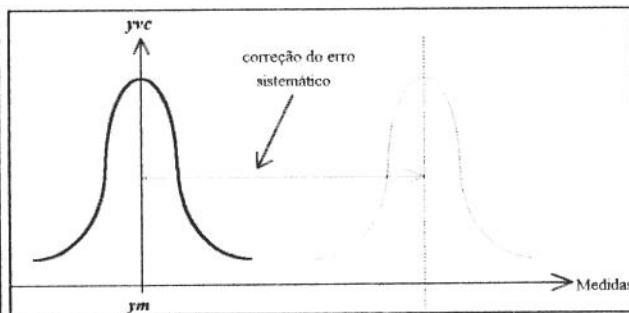


Figura 5.3 - Melhor estimativa de y_{vc}

5.3 Medidas de Dispersão

A dispersão é o grau com o qual os medidas tendem a se distribuir em torno da média y_m . As medidas de dispersão são: amplitude R e desvio padrão S .

A amplitude R é a medida mais simples da dispersão. É a diferença entre o maior e o menor valor das observações.

$$R = y_{\max} - y_{\min} \quad (11)$$

Embora exista simplicidade de cálculo, existem duas restrições:

- Utiliza apenas uma parcela das informações contidas nas medidas. O seu valor não se modifica, mesmo que os valores das observações variem, desde que, conservem os seus valores máximo e mínimo.
- Depende do número de medidas. Em geral o valor da amplitude cresce quando aumenta o número n de medidas.

O desvio padrão S é a medida que determina a variação das medidas em torno da média, devido aos erros aleatórios. O desvio padrão é a quantidade mais utilizada para caracterizar a dispersão de um conjunto de medidas.

O desvio padrão S é definido como a raiz quadrada da variância S^2 .

No caso de um determinado número n de medidas y_i , a variância S^2 , é obtida por:

$$S^2(y_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (y_i - y_m)^2 \quad (12)$$

Para determinar a variância $S^2(y_i)$, é necessário, no mínimo 10 medidas. Se não for possível, os valores de $S^2(y_i)$, deverão ser multiplicados por um dos fatores C da tabela 5.2. Os fatores multiplicadores baseiam-se nas distribuições de Student e normal, para $k=2$.

5.4 Análise de Variância

Na realização de medições num laboratório de metrologia, é necessário verificar a homogeneidade entre os resultados obtidos, ou seja determinar a reprodutibilidade da medição.

A reprodutibilidade dos resultados da medição é o grau de concordância entre os resultados das medições de um mesmo mensurando, efetuadas sob condições variadas de medição. Para que uma expressão da reprodutibilidade seja válida, é necessário que sejam especificadas as condições alteradas.

As condições alteradas podem ser:

- princípio de medição;
- método de medição;
- observador;
- Instrumento de medição;
- padrão de referência;
- local;
- condições de utilização.

A reprodutibilidade pode ser expressa, quantitativamente, em função das características da dispersão dos resultados. Os resultados aqui mencionados referem-se, usualmente, a resultados corrigidos (INMETRO, 1993).

5.4.1 Verificação da Homogeneidade entre as Medições

Para determinar a homogeneidade entre as medidas realizadas por dois operadores, determina-se a razão de variância F (LEAL, 1971), (PARADINE&RIVETT, 1974). Atribuindo-se que, S^2_1 é a maior variância entre S^2_1 e S^2_2 , F é dado por:

$$F = S^2_1 / S^2_2 \quad (13)$$

Para se obter homogeneidade é necessário que a razão de variância F (calculada), seja inferior à razão de variância F_t (fator tabelado). A razão de variância F_t é tabelada em função dos graus de liberdade (n-1) dos conjuntos 1 e 2, para um determinado nível de confiança. Na tabela 5.3, o fator F_t é para 95% de confiança.

$F_t > F$ onde, F = razão de variância calculada
 F_t = razão de variância tabelada

Exemplo 5.1: Considerando as medições de 3 operadores de um laboratório temos:

Operador 1	Operador 2	Operador 3
4.993	5.025	4.973
4.984	5.030	4.969
4.985	5.025	4.985
4.990	5.015	4.978
4.985	5.020	4.971
4.983	5.025	4.983
$S_1 = 0.003$	$S_2 = 0.004$	$S_3 = 0.006$

$F = S^2_2 / S^2_1 = 1.78$

$F = S^2_3 / S^2_1 = 4.00$

$F = S^2_3 / S^2_2 = 2.25$

Pela tabela 5.3, para 95% de confiança e graus de liberdade **(n-1)** igual a 5, a razão de variância, $F_t = 5.05$.
 F_t é maior que F , portanto, os resultados das medidas são homogêneos.

Tabela 5.2 - Fator de multiplicação - C (COUTO, 1993)

Número de Medidas	Fator de Multiplicação
2	7.0
3	2.3
4	1.7
5	1.4
6	1.3
7	1.3
8	1.2
9	1.2

5.5 Combinações de Variâncias

A variância combinada S_c^2 de K medições, obtidas pela repetitividade de n medidas é dada por:

$$S_c^2 = \frac{(n_1-1) S_1^2 + (n_2-1) S_2^2 + \dots + (n_K-1) S_K^2}{n_1 + n_2 + \dots + n_K - K} \quad (14)$$

Exemplo 5.2 : A variância combinada das 3 medições do exemplo 5.1, é:

$$S_c^2 = \frac{(6-1) 0.003^2 + (6-1) 0.004^2 + (6-1) 0.006^2}{(6 + 6 + 6) - 3}$$

$$S_c^2 = (0.0048)^2$$

Portanto, o desvio padrão S , das 3 medições do exemplo 5.1 é:

$$S = 0.0048$$

Capítulo 6

Incerteza de Medição

6.1 Introdução

O objetivo de uma medição é determinar o valor de um mensurando, que é, um valor de uma quantidade particular, a ser medida. Uma medição, portanto, se inicia com uma especificação do mensurando, do método de medição e do procedimento de medição.

Em geral, o resultado de uma medição é somente uma estimativa do valor do mensurando e, portanto, é completo somente quando acompanhado por uma declaração da incerteza desta estimativa (WOODS&ZEHNA, 1966), DIN1319 (1977), BECKWITH (1981), VUOLO (1992), COUTO (1993), IPQ (1993), ISO (1993).

Uma medição tem imperfeições que dão origem aos erros nos resultados de medição. Tradicionalmente, um erro é examinado como tendo duas componentes, chamadas, componentes aleatórias e componentes sistemáticas. O erro é um conceito idealizado e não pode ser exatamente conhecido.

A incerteza do resultado de medição reflete a falta de conhecimento do valor do mensurando. O resultado de uma medição após a correção dos efeitos sistemáticos reconhecidos é, entretanto, somente uma estimativa do valor do mensurando devido à incerteza surgida dos efeitos aleatórios e das correções imperfeitas do resultado dos efeitos sistemáticos.

O resultado de uma medição após corrigido, pode desconhecidamente estar bem próximo do valor do mensurando e possuir um erro insignificante, embora, pode

ter uma incerteza grande. Portanto a incerteza do resultado de uma medição não deve ser confundida com os erros desconhecidos remanescentes.

Na prática, existem muitas fontes possíveis para a incerteza de uma medição, tais como (ISO, 1993):

- a) definição incompleta do mensurando;
- b) realização imperfeita da definição do mensurando;
- c) amostra não representativa; a amostra medida não representa o mensurando medido ;
- d) conhecimento insuficiente dos efeitos das condições ambientais na medição ou erro na medição das condições ambientais;
- e) desvio de leitura do operador em instrumentos analógicos;
- f) valor inexato de padrões de medição e materiais de referência;
- g) valores inexatos de constantes e outros parâmetros obtidos de fontes externas;
- i) aproximações e suposições incorporadas aos métodos e procedimentos de medição;
- j) variações em observações do mensurando obtidas sob condições de repetitividade.

Essas fontes não necessariamente são independentes, e algumas das fontes dos itens a) até i) podem contribuir para a fonte j).

De acordo com a recomendação do Comitê Internacional de Pesos e Medidas (CIPM) (1981) pelo trabalho em grupo para a declaração da Incerteza, agrupam-se as incertezas dos componentes em duas categorias, baseados em métodos de avaliação "Tipo A" e "Tipo B". Estas categorias aplicam-se para incerteza e não são substituídas pelas palavras "aleatórias" e "sistemáticas" (ISO,1993).

Em algumas publicações as componentes de incerteza são classificadas como "aleatórias" e "sistemáticas" e são associadas com erros surgidos de efeitos aleatórios e efeitos sistemáticos conhecidos. Tais classificações dos componentes podem ser ambiguos quando aplicados em geral. Por exemplo: um componente de incerteza "aleatório" em uma medição pode se tornar um componente de incerteza "sistemática" no qual o resultado da primeira medição é usado como dados de entrada em outra medição.

O propósito da classificação Tipo A e Tipo B é para indicar as duas maneiras diferentes de avaliar os componentes de incerteza, não se pretende indicar que existe diferença do resultado dos componentes para os dois tipos de avaliação. Ambos tipos

de avaliação são baseados em distribuição de probabilidades, e o resultado da incerteza dos componentes para outros tipos são quantificados por variâncias ou desvios padrões.

Portanto, neste capítulo será abordado o procedimento para avaliação e expressão da incerteza de medição.

6.2 Definição

6.2.1 Incerteza de Medição

Segundo o VIM (*Vocabulário Internacional de Metrologia*) é adotado a seguinte definição:

A incerteza de medição é um parâmetro associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão de valores que podem ser fundamentalmente atribuídos a um mensurando (INMETRO, 1995).

Este parâmetro pode ser, por exemplo, um desvio padrão (ou um múltiplo dele), ou a metade de um intervalo correspondente a um nível de confiança estabelecido.

A incerteza de medição compreende, em geral, muitos componentes. Alguns destes componentes podem ser estimados com base na distribuição estatística dos resultados das séries de medições e podem ser caracterizados por desvios padrões experimentais. Outros componentes, que também podem ser caracterizados por desvios padrões, são avaliados por meio de distribuição de probabilidades assumidas, baseadas na experiência ou em outras informações.

Entende-se que o resultado da medição é a melhor estimativa do valor do mensurando, e que todos os componentes da incerteza, incluindo aqueles resultantes dos efeitos sistemáticos, como os componentes associados com correções e padrões de referência, contribuem para a dispersão.

A definição apresentada acima é operacional e enfoca o resultado da medição e sua incerteza avaliada. Entretanto, não é inconsistente com outros conceitos de incerteza de medição, tais como:

Incerteza de medição é uma medida de um erro possível num valor estimado do mensurando proporcionado pelo resultado de uma medição;

Incerteza de medição é uma estimativa caracterizando uma série de valores, entre os quais o valor verdadeiro de uma medição se encontra. (VIM, 1º edição, 1984, item 3.09).

Embora esses dois conceitos tradicionais são válidos como ideais, eles focalizam uma quantidade desconhecida: o "erro" do resultado de medição e o "valor verdadeiro" de um mensurando (em comparação com seu valor estimado), respectivamente. Todavia, qualquer conceito de incerteza adotado, é sempre avaliado usando os dados e informações relacionados.

6.2.2 Incerteza Padrão

Incerteza do resultado de medição expresso com um desvio padrão

6.2.3 Avaliação de Incerteza Tipo A

Método de avaliação da incerteza por análise estatística de uma série de observações.

6.2.4 Avaliação de Incerteza Tipo B

Método de avaliação da incerteza por meio de outras análises estatísticas de uma série de observações.

6.2.5 Incerteza Padrão Combinada

A incerteza padrão combinada do resultado de medição, quando o resultado é obtido por valores de uma série de grandezas de influência, é igual a raiz quadrada positiva da soma dos termos; os termos, sendo a variância ou covariância dessas grandezas ponderadas de acordo com o resultado da medição, variam com a transformação dessas grandezas.

6.2.6 Incerteza Expandida

Quantidade definindo um intervalo, sobre o resultado de uma medição, que pode ser esperado para compreender uma fração de uma distribuição dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos a um mensurando.

A fração pode ser examinada como uma probabilidade média ou nível de confiança do intervalo.

Para se associar um nível de confiança específico a um intervalo definido pela incerteza expandida, se requer uma suposição, quanto à relação da probabilidade da distribuição caracterizada pelo resultado de medição e suas incertezas padrão combinadas.

A incerteza expandida é denominada Incerteza Global no parágrafo 5 da Recomendação CIPM (1981).

6.2.7 Fator k

Fator numérico usado como um multiplicador para a incerteza padrão combinada para obter uma incerteza expandida. Este fator k , é tipicamente da ordem de 2 a 3 (Tabela 5.1).

6.3 Avaliação da Incerteza Padrão

6.3.1 Modelando a Medição

Em muitos casos, um mensurando y não é medido diretamente, mas é determinado em função de n outras grandezas $x_1, x_2, \dots, x_n$, através de uma relação funcional f :

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (15)$$

As grandezas de entrada de influência $x_1, x_2, \dots, x_n$, sobre o qual o valor de saída y depende, pode ela mesma se parecer como medidas e podem depender de outras variáveis, incluindo correções e fatores de correções para efeitos sistemáticos. A função f nunca pode ser escrita explicitamente. Além disso, f pode ser determinada experimentalmente, ou existe somente, como um algoritmo que pode ser avaliado numericamente. A função f , como será apresentado neste capítulo, é analisada num contexto geral, como as funções que contém muitas grandezas de influência, incluindo todas correções e fatores de correções, que podem atribuir uma componente significativa na incerteza do resultado de medição.

As grandezas de entradas $x_1, x_2, \dots, x_n$ podem ser caracterizadas como:

- valores e incertezas determinados diretamente em medição; esses valores e incertezas podem ser obtidos de, uma simples observação, repetidas observações, julgamentos baseados na experiência, e podem envolver as determinações de correções para indicação dos instrumentos e correções por grandezas de influências, tais como: temperatura ambiente, pressão barométrica e umidade;
- valores e incertezas, os quais são conduzidos para uma medição de fontes externas, tais como: grandezas associadas com calibração de padrões, certificados de materiais de referência e referência de informações obtidas através de manuais.

Em alguns casos a estimativa y pode ser obtida pela média aritmética y_m (expressão 10).

Isto é, y é obtido como a média aritmética y_m de n determinações independentes y_i . Cada determinação tem uma incerteza, e cada uma baseada na observação dos valores das grandezas de entrada x_i .

A estimativa do desvio padrão S , associado com cada estimativa de entrada x_i , é denominada de **incerteza padrão** e indicada por $u(x_i)$.

A estimativa do desvio padrão S , associado com a estimativa do resultado de medição y , é denominado **incerteza padrão combinada** e indicado por $u_c(y)$, e é determinada pela combinação das incertezas padrão, associada com as estimativas de entrada (x_i) .

Cada estimativa de entrada x_i e sua incerteza associada $u(x_i)$ são obtidas pela distribuição dos valores de uma grandeza de entrada (x_i) .

A avaliação da incerteza de medição "Tipo A" é baseada na distribuição de frequência, enquanto que a avaliação "Tipo B" é baseada em informações disponíveis da variabilidade da grandeza de entrada (x_i) .

6.3.2 Avaliação da Incerteza Padrão Tipo A.

Quando uma estimativa de uma grandeza de entrada x_i , tem sido obtida de n medidas, sob condições de repetitividade, a incerteza padrão $u(x_i)$ é obtida pela estimativa da variância média, dada por:

$$S^2_{m(x_i)} = \frac{S^2(y_i)}{n} \quad (16)$$

onde: $S^2(y_i)$ = variância obtida pela expressão (12)

n = número de medidas

Portanto, para uma grandeza de entrada x_i , determinada de n medidas repetidas independentes, a incerteza padrão $u(x_i)$, de sua estimativa x_i , é a raiz quadrada da variância média $S^2_{m(x_i)}$, calculada de acordo com a expressão (16).

Assim, $u^2(x_i) = S^2_{m(x_i)}$, e $u(x_i) = S_{m(x_i)}$, correspondem à Variância Tipo A e Incerteza Padrão Tipo A, respectivamente.

6.3.3 Avaliação da Incerteza Padrão Tipo B

Para uma estimativa de uma grandeza de entrada x_i , que não tenha sido obtida de observações repetidas, a variância estimada $u^2(x_i)$ ou a incerteza padrão $u(x_i)$ é avaliada pelo julgamento específico baseado em todas informações disponíveis na variabilidade de x_i . No conjunto destas informações pode-se incluir:

- a) informações prévias de medição;
- b) experiência ou conhecimento geral do comportamento e propriedades dos instrumentos e materiais relevantes;
- c) especificação do fabricante;
- d) informações proporcionais em calibrações e outras especificações;
- e) incertezas transmitidas pelas informações de referências obtidas de manuais.

Por conveniência, $u^2(x_i)$ e $u(x_i)$ avaliados desta maneira são chamados de **Variância Tipo B** e **Incerteza Padrão Tipo B**, respectivamente.

O propósito de usar várias informações disponíveis para a avaliação da incerteza padrão no Tipo B é para buscar um discernimento baseado na experiência e nos conhecimentos gerais, e é uma habilidade que pode ser obtida com a prática. É reconhecido que uma avaliação da incerteza pelo Tipo B pode ser tanto confiável quanto a do Tipo A, especialmente na situação em que a avaliação do Tipo A é baseada na comparação de pequenos números de observações estatisticamente independentes (ISO, 1993)

A seguir, são apresentados 4 suposições disponíveis para as grandezas de entradas de influência x_i , para a avaliação da Incerteza Padrão Tipo B.

• Suposição 1

Se a estimativa x_i é retirada da especificação do fabricante, certificados de calibração, manuais ou outras fontes, e suas incertezas transcritas são declaradas por ser uma parte múltipla do desvio padrão, a incerteza padrão $u(x_i)$ é simplesmente o valor citado dividido pelo multiplicador, e a variância estimada $u^2(x_i)$, é o quadrado do quociente.

Exemplo 6.1

Um certificado de calibração afirma que a massa de um aço inoxidável, massa padrão $m_s = 1000,000\,325$ g, e que a incerteza deste valor é $240\,\mu\text{g}$ para um nível de confiança com $k=3$

A incerteza padrão da massa padrão, é então:

$$u(m_s) = (240\,\mu\text{g}) / 3 = 80\,\mu\text{g}.$$

A variância estimada é :

$$u^2(m_s) = (80\,\mu\text{g})^2 = 6,4 \times 10^{-9}$$

A incerteza de x_i , não necessariamente é relatada como um múltiplo de um desvio padrão, como abordado acima. Em vez disso, pode-se encontrar uma declaração que a incerteza declarada possui 90, 95 ou 99 % de nível de confiança. Salvo indicação contrária, poderá assumir que uma distribuição normal será utilizada

para o cálculo da incerteza declarada, e a incerteza padrão $u(x_i)$, pode ser encontrada dividindo-se a incerteza declarada por um fator k , apropriado da distribuição normal.

• Suposição 2

Quando o valor de uma variável de entrada x_i , encontra-se no intervalo a_- até a_+ , ou seja, a probabilidade de x_i estar dentro do intervalo é 50% , e se, é possível assumir que a distribuição dos possíveis valores de x_i é aproximadamente normal, então a melhor estimativa x_i pode ser apresentada como o ponto médio do intervalo. Portanto se a amplitude do intervalo é denotada por $a = (a_+ - a_-)/2$ pode-se assumir que $u(x_i) = 1,48a$, porque para a distribuição normal, o intervalo $y_m \pm \sigma/1.48$ compreende aproximadamente 50% da distribuição.

Exemplo 6.2

Um operador determinou que a dimensão de um comprimento se encontra, com probabilidade de 50%, no intervalo $10.07mm$ a $10.15mm$ e relata que $L = (10.11 \pm 0.04) mm$, significando que $\pm 0.04(mm)$ define um intervalo tendo nível de confiança de 50%. Então $a = 0.04 (mm)$, e se admitir uma distribuição normal para o valor L , a incerteza padrão do comprimento será

$$u(L) = 1.48 \times 0.04 (mm) = 0.06 (mm) \text{ e a variância estimada será } u^2(L) = (1.48 \times 0.04 mm)^2 = 0.0035 (mm^2).$$

Quando a probabilidade do valor x_i encontrar-se no intervalo a_- até a_+ é de aproximadamente 68%, pode-se atribuir que $y_{m(x_i)} = a$, porque para uma distribuição normal com média y_m e desvio padrão σ o intervalo $y_m \pm \sigma$ compreende aproximadamente 68,3% da distribuição.

• Suposição 3

Em outros casos, pode ser possível estimar somente os limites (limites superior a_+ e inferior a_-) para x_i , por exemplo, quando a grandeza de influência é a variação da

temperatura. A probabilidade de que o valor de x_i se encontra dentro do intervalo a_- até a_+ , para todo propósito prático, é igual a 1 e a probabilidade que x_i esteja fora deste intervalo é essencialmente zero. Se não há conhecimento específico sobre a possibilidade do valor x_i estar dentro do intervalo, pode-se somente admitir que, é igualmente provável encontra-lo por toda parte, dentro dele (uma distribuição uniforme ou retangular).

Então x_i , é o ponto médio do intervalo, onde: $x_i = (a_- + a_+) / 2$, cuja variância associada é dada por:

$$u^2(x_i) = (a_+ - a_-)^2 / 12 \quad (17)$$

Se a diferença entre os limites, $(a_+ - a_-)$, é apresentado por $2a$, ou seja, os limites são simétricos, então a equação para variância será:

$$u^2(x_i) = a^2 / 3 \quad (18)$$

• Suposição 4

Os limites superiores e inferiores a_- e a_+ para uma grandeza de entrada x_i pode não ser simétrico, ou seja, se o limite menor é escrito como $a_- = x_i - b_-$ e o limite superior como $a_+ = x_i + b_+$, então $b_- \neq b_+$. Neste caso, x_i não é o centro do intervalo a_- a a_+ e a probabilidade da distribuição de x_i não pode ser uniforme por todas as partes no intervalo. Entretanto para escolher uma distribuição apropriada, diferentes modelos conduzirão para diferentes expressões para a variância. Na ausência de tais informações uma simples aproximação é

$$u^2(x_i) = \frac{(b_+ + b_-)^2}{12} = \frac{(a_+ + a_-)^2}{12} \quad (19)$$

6.4 Determinação da Incerteza Padrão Combinada

Quando a incerteza do resultado do mensurando y é obtida pela combinação das incertezas padrão das estimativas de entrada $x_1, x_2, \dots, x_N$, esta incerteza combinada da estimativa y é representada por $u_c(y)$, e denominada de incerteza padrão combinada.

As estimativas de entradas $x_1, x_2, \dots, x_N$, podem ser classificadas como grandezas:

- Estatisticamente independentes ou não correlacionadas;
- Estatisticamente dependentes ou correlacionadas.

Para as grandezas estatisticamente independentes, considera-se as séries de medições que foram realizadas com diferentes sistemas de medição. Neste caso, a incerteza padrão combinada $u_c(y)$ é a raiz quadrada positiva da variância combinada $u^2_c(y)$, apresentada em 7.1.

Quando as medições são realizadas com o mesmo sistema de medição, considera-se que as grandezas de entradas são estatisticamente dependentes entre si. Neste caso, a covariância estimada deve ser considerada como uma contribuição adicional para a incerteza. A expressão para se determinar esta incerteza é apresentada no item 7.2.

6.5 Determinação da Incerteza Expandida

Embora $u_c(y)$ possa ser universalmente usado para expressar a incerteza de um resultado de medição, devido a necessidade de algumas indústrias e aplicações comerciais, bem como requisitos em áreas de saúde e segurança, é frequentemente necessário apresentar uma medida de incerteza que defina um intervalo sobre o resultado de medição. Neste caso, a incerteza compreende uma fração da distribuição dos valores, que podem ser razoavelmente atribuídos para um mensurando, denominada de **incerteza expandida** U . Este requisito foi reconhecido pelo Working Group e Recomendações do CIPM (1981).

A **incerteza expandida** U é obtida pela multiplicação da incerteza padrão combinada $u_c(y)$ por um fator k :

$$U = k u_c(y) \quad (20)$$

O resultado de uma medição é então convenientemente expresso como $RM = y \pm U$, que é o melhor meio para a estimativa do valor atribuído para o mensurando y , e que $y-U$ a $y+U$ é um intervalo que representa uma fração da distribuição de valores que podem ser razoavelmente atribuídos para o mensurando. Tal intervalo também é expresso como:

$$y-U \leq y \leq y+U$$

O valor do fator k é escolhido com base no nível de confiança requerido para o intervalo $y-U$ a $y+U$. Em geral, k é usado entre 2 e 3. Portanto, para aplicações especiais, k poderá ser determinado conforme o nível de confiança requerido, de acordo com a tabela 5.1.

6.6 Resumo do Procedimento para Avaliação e Expressão da Incerteza

Os passos para avaliação e expressão da incerteza do resultado de uma medição pode ser resumido como segue COUTO (1993), ISO (1993):

- 6.6.1 Expressar matematicamente o relacionamento entre o mensurando Y e as grandezas de entradas x_i do qual Y depende: $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$.
- 6.6.2 Identificar todas as correções que têm de ser aplicadas e efetuá-las para todos os erros conhecidos.
- 6.6.3 Listar todas as fontes de incerteza associadas às repetições, com valores resultantes de medições prévias, e com correções das grandezas de influência.
- 6.6.4 Calcular a incerteza padrão $u(x_i)$ para cada estimativa de entrada x_i . Para uma estimativa de entrada obtida sob condições de repetitividade, a incerteza padrão é determinada pela avaliação Tipo A.
- 6.6.5 Para valores individuais que podem ser resultantes de medições anteriores, ou de literatura, adotar as variâncias onde elas são dadas ou podem ser calculadas. Se não for o caso, estimá-las com base na experiência.
- 6.6.6 Para as grandezas de entrada de influência cujas distribuições são conhecidas ou podem ser avaliadas, calcular a variância indicada para estas distribuições.
- 6.6.7 Determinar a incerteza padrão combinada $u_c(y)$, pela soma das variâncias parciais.
- 6.6.8 Calcular a incerteza expandida U , cujo propósito é obter um intervalo $y-U$ a $y+U$. Para obter a incerteza expandida, multiplica-se a incerteza padrão combinada $u_c(y)$ pelo fator k , obtendo assim, $U = k u_c(y)$. Selecionar k com base no nível de confiança exigido para o intervalo. Um fator normalmente usado é $k=2$, para um nível de confiança de 95%.

Capítulo 7

Propagação de Incerteza

7.1 Fórmula de Propagação de Incerteza

Um mensurando y calculado em função de outras grandezas $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ que tenham incertezas, terá também incerteza BECKWITH (1982), VUOLO (1992), ISO (1993), IPQ (1993).

As grandezas $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ são admitidas como grandezas experimentais, sendo $u(x_1), u(x_2), u(x_3), \dots, u(x_n)$ as incertezas padrão correspondentes. Se as incertezas padrão das grandezas $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ são **completamente independentes** entre si, a incerteza de y , denominada incerteza combinada $u_c(y)$ é dada por:

$$u^2_{c(y)} = \sum_{i=1}^n \left[\partial y / \partial x_i \right]^2 u^2_{(x_i)} \quad (21)$$

Se as incertezas padrão das grandezas $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ não são completamente independentes entre si, a expressão acima é incompleta. Uma expressão mais completa para este caso será apresentado na seção 7.2.

No caso de uma única grandeza x , a expressão (21) se reduz a:

$$u^2_{c(y)} = (dy/dx)^2 u^2(x) \quad \text{ou} \quad u_{c(y)} = |dy/dx| u(x) \quad (22)$$

Deve ser observado que $u(x)$ e $u_{c(y)}$ são positivos, por definição. Assim deve sempre ser considerado a raiz positiva de $u^2_{c(y)}$.

7.1.1 Fórmulas de Propagação Para Alguns Casos

A seguir serão apresentadas algumas fórmulas específicas para casos comuns.

• **Soma de variáveis:**

Seja: $y = x_1 \pm x_2 \pm x_3 \dots \pm x_n$

Onde: $\partial y / \partial x_1 = 1$

$\partial y / \partial x_2 = 1$

$\partial y / \partial x_3 = 1$

$\partial y / \partial x_n = 1$

E assim, pela expressão (21) temos:

$$u^2_c(y) = u^2(x_1) + u^2(x_2) + u^2(x_3) + \dots + u^2(x_n) \quad (23)$$

Portanto, quando as grandezas de influência de y , são uma soma ou subtração, a incerteza combinada é obtida pela raiz quadrada positiva da soma das variâncias individuais das estimativas $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$.

Exemplo 7.1: Determinar a incerteza de medição, na composição de dois blocos padrão, que foram medidos com diferentes sistema de medição.

Dados:	•Bloco 1
	Dimensão nominal: 10 (mm)
	Incerteza Expandida: $U_1 = 0.077(\text{nm})$ para $k = 2$
	•Bloco 2
	Dimensão nominal: 20 (mm)
	Incerteza Expandida: $U_2 = 0.084(\text{nm})$ para $k = 2$

O resultado da combinação dos blocos, pode ser expressa matematicamente por:

$$y = (x_1 + x_2)$$

onde: x_1 e x_2 , são os blocos padrão 1 e 2, respectivamente.

A incerteza padrão $u_{(xi)}$ dos blocos, é obtida dividindo-se a incerteza expandida pelo fator k . Assim,

$$u_{(x1)} = 0.077 / 2 = 0.038$$

$$u_{(x2)} = 0.084 / 2 = 0.042$$

A variância combinada, dada pela expressão (23) é:

$$u^2_{c(y)} = 0.038^2 + 0.042^2 = 0.0032 \text{ } (\mu\text{m})^2$$

Então, a incerteza padrão combinada é:

$$u_{c(y)} = 0.060 \text{ } (\mu\text{m})$$

• Relação linear:

Seja: $y = ax + b$

Admitindo-se que a e b são constantes isentas de incertezas ou com incertezas desprezíveis, somente a variável x é considerada para cálculo de incerteza. Assim,

$$\partial y / \partial x = a \quad \text{e}$$

substituindo-se na expressão (22), obtém-se:

$$u^2_{(y)} = a^2 u^2_{(x)} \quad \text{ou} \quad u_{(y)} = |a|u_{(x)} \quad (24)$$

• **Produto de variáveis:**

Seja: $y = axw$

Temos: $\partial y / \partial x = aw$ e $\partial y / \partial w = ax$

Substituindo na expressão (21) , obtém-se:

$$u^2_c(y) = (aw)^2 u^2(x) + (ax)^2 u^2(w)$$

A expressão acima pode ser simplificada dividindo-a por $y^2 = axw^2$, obtendo assim a chamada variância combinada relativa:

$$u^2_c(y) / y^2 = u^2(x) / x^2 + u^2(w) / w^2 \quad (25)$$

Exemplo 7.2 - Determinar a incerteza da área de um círculo, cujo diâmetro foi medido experimentalmente através de um sistema de medição denominado paquímetro.

$$RM = 30.05 \pm 0.05 \text{ (mm)}$$

A expressão para o cálculo da área é dada por: $y = 1/4 \pi d^2$, que pode ser reescrita como:

$$y = 1/4 \pi d d$$

Admitindo-se que $1/4$ e π são constantes isentas de incerteza ou com incertezas desprezíveis, somente a variável d é considerada para cálculo de incerteza.

Como trata-se apenas de multiplicações, pela expressão (25) a variância combinada resulta em,

$$u^2_c(y) / y^2 = u^2(d) / d^2 + u^2(d) / d^2$$

Assim, a incerteza combinada relativa é:

$$u_c(y) / y = 2 (u(d) / d)$$

Substituindo, $u(d)$ por 0.05 (mm) e d por 30.05 temos:

$$u_c(y)/y = 2 (0.05 / 30.05) = 0.0033$$

A incerteza combinada da área, resulta em,

$$u_c(y) = 0.0033 * (1/4 \pi 30.05^2) = 2.34 \text{ (mm)}^2$$

Portanto, o resultado da área do círculo pode ser expressa por:

$$y = 709.2 \pm 2.3$$

A tabela 7.1 resume as fórmulas de propagação de incerteza para os casos mais comuns. Os parâmetros a e b são supostos isentos de incerteza.

Tabela 7.1 - Exemplos de fórmulas de propagação de incerteza VUOLO (1992).

$y = f(x, w, \dots)$	Expressões para <i>incerteza</i>
$y = x \pm w \pm \dots$	$u^2_c(y) = u(x)^2 + u(w)^2 + \dots$
$y = x^m$	$u(y) = \left y = m x^{m-1} \right u(x) \quad \text{ou} \quad u(y)/y = m u(x)/x $
$y = ax$	$u(y) = a u(x)$
$y = ax + b$	$u(y) = a u(x)$
$y = axw$	$u^2_c(y) = (aw)^2 u^2(x) + (ax)^2 u^2(w) \quad \text{ou}$ $u^2_c(y)/y^2 = u^2(x)/x^2 + u^2(w)/w^2$
$y = a(x/w)$	$u^2_c(y) = (a/w)^2 u^2(x) + (ax/y^2)^2 u^2(w) \quad \text{ou}$ $u^2_c(y)/y^2 = u^2(x)/x^2 + u^2(w)/w^2$

7.2 Fórmula de Propagação de Incerteza Para Variáveis Dependentes.

Se duas grandezas de entradas x e w estão correlacionadas, isto é, são dependentes entre si, e as medições foram obtidas sob condições de repetitividade, a covariância $u(x,w)$ é dada por:

$$u(x,w) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(w_i - \bar{w}) \quad (26)$$

O grau de correlação entre x, w , é caracterizado pelo coeficiente de correlação r_{xw} , dado por:

$$r_{xw} = u(x,w)/u(x)u(w) \quad (27)$$

Onde: $r_{xw} = r_{wx}$, e $-1 \leq r_{xw} \leq +1$.

Se as estimativas x e w são independentes, a covariância $u(x,w)$ e o coeficiente de correlação r_{xw} são iguais a zero..

Portanto, se existe correlação entre as incertezas, uma fórmula para *propagação de incertezas*, mais geral que a (21) pode ser obtida usando as definições de variância e covariância, como segue,

$$u^2(y) = (\partial y / \partial x)^2 u^2(x) + (\partial y / \partial w)^2 u^2(w) + 2(\partial y / \partial x)(\partial y / \partial w) u(x,w) \quad (28)$$

Se duas ou mais grandezas, estiverem correlacionadas positivamente e se puder considerar que o coeficiente de correlação é $+1$, então a equação (28) pode ser simplificada para:

$$u^2(y) = ((\partial y / \partial x) u(x) + (\partial y / \partial w) u(w))^2 \quad (29)$$

Neste caso, a incerteza padrão combinada é obtida por adição das incertezas padrão das estimativas de entrada, multiplicados pelas adequadas derivadas parciais.

Exemplo 7.3: Determinar a incerteza de medição, na composição de dois blocos padrão, os quais foram medidos com um mesmo sistema de medição.

Dados:	•Bloco 1
	Dimensão nominal: 10 (mm)
	Incerteza Expandida: $U_1 = 0.077(\text{nm})$ para $k = 2$
	•Bloco 2
	Dimensão nominal: 20 (mm)
	Incerteza Expandida: $U_2 = 0.084(\text{nm})$ para $k = 2$

O resultado da combinação dos blocos, pode ser expressa matematicamente por:

$$y = (x + w)$$

onde: x e w , são os blocos padrão 1 e 2, respectivamente.

A incerteza padrão $u_{(x)}$ dos blocos, é obtida dividindo-se a incerteza expandida pelo fator k , assim:

$$u_{(x)} = 0.077 / 2 = 0.038$$

$$u_{(w)} = 0.084 / 2 = 0.042$$

Admitindo-se que, o coeficiente de correlação é $+1$, a incerteza padrão combinada pela equação (29) é:

$$u_{c(y)} = 0.038 + 0.042 = 0.08 \text{ (nm)}$$

Capítulo 8

Regras de compatibilização de valores

8.1 Regras de Arredondamento de Valores

Quando deseja-se arredondar um número para que seja expresso com uma certa quantidade de dígitos significativos, deve-se aplicar as regras convencionais de arredondamento (VUOLO, 1993):

Regra 1 :

Se o algarismo à direita do último dígito que se pretende representar for inferior a 5, apenas desprezam-se os demais dígitos à direita.

Exemplo: $3.14159265 \Rightarrow 3.14$

Regra 2 :

Se o algarismo à direita do último dígito que se pretende representar for maior que 5, adiciona-se uma unidade ao último dígito representado e desprezam-se os demais dígitos à direita.

Exemplo: $3.14159265 \Rightarrow 3.1416$

Regra 3 :

Se o algarismo à direita que se pretende representar for igual a 5, então o arredondamento deve ser tal que o último dígito representado *depois do arredondamento deve ser par*.

Exemplo: $3.14159265 \Rightarrow 3.142$

$21.425 \Rightarrow 21.42$

8.2 Número de Algarismos na Incerteza de Medição

Não existe uma regra bem definida para o número de algarismos que devem ser indicados para a Incerteza de Medição (VUOLO, 1993). É usualmente suficiente indicar **2 algarismos significativos**, além dos zeros à esquerda, embora em muitos casos pode ser necessário conservar dígitos adicionais para evitar erros de arredondamento em cálculos subseqüentes (ISO, 1993). Entretanto muitos pesquisadores utilizam 1 ou 2 algarismos conforme o caso, e alguns só admitem 1 algarismo em qualquer caso. Além disso, em certos casos, não é possível atribuir mais de 1 algarismo para a incerteza de medição.

Neste trabalho é apresentada algumas regras, nas quais os zeros à esquerda não são considerados.

- A incerteza de medição *deve* ser apresentada com 2 algarismos quando o primeiro algarismo na incerteza for 1 ou 2
- A incerteza de medição *pode* ser apresentada com 1 algarismo quando o primeiro algarismo da incerteza for 3 ou maior.
- A incerteza de Medição *pode* ser apresentada com 2 algarismo em qualquer caso.

De acordo com as regras acima, a tabela 8.1 apresenta um exemplo de formas corretas e incorretas de indicar a incerteza.

Tabela 8.1- Maneiras corretas e incorretas de indicar a Incerteza

Incorreto	Correto		
0.144 (mm)	0.14 (mm)		
1.026 (s)	1.0 (s)		
3.49 (mm)	3.5 (mm)	ou	3 (mm)
3.51 (mm)	3.5 (mm)	ou	4 (mm)
0.00514 (mm)	0.0050 (mm)	ou	0.005 (mm)

8.3 Regras de arredondamento para operações algébricas.

Frequentemente ocorre que números devem ser arredondados para a realização de operações algébricas, tais como: em adição, subtração, multiplicação e divisão. A seguir serão apresentados duas regras de arredondamento para tais casos.

• Adição e Subtração

- 1º Verificar o valor que possui o menor número de casas decimais;
- 2º Arredondar todos os outros valores com 1 casa decimal a mais;
- 3º Efetuar os cálculos;
- 4º Arredondar para a quantidade de casas decimais do item 1º.

Exemplo 8.1: Deseja-se obter a seguinte soma:

$$S = 2,635 + 0,9 + 1,52 + 0,7345$$

$$\begin{array}{ll} 1^\circ & 0,9 \\ 2^\circ & S = 2,64 + 0,9 + 1,52 + 0,73 \\ 3^\circ & S = 5,79 \\ 4^\circ & S = 5,8 \end{array}$$

• Multiplicação e Divisão

- 1º Verificar o valor que possui o menor número de algarismos significativos;
- 2º Arredondar todos os outros valores com 1 algarismo significativo a mais;
- 3º Efetuar os cálculos;
- 4º Arredondar para a quantidade de algarismos significativos do item 1º.

Exemplo 8.2: Deseja-se obter o resultado da seguinte operação:

$$R = \frac{(1.2)(6.335)(0.0072)}{3.14159}$$

$$R = \frac{(1.2)(6.34)(0.0072)}{3.14}$$

$$R = 0.0174$$

$$R = 0.017$$

8.4 Regras de Compatibilização de Valores

O resultado de uma medição envolvendo a incerteza de medição correspondente, deve sempre ser apresentado de forma compatível. É importante que o número e a posição dos dígitos que representam estes resultados possuam uma certa relação. A seguir são apresentadas as regras para compatibilização de valores:

• Regra 1:

Quando a incerteza de medição é apresentada com apenas um algarismo significativo, deve ser arredondada a incerteza de medição e o resultado da medição de forma que ambos tenham o mesmo número de dígitos decimais após a vírgula

Exemplos:

58.333333	± 0.1	$\Rightarrow$	58.3	± 0.1
385.42333	± 0.2125	$\Rightarrow$	385.4	± 0.2
37.8359	± 1	$\Rightarrow$	38	± 1
95.94	± 0.0378	$\Rightarrow$	95.94	± 0.04
93	± 0.002	$\Rightarrow$	93.000	± 0.002 *

* Esta representação é correta se assumir que a leitura original era de 93.000 cujos zeros não foram escritos.

• **Regra 2:**

A incerteza de medição pode ser representada com dois algarismos significativos; nestes casos deverá ser levado em consideração as seguintes situações:

- a) se o primeiro algarismo da incerteza de medição for 1 ou 2, arredondar normalmente;
- b) Se o primeiro algarismo da incerteza de medição for 3, 4 ou 5, arredondar para dois dígitos de forma que o segundo algarismo seja 0 ou 5;
- c) Se o primeiro algarismo da incerteza de medição estiver entre 6 e 9, a incerteza de medição deve ser arredondada para apenas um dígito significativo.

Exemplos:

3.1385 ± 0.15	$\Rightarrow$	3.14 ± 0.15
385.46333 ± 0.2437	$\Rightarrow$	385.46 ± 0.24
319.213 ± 11	$\Rightarrow$	319 ± 11
6.325 ± 0.414	$\Rightarrow$	6.32 ± 0.40
0.03425 ± 0.0034	$\Rightarrow$	0.0342 ± 0.0035
0.03425 ± 0.0091	$\Rightarrow$	0.034 ± 0.009

Capítulo 9

Resultado de Medição

9.1 Introdução

O resultado de medição é um valor atribuído a um mensurando obtido através da medição (INMETRO, 1995). Quando relatado o resultado de medição, deve-se indicar claramente, se ele se refere à indicação, ao resultado não corrigido, ao resultado corrigido, e, se corresponde ao valor médio de varias medições. A seguir será apresentado a definição de indicação, resultado corrigido e não corrigido:

- A indicação é o valor de uma grandeza fornecido por um instrumento de medição ou para uma medida materializada; é o valor a ela atribuído.
- Um resultado não corrigido é o resultado de uma medição, antes da correção, devido aos erros sistemáticos.
- O resultado corrigido é o resultado de medição, após a correção devido aos erros sistemáticos

Uma expressão completa do resultado de uma medição inclui informações sobre a incerteza de medição.

O resultado da medição (RM) é composto de duas parcelas:

a) o Resultado atribuído ao mensurando (RA), que corresponde ao valor central da faixa onde deve se situar o valor verdadeiro da grandeza medida;

b) a Incerteza do Resultado (***IR***), que expressa a faixa de dúvida ainda presente no resultado, provocado pelos erros presentes no sistema de medição e as variações da grandeza a medir.

Portanto o resultado da medição deve sempre ser expresso por:

$$RM = RA \pm IR \text{ (unidade)} \quad (30)$$

9.2 Grandeza Variável e Invariável

A grandeza a medir, para fins de medição, pode ser classificada como variável ou invariável. A temperatura de uma sala ao longo do tempo é um exemplo de grandeza variável, isto é, seu valor se altera em função do tempo e da posição ao longo da sala. A grandeza é invariável quando o seu valor permanece constante. Em termos específicos, não existem grandezas invariáveis. Porém na prática, é possível atribuir que uma grandeza é invariável, em função do sistema de medição ou do método de medição utilizado.

9.2.1 Grandeza Invariável

As grandezas podem ser consideradas invariáveis se:

- As variações das grandezas não são detectadas pelo sistema de medição em uso, ou seja, as variações da grandeza a medir são inferiores à resolução do sistema de medição.

Exemplo 9.1 - Para a medição de uma esfera padrão com variações geométricas na ordem de nanometro ($0.001 \mu\text{m}$), foi utilizada uma máquina de medir tridimensional, cujo apalpador possui uma incerteza de $0.1 (\mu\text{m})$; para este sistema de medição, a esfera é considerada como invariável, pois a incerteza do apalpador é 100 vezes superior ao desvio da esfera.

- A grandeza, for medida no mesmo ponto de referência; nos quais, as medidas não são influenciadas pelos desvios geométricos.

Exemplo 9.2 - Se o diâmetro de um anel for medido n vezes na mesma referência, esta grandeza para efeito de medição, é considerada como invariável, pois, os desvios de circularidade não estão influenciando a medida.

Supondo-se que, na calibração de um anel padrão, é utilizada uma máquina de medir horizontal, com resolução de $0.0001 (\text{mm})$ ou seja $0.1 (\mu\text{m})$. O diâmetro do anel é determinado em duas posições a 0° e 90° (conforme figura 9.1). No resultado da calibração é apresentado, o

diâmetro na posição a 0° e a 90° . Para efeito de medição, este anel padrão é considerado invariável, pois no resultado de calibração não houve interferência dos desvios da peça.

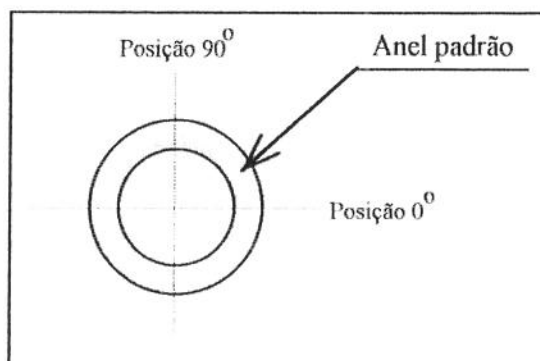


Figura 9.1 - Anel padrão

Exemplo 9.3: Na calibração de blocos padrão, quando é determinado apenas o erro do meio, para efeito de medição, o bloco padrão é considerado como uma grandeza invariável, pois não estão sendo considerados os desvios de paralelismo.

9.2.2 Grandeza variável

As grandezas são consideradas variáveis quando:

- As variações das grandezas a medir são detectadas pelo sistema de medição.
- Os desvios geométricos influenciam o resultado de medição.

Exemplo 9.4 - Supondo-se que, a calibração de um anel padrão, com tolerância geométrica de circularidade de $\pm 0,005$ (mm), é efetuado por um sistema de medição com resolução de $0,0001$ (mm). Pelo método de calibração utilizado, é medido o anel 5 vezes em cada posição, onde, cada posição está a 45° uma da outra, conforme a figura 9.2. No resultado da calibração é apresentado um diâmetro, sendo obtido pela média das médias de cada posição. Neste caso, para efeito de medição, a grandeza é

considerada como variável. No item 9.4, é abordado com detalhes a determinação do resultado de medição.

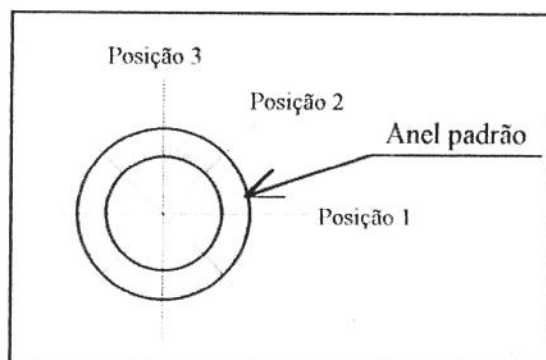


Figura 9.2- Posições de Calibração de um Anel Padrão

Portanto, o diâmetro de um anel pode ser considerado como uma grandeza variável ou invariável. Devido às imperfeições geométricas na forma circular, resultarão diferentes valores do diâmetro quando medidos em pontos diferentes, o que caracteriza uma grandeza variável. Portanto, se estas variações forem inferiores à resolução do sistema de medição em uso, esta peça será considerada em termos de medição como invariável. O uso de um outro sistema de medição com melhores características poderia levar a uma outra interpretação.

Portanto a classificação de grandeza variável e invariável não depende só do tipo da grandeza, mas da relação das características da peça com as características do sistema de medição e o procedimento de medição utilizado.

9.3 Determinação do Resultado da Medição

Para a determinação do resultado de medição é necessário um conhecimento aprofundado do processo que define a grandeza a medir e, um conhecimento do sistema de medição quanto às características metrológicas e operacionais..

Para a realização do processo de medição é necessário a comprovação metrológica do sistema de medição, ou seja, possuir o certificado de calibração onde estejam relatados os erros do sistema de medição, cujo erro imputável à medição deve ser tão pequeno quanto possível. Na maioria das áreas de medição, este erro não deveria ser maior do que um terço e, de preferência, ser de um décimo do erro permissível da grandeza medida (ISO10012-1, 1993).

9.3.1 Determinação do Resultado de Medição De uma Grandeza Invariável

Uma vez que , várias medidas da grandeza a medir estão disponíveis, a média destas medidas menos o erro sistemático do sistema de medição, deve ser usado como o Resultado Atribuído ao mensurando e a incerteza do resultado será a incerteza de medição (a determinação da incerteza de medição foi apresentada no capítulo 6). Assim tem-se:

$$RM = y_m \pm U \quad (31)$$

onde: y_m = média das medidas

U = incerteza de medição

9.3.2 Determinação do Resultado de Medição De uma Grandeza Variável

Nesta situação, onde a grandeza a medir pode apresentar variações em função do ponto onde a medição seja tomada, o resultado de medição deve exprimir a faixa de valores que engloba todos os valores possíveis de serem assumidos por esta grandeza nas condições que ela é observada, além de considerar as incertezas introduzidas pelo sistema de medição.

Diversas medidas sempre devem ser realizadas, procurando abranger os diversos valores que possam ser assumidos pela grandeza a medir. A escolha do número, posição e instante onde a medição será realizada deve ser sempre direcionada para tentar englobar os valores extremos da grandeza a medir.

Define-se a quantidade $\Delta y_{\text{máx}}$ como a variação máxima das medidas obtidas em relação ao valor médio. $\Delta y_{\text{máx}}$ é usada como estimativa para avaliar a faixa de variação desta grandeza, e é calculada a partir do valor absoluto da maior diferença entre cada medida obtida e a média, ou seja:

$$\Delta y_{\text{máx}} = |y_i - y_m|_{\text{máx}}$$

Sendo conhecido o erro sistemático, este deve ser compensado, isto é subtraído da média das medidas, para formar o resultado atribuído (RM). A parcela de dúvida originada pelas imperfeições do sistema de medição é devido apenas ao erro aleatório. O valor da grandeza a medir sobrepõe-se a este erro aleatório GONÇALVES(1993). O valor de $\Delta y_{\text{máx}}$ já é afetado por ambos efeitos simultaneamente, de modo que já é uma boa estimativa da incerteza do resultado. Assim o resultado da medição pode ser calculado por:

$$RM = (y_m - \eta_s) \pm \Delta y_{\text{máx}} \quad (32)$$

onde:

y_m é a média das medidas
 η_s é o erro sistemático

Capítulo 10

Calibração

Um sistema de medição confiável deve ser capaz de apresentar resultados com pequenos erros de medição. Seus princípios construtivos e operacionais devem ser projetados para minimizar os erros de medição.

Através de um procedimento experimental denominado *calibração* é possível determinar os erros de um sistema de medição.

A calibração é um conjunto de operações que estabelece, sob condições específicas, a relação entre os valores indicados por um sistema de medição ou valores representados por uma medida materializada ou um material de referência, e os valores correspondentes das grandezas estabelecidas por padrões (INMETRO, 1995).

O resultado de uma calibração permite tanto o estabelecimento dos valores do mensurando para as indicações, como a determinação das correções a serem aplicadas.

Uma calibração pode, também, determinar outras propriedades metrológicas como o efeito das grandezas de influência.

10.1 Padrões de calibração

Para que um valor padrão possa ser adotado, para fins de calibração, como valor verdadeiro convencional, é necessário que seus erros sejam sensivelmente menores que os erros esperados do sistema de medição a calibrar. Adota-se como padrão um sistema de medição ou grandeza corporificada, que apresente incerteza, ou seja, erro máximo, não superior a um décimo da incerteza esperada para o sistema de medição a calibrar. Assim:

$$U_{smp} \leq 1/10 U_{smc}$$

onde: U_{smp} = incerteza do sistema de medição padrão

U_{smc} = incerteza do sistema de medição a calibrar

Desta forma, a incerteza do sistema de medição padrão apresentará um dígito a mais que o sistema de medição a calibrar, o que é suficiente para a determinação dos erros deste último dígito. Excepcionalmente, em casos onde é muito difícil ou caro se obter um padrão 10 vezes superior ao sistema de medição a calibrar aceita-se 1/5 para a razão entre as incertezas U_{smp} e U_{smc} . Em último caso, aceita-se até 1/3 para a razão entre as incertezas U_{smp} e U_{smc} (ISO1012-1, 1993).

Os padrões de laboratório, sejam estes, sistemas de medição ou grandezas corporificadas, por sua vez, devem ter suas características comprovadas por meio de calibrações, usando padrões ainda superiores; e estes, por sua vez, a outros, estabelecendo uma hierarquia que irá terminar nos padrões primários. A calibração periódica dos padrões garante a rastreabilidade internacional.

Rastreabilidade é a propriedade do resultado de uma medição ou do valor de um padrão estar relacionado a referências estabelecidas, geralmente padrões nacionais ou internacionais, através de uma cadeia contínua de comparações, todas tendo incertezas estabelecidas. O conceito é geralmente, expresso pelo adjetivo *rastreável*. Uma cadeia contínua de comparações é denominada de *cadeia de rastreabilidade*.

10.2 Classificação dos Padrões

Um padrão pode ser uma medida materializada, um instrumento de medição, um material de referência ou um sistema de medição destinado a definir, realizar, conservar ou reproduzir uma unidade ou um ou mais valores de uma grandeza, para servir como referência. Tais padrões podem ser classificados em (INMETRO, 1995):

10.2.1 Padrão Internacional

É um padrão reconhecido por um acordo internacional para servir, internacionalmente, como base para estabelecer valores a outros padrões da grandeza a que se refere.

10.2.2 Padrão Nacional

Padrão reconhecido por uma decisão nacional para servir, em um país, como base para estabelecer valores a outros padrões da grandeza a que se refere.

10.2.3 Padrão Primário

Padrão que é designado ou amplamente reconhecido, como tendo as mais altas qualidades metrológicas e cujo valor é aceito sem referências a outros padrões de mesma grandeza (VIM, 1995)

10.2.4 Padrão Secundário

Padrão cujo valor é estabelecido por comparação a um padrão primário da mesma grandeza.

10.2.5 Padrão de Referência

Padrão, geralmente tendo a mais alta qualidade metrológica disponível em um dado local ou em uma organização, a partir do qual as medições lá executadas são derivadas.

10.2.6 Padrão de Trabalho

Padrão utilizado rotineiramente para calibrar ou controlar medidas materializadas, instrumentos de medição ou materiais de referência. Um padrão de trabalho é geralmente calibrado por comparação a um padrão de referência.

10.2.7 Padrão de Transferência

Padrão utilizado como intermediário para comparar padrões. O termo dispositivo de transferência deve ser utilizado quando o intermediário não é um padrão.

10.3 Garantia da qualidade

Para assegurar, que a calibração é realizada com a exatidão pretendida, um laboratório de metrologia deve considerar alguns requisitos para se obter a garantia da qualidade. Tais requisitos compreendem EN45001 (1990), ISO GUIDE 25 (1990), RTRJ (1991), INMETRO (1993), NBR10012-1 (1993), ABNT GUIA 58 (1993), INMETRO (1993):

10.3.1 Equipamento de Medição

O equipamento de medição deve ter as características metrológicas requeridas para a execução correta dos ensaios e calibrações, como exemplo: exatidão, faixa de operação, estabilidade e resolução.

10.3.2 Sistema de Comprovação

A comprovação metrológica é um conjunto de operações necessárias para assegurar que um dado equipamento de medição esteja em condições de conformidade com os requisitos para uso pretendido. Uma comprovação metrológica normalmente inclui, entre outras atividades, a calibração, a manutenção necessária, a subsequente recalibração, bem como alguma lacração ou etiquetagem necessária.

10.3.4 Incerteza de Medição

Ao efetuar medições e ao relatar e fazer uso dos resultados de medição, o laboratório deve levar em conta todas as incertezas significativas no processo de medição, inclusive àquelas atribuíveis ao equipamento de medição e aos padrões de medição, e àquelas para as quais contribuíram os procedimentos pessoais e o ambiente.

10.3.5 Condições Ambientais

Os padrões e equipamentos de medição devem ser calibrados e operados em ambiente controlado, na extensão necessária para assegurar a validade dos resultados das medições.

10.3.6 Rastreabilidade da Medição e Calibração

Todo equipamento de medição e de ensaio, que tiver influência na exatidão ou na validade das calibrações ou ensaios devem ser calibrados antes de ser colocados em serviço. O laboratório deve ter um programa estabelecido para a calibração de seus equipamentos de medição e ensaio.

O programa global de calibração e validação de equipamentos deve ser projetado e operado de modo a garantir que sempre que aplicável, as medições feitas pelo laboratório sejam rastreáveis a padrões nacionais ou internacionais , quando disponíveis.

10.3.7 Calibração e Métodos de Ensaio

O laboratório de metrologia deve ter instruções documentadas sobre o uso e operação de todos os equipamentos pertinentes, sobre o manuseio e preparação de itens e sobre a calibração ou ensaio, quando as ausências de tais instruções possa prejudicar a eficácia das calibrações ou ensaios. Todas as instruções, normas, manuais e dados de referência pertinentes ao trabalho do laboratório, devem ser mantidos atualizados e prontamente disponíveis para a equipe.

10.3.8 Certificados e Relatórios de Calibração

Os resultados de cada calibração, ensaio ou série de calibrações ou ensaios realizados pelo laboratório devem ser relatados de forma precisa, clara e objetiva, sem ambiguidade e, de acordo, com as instruções descritas nos métodos de calibração e ensaio. Os resultados devem ser relatados num certificado de calibração, relatório de ensaio ou certificado de ensaio e, devem incluir todas as informações necessárias para a interpretação dos resultados ou ensaio e, toda informação exigida pelo método usado.

10.3.9 Intervalos de Comprovação

Um aspecto importante da operação eficiente de um sistema de comprovação é o estabelecimento de período máximo entre sucessivas comprovações de padrões e equipamentos de medição.

Capítulo 11

Avaliação da Comprovação Metrológica Para Calibração de Blocos Padrão

Neste capítulo é apresentado a avaliação da comprovação metrológica, executada num laboratório pertencente à Rede Brasileira de Calibração (RBC), para a calibração de blocos padrão.

11.1 Método de Calibração

O método utilizado na calibração de blocos padrão é diferencial, onde o valor do bloco padrão a calibrar é obtido em comparação com um bloco padrão de referência.

11.2 Procedimento de Calibração

O roteiro de calibração, obedece as seguintes etapas:

- 1º Abrir uma ordem de serviço;
- 2º Conferir os blocos padrão, quanto à quantidade, conservação, classe de exatidão e número de registro;
- 3º Efetuar a limpeza dos blocos;
- 4º Efetuar a limpeza dos blocos de referência;
- 5º Aguardar a estabilização da temperatura dos blocos;
- 6º Ligar o sistema de calibração;
- 7º Preparar as folhas de registro dos dados;
- 8º Deixar disponível o certificado de calibração dos blocos de referência;

- 9° Após estabilizar a temperatura dos blocos iniciar a calibração;
- 10° Efetuar a leitura da temperatura ambiente e umidade relativa;
- 11° Efetuar a calibração de acordo com o procedimento de calibração;

O procedimento de calibração, se resume em:

- Posicionar os blocos de referência e os blocos a calibrar no sistema de medição;
- Posicionar o apalpador do sistema de medição, apalpando-se no bloco de referência e ajustar em zero o sistema de leitura;
- Após o ajuste do zero, apalpar o bloco a calibrar e efetuar a leitura;
- A ordem de execução das leituras L_i são:
 - $L1 = B$ bloco de referência = zero
 - $L2 = P$ bloco à calibrar
 - $L3 = P$
 - $L4 = B$
 - $L5 = B$
 - $L6 = P$
 - $L7 = P$
 - $L8 = B$
- As oito leituras formam um ciclo de medição, este ciclo é repetido por 3 vezes, sendo que só é ajustado o sistema em zero, quando se inicia o primeiro ciclo.
- Para cada ciclo, calcula-se a média dos valores obtidos para **B** e **P**, que são denominados $B_{méd}$ e $P_{méd}$, respectivamente;
- Calcula-se a média dos 3 valores $B_{méd}$ e a média dos 3 valores de $P_{méd}$;
- Determina-se o valor **M**, que é a diferença dos valores obtidos na etapa anterior.
- Calcula-se o valor corrigido do bloco a calibrar, sendo o valor **M** somado com o desvio **D** do bloco de referência (obtido do certificado de calibração).

A figura 11.1 apresenta, um modelo da ficha de calibração

Laboratório de Metrologia Registro das Medições Procedimento para Calibração de Blocos Padrão						
Interessado:				Data desta calibração:		
Bloco- padrão (B):				Número de Série:		
Grau de Exatidão:				Número de Registro:		
Bloco à Calibrar (P):				Fabricante:		
Sistema de medição:				Desvio (D):		
Temperatura:				Executante:		
Umidade:						
B	P	P	B	Bméd	Pméd	Pméd - Bméd
Pméd - Bméd = M						
M + D =				(desvio final de P)		
Valor corrigido = (mm)				± (µm)		

Figura 11.1 - Ficha de calibração

11.3 Sistema de medição

O sistema de medição, utilizado para a calibração de blocos padrão é composto de um apalpador de contato mecânico, um sistema de leitura com faixa de indicação $FI \pm 0,05$ (μm) e incremento de escala IE 0,01 (μm), fabricante Militron[®] e uma base para o apalpador, com faixa de operação FO de 0 a 100 (mm).

Para se efetuar a calibração deste sistema de medição, como abordado no capítulo 10, a condição ideal é possuir um padrão com uma incerteza, ou seja, um erro máximo, de um décimo da incerteza esperada. Admitindo-se que, a incerteza esperada do sistema de medição seja de ± 0.05 (μm), o padrão de referência para a realização da calibração, deveria possuir uma incerteza de ± 0.005 (μm); mesmo analisando-se pelo extremo, admitindo-se a relação de um terço, seria necessário um padrão de referência com uma incerteza de ± 0.016 (μm). Como, não é possível obter um padrão com este grau de exatidão, então, este sistema *não é* calibrado. Quando não é possível determinar o erro máximo de um sistema de medição através da calibração, é possível adotar que, o erro máximo varia de duas a cinco vezes o incremento de escala, assim, para este sistema é adotado que o erro máximo é de ± 0.05 (μm) para um nível de confiança de 95%, ou seja, $k=2$ (GONÇALVES, 1993).

Uma solução, para o exposto acima, seria efetuar a calibração do sistema através de dois blocos padrão, com valores conhecidos, ou seja, com dois blocos padrão calibrados por outro laboratório. Foi efetuado esta comparação para várias dimensões, porém, o desvio máximo apresentado pelo sistema de medição foi de ± 0.04 (μm), e a incerteza dos blocos padrão utilizado na comparação é $U = \pm 0.05 + L/2000$. Observa-se que, a incerteza do padrão utilizado, é superior ao desvio encontrado. Podemos concluir apenas que, o erro do sistema de medição não é superior à incerteza dos blocos usados na comparação.

Outra solução, seria efetuar a calibração do sistema de medição por interferometria. No Brasil, só existem dois interferômetros, um no INMETRO e outro no LAMEDI - Laboratório de Metrologia Dimensional da Unicamp. O último não está em operação, e no primeiro, para se efetuar a calibração é necessário aguardar um período relativamente longo, devido à demanda.

11.4 Padrão de Referência

Atualmente, o laboratório possui dois jogos de blocos padrão sendo :

Blocos padrão - Jogo 1

Fabricante:	Carl Zeiss Jena
Quantidade de peças	125 pç
Código	TGL RGW 720/0
Nº série	31 378 / 88
Classe especificada	0
Material	Aço
Certificado calibração	079/95
Método de Calibração	Diferencial
Data da última calibração	24/05/95
Executante	Mitutoyo - Pertencente à RBC
Incerteza de Medição	$U = \pm (0.05 + L/2000) \text{ } \mu\text{m}$, para $k=2$
Próxima calibração	24/05/97

Blocos padrão - Jogo 2

Fabricante:	Mitutoyo
Quantidade de peças	112 pç
Código	NR. 516 937
N### série do conjunto	930 912
Classe especificada	00
Material	Aço
Certificado calibração	111/93
Método de calibração	Diferencial
Data da última calibração	21/12/93
Executante	Mitutoyo - Pertencente à RBC
Incerteza de Medição	$U = \pm (0.06 + L/3000) \text{ } \mu\text{m}$, para $k=2$
Próxima calibração	21/12/95

11.5 Instalação e Condições Ambientais

O laboratório de metrologia, possui 5 salas, das quais 3 são destinadas para a calibração e ensaio. O laboratório possui um sistema de ar condicionado central, e um amplo sistema para comprovação das grandezas de influência nas medições, tais como a temperatura e a umidade. A sala destinada para calibração de blocos padrão, é controlada por termômetros de bulbo e hidrógrafo, para uma temperatura de $20 \pm 0,5$ °C e umidade relativa de 50%.

11.6 Capacitação Técnica

O laboratório possui um responsável técnico pela execução da calibração, com experiência comprovada, e com certificação do INMETRO para a calibração de blocos padrão. Para garantir e manter a qualificação profissional, o laboratório investe em normas técnicas atualizadas, treinamentos e palestras, além do contínuo desenvolvimento de pesquisas.

11.7 Incerteza de Medição

Ao emitir um relatório de calibração dos blocos padrão, o laboratório relata uma incerteza de medição $U = \pm (0.08 + L / 2000)$ (µm). Esta incerteza, foi adotada, seguindo as recomendações do INMETRO.

Um dos objetivos, deste trabalho, é determinar a incerteza de medição, levando em consideração, as condições reais do laboratório de metrologia.

11.8 Determinação da Incerteza de Medição na Calibração de Blocos Padrão

A incerteza de medição será calculada na calibração de blocos padrão com dimensões de 0,5 a 100 (mm), mediante comparação diferencial com padrões de referência.

O comprimento L do bloco em calibração é dado por:

$$L = (L_p + \Delta L) \pm U$$

onde:

- L_p = comprimento dos blocos de referência
- ΔL = diferença do comprimento dos blocos em calibração para os dos padrões de referência
- U = Incerteza Expandida

11.8.1 Formulação dos dados de entrada.

82

Neste trabalho somente serão consideradas as contribuições mais importantes para a incerteza.

Como os blocos padrão de referência e os blocos padrão a calibrar, utilizados para este trabalho são do mesmo material, a deformação provocada pela força aplicada do apalpador sobre a superfície do bloco padrão é desprezível (BEERS&TAYLOR, 1995).

a) Incerteza de Medição devido a repetitividade.

Como o laboratório só possui um técnico destinado à calibração de blocos padrão, não foi efetuada a reprodutibilidade das medições.

Do resultado de 60 medidas sob condições de repetitividade, temos:

0	0	0	3	4	1	-1	1	0	0
-1	0	2	1	0	-1	0	-1	0	1
0	1	0	-1	-1	0	1	0	0	0
1	1	0	1	1	2	2	2	2	4
3	4	4	4	3	2	3	2	3	4
2	3	2	3	3	3	3	3	2	3

De acordo com a expressão (16) a variância média é:

$$u^2_{(x1)} = 4.02 \text{ (nm)}^2$$

b) Incerteza devida à calibração do Sistema de Medição

O calibrador de blocos padrão não é calibrado, isto é, não possuímos a curva de erros para encontrar os erros aleatórios e sistemáticos, (uma vez que, o método é diferencial, então, assume-se que os erros sistemáticos sejam anulados, porém persistem os erros aleatórios). Portanto, para se estimar a incerteza do calibrador, quando não existe nenhuma informação da incerteza de medição (U), recomenda-se, para sistema de medição com indicação digital, a expressão (vide item 11.3):

$$U = \pm 2 * ID \text{ a } \pm 5 * ID, \quad \text{onde: } U = \text{incerteza expandida, para } k=2 \\ ID = \text{incremento digital}$$

Para esta avaliação adotou-se o caso extremo $U = \pm 5 * ID$

Portanto, a incerteza para $k=2$, ou seja, para um intervalo de confiança de 95%, vale $\pm 50 \text{ (nm)}$. Então, o correspondente desvio padrão vale: $50/2 = 25 \text{ (nm)}$, assim, a variância será:

$$u^2_{(x2)} = 625 \text{ (nm)}^2$$

c) Incerteza devido à calibração do padrão de referência

Para esta avaliação foi utilizado o jogo de blocos padrão N°31 378 /88, porque o outro estava com o prazo de calibração vencido.

De acordo com o certificado de calibração, a incerteza expandida (U) do jogo de blocos padrão é:

$$U = \pm 0.05 + L / 2000 (\mu\text{m}), \quad p/k=2$$

Portanto o desvio padrão S , será: $S = 25 (\text{nm}) + 0.25 \times 10\text{E-}06 L$

E, a variância $u^2_{(x)}$, resulta em:

$$u^2_{(x)} = 625 (\text{nm})^2 + 12.5 \times 10\text{E-}06 L \times \text{nm} + 62.5 \times 10\text{e-}15 L^2 \quad (33)$$

d) Incerteza devida à diferença de temperatura entre os blocos em comparação

Pela definição do coeficiente de dilatação linear α , cujo valor para aços vale $(11.5 \times 10\text{e-}06 \text{ K}^{-1})$ (RESNICK, 1984), obtém-se:

$$u(x)_{\Delta T} = \alpha \times L \times \Delta T$$

Adotando-se $\Delta T = \pm 0.05 \text{ K}$, Obtem-se, através da expressão (18) a variância parcial.

$$u^2_{(x)} = 1/3 (11.5 \times 10\text{e-}06 \times 0.05 L)^2$$

$$u^2_{(x)} = 110 \times 10\text{e-}15 L^2 \quad (34)$$

e) Incerteza devida à diferença da temperatura do padrão para a temperatura de referência (20 °C)

Neste caso, a expressão contendo os termos da incerteza é:

$$u_{(x5)} \Delta \alpha = \Delta \alpha \times L \times \Delta T$$

onde: $\Delta \alpha$ é a diferença de α entre dois blocos em comparação (o padrão e o a calibrar)

O valor estimado de $\Delta \alpha$ é :

$$| \Delta \alpha | < 1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

A temperatura do LAMEDI é de (20 ± 0,5) °C

De acordo com a expressão (18) as variâncias parciais resultam em:

$$u^2_{(x5)} \Delta \alpha = 1/3 \times 10^{-12} \text{ K}^{-2}$$

$$u^2_{(x5)} \Delta T = 1/3 \times 0.25 \text{ K}^{-2}$$

Conforme a expressão (21) , a estimativa para a variância combinada $u^2_c(x_5)$ é:

$$u^2_c(x_5) = [(\Delta T)^2 (u^2_{(x5)} \Delta \alpha)^2 + (\Delta \alpha)^2 (u^2_{(x5)} \Delta T)^2] L^2$$

Substituindo ΔT por $(u^2_{(x5)} \Delta T)$ e $\Delta \alpha$ por $(u^2_{(x5)} \Delta \alpha)$ temos:

$$u^2(x_5) = 2 \times (1/3) \times (1/3) \times 0.25 \times 10^{-12} L^2$$

$$\text{Logo: } \boxed{u^2_{(x5)} = 55,56 \times 10^{-15} L^2} \quad (35)$$

11.8.2. Incerteza combinada

De acordo com a expressão (21) , a variância $u^2c(x_i)$ é dada pela soma das variâncias parciais.

Componentes	Variâncias				
(x ₁)	4.02 (nm) ²				
(x ₂)	625 (nm) ²				
(x ₃)	625 (nm) ²	+	12.5x10e-06 L nm	+	62.5 x 10 e-15 L ²
(x ₄)					110,00 x 10 e-15 L ²
(x ₅)					55,56 x 10 e -15 L ²
total	1254.02(nm) ²	+	12.5x10e-06 L nm	+	228.06 x 10 e-15 L ²

Portanto:

$u^2c(x_i) = 1254.02 \text{ (nm)}^2 + 12.5x10e-06 \text{ L (nm)} + 228.06 \times 10 \text{ e-15 L}^2$ (36)

Como para a calibração de blocos padrão a incerteza combinada é apresentada através de uma constante acrescida de uma variável, aproxima-se a expressão (36).

Desta forma, obtem-se a expressão abaixo:

$u^2c(x_i) = 0.035 \text{ (um)} + L / 721.54 \text{ (um)}$ (37)

Que está correta nos valores limites e sobreestima a incerteza nos valores intermediários, no máximo em cerca de 6.3% para L = 37(mm). A figura 12.1, mostra as duas curvas.

Então, a Incerteza Expandida, de acordo com a expressão (20) com k = 2, vale:

$U = 0.0705 \text{ (um)} + L / 1443.07 \text{ (um)}$

(38)

Capítulo 12

Análise dos Resultados

12.1 Resultados e discussões

Através deste trabalho foi possível avaliar a Incerteza de Medição para a calibração de blocos padrão.

A incerteza de medição foi calculada para a calibração de blocos padrão, com dimensões de 0,5 a 100 (mm). O comprimento dos blocos padrão à calibrar é determinado por comparação diferencial aos padrões de referência.

Para a realização do cálculo da incerteza, foram consideradas as grandezas de influência mais relevantes, sendo:

- Incerteza do Sistema de Medição - ou seja, o erro máximo que o sistema de medição poderá impor à medida ao longo da faixa de operação. Para se obter esta incerteza, é necessário se calibrar o sistema de medição. Uma das maneiras de se realizar esta calibração é feita através da utilização de blocos padrão calibrados por interferometria. Devido à impossibilidade desta calibração, estimou-se uma incerteza máxima de ± 50 (nm) para um intervalo de confiança de 95%, ou seja, uma variância de 625 (nm)².

- Repetitividade do sistema de medição - se o sistema de medição estivesse calibrado, a influência da repetitividade já estaria incluída na calibração. Como é desconhecido o comportamento do sistema, foi determinada esta influência pela repetição de 60 medidas, e encontrou-se uma

variância de 4 (nm)^2 . Em relação ao erro atribuído ao sistema de medição, a influência desta grandeza tornou-se desprezível, mesmo assim foi utilizada para os cálculos.

- Incerteza devido à calibração do bloco padrão de referência - Esta incerteza foi obtida através do certificado de calibração dos blocos, que, também foram calibrados por comparação diferencial, por um outro laboratório pertencente à RBC, e a variância obtida pode ser indicada pela expressão (33).

- Incerteza devido à diferença de temperatura entre os blocos em comparação. Sabe-se que, os blocos padrão apresentam uma dilatação, em função da variação da temperatura. Admitindo-se que a temperatura seja "constante" ou seja "permanece" em 20° , pode-se supor que os dois blocos em comparação, o bloco de referência e o bloco à calibrar, não estão na mesma temperatura. Esta possível variação de temperatura entre os blocos, provocará diferentes dilatações. Devido à esta influência, foi adotado uma variação de temperatura $\Delta T = \pm 0.05 \text{ K}$. Para o cálculo da incerteza devido à esta influência, foi utilizado para o cálculo o coeficiente de dilatação térmica do aço ($11.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). Neste caso, a variância estimada é indicada pela expressão (34).

- Incerteza devida à variação da temperatura - Devido à variação da temperatura ao longo de uma sala e no decorrer do tempo, é necessário estabelecer limites aceitáveis para estas variações. A temperatura de referência em laboratório de metrologia é normalizada em 20°C , e a variação recomendada para a calibração de blocos padrão é $\pm 0.5^\circ\text{C}$. Através desta variação de temperatura, haverá diferentes dilatações nos blocos padrão no decorrer do tempo de calibração. Para estimar a incerteza devido à esta influência, além da variação da temperatura, também foi levado em consideração a incerteza do coeficiente de dilatação linear, que para os blocos padrão de aço é $\pm 1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. A variância obtida é indicada na expressão (35).

A variância combinada, obtida em função das grandezas de influência consideradas, está indicada na expressão (36). Esta expressão não está no padrão de indicação de incertezas para calibração de blocos padrão, e desta maneira, através do

método dos mínimos quadrados, a expressão (36) foi aproximada para a expressão (37). Estas expressões, são a seguir reescritas, para melhores interpretações.

$$u^2c(xi) = 1254.02(\text{nm})^2 + 12.5 \times 10^{-6} L \text{ nm} + 228.06 \times 10^{-15} L^2 \quad (36)$$

$$u^2c(xi) = 0.035 (\mu\text{m}) + L / 721.54 (\mu\text{m}) \quad (37)$$

A expressão (37), como é uma aproximação da expressão (36), apresenta desvios. Pelo método utilizado, pode-se assumir que está correta nos valores limites e sobreestima a incerteza nos valores intermediários, no máximo em cerca de 6.3% para $L = 37(\text{mm})$. Nesta posição a incerteza calculada pela expressão (37) é $0.086 (\mu\text{m})$ e pela expressão (36) é $0.081(\mu\text{m})$, portanto o desvio máximo é de $0.005(\mu\text{m})$ ou seja $5 (\text{nm})$. A figura 12.1, mostra as duas curvas.

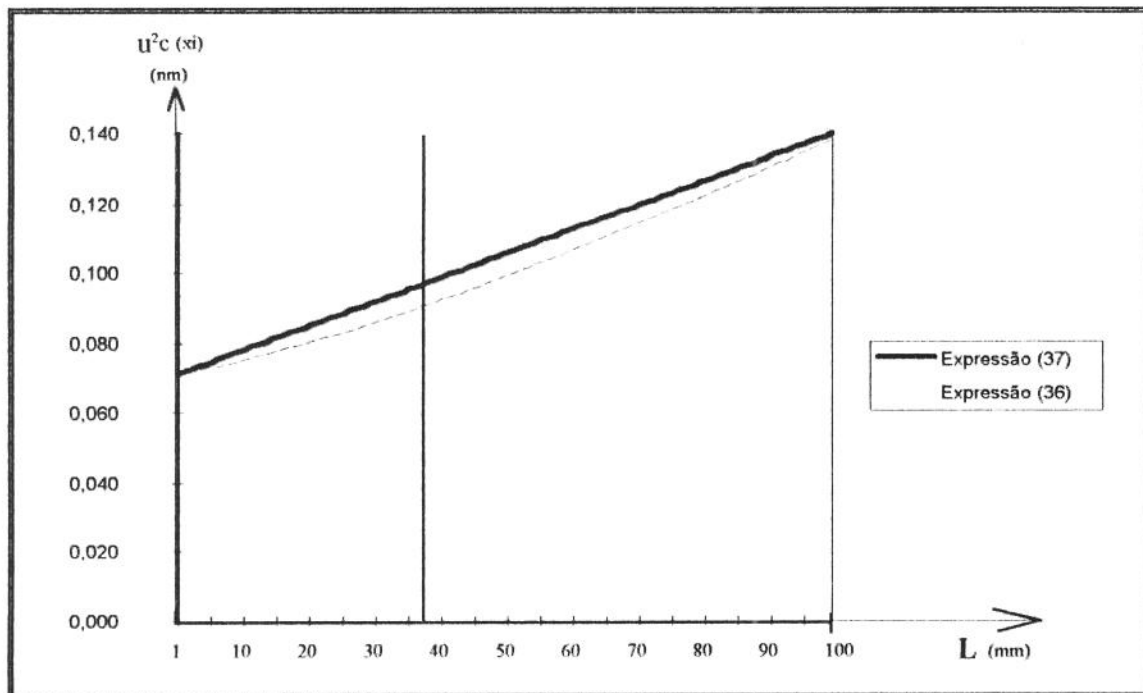


Figura 12.1 - Comparação entre as expressões (36) e (37)

Portanto, a Incerteza Expandida, para um nível de confiança de 95% é:

$$U = 0.0705 (\mu\text{m}) + L / 1443.07 (\mu\text{m}) \quad (38)$$

A recomendação apresentada pelo INMETRO, que é a incerteza atual indicada pelo laboratório para a calibração de blocos padrão, é:

$$U = 0.080 \text{ (}\mu\text{m)} + L / 2000.00 \text{ (}\mu\text{m)}$$

Verifica-se pela tabela 12.1 e figura 12.2 que a diferença entre a incerteza calculada e a incerteza utilizada pelo laboratório, possui um desvio subestimado de 10 (nm) para o bloco de 100 (mm) e um desvio superestimado de 9 (nm) para o bloco de 1 (mm).

Tabela 12.1 - Comparação entre a incerteza calculada e a incerteza utilizada

L (mm)	valor anterior (um)	valor calculado (um)	diferença (um)
1	0.080	0.071	0.009
50	0.105	0.105	0.000
100	0.130	0.140	0.010

Fig.

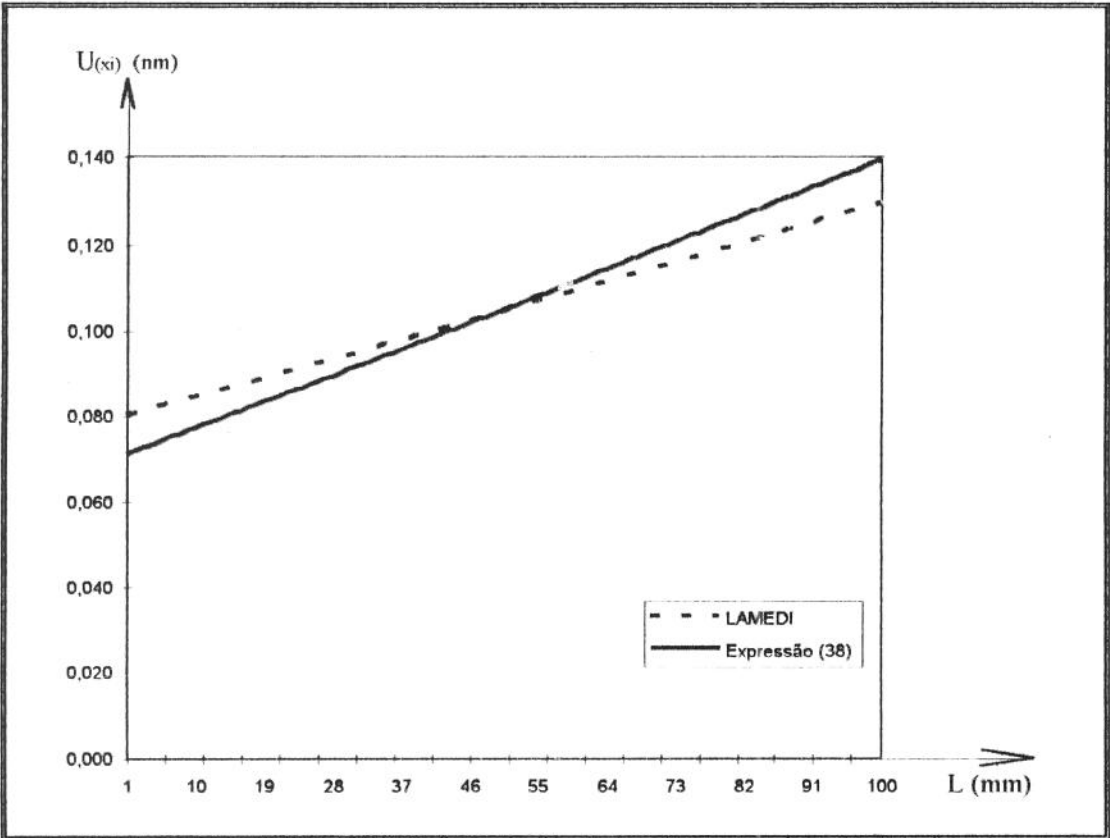


Figura 12.2 - Comparação de incerteza de medição na calibração de blocos padrão

Analisando-se as incertezas, pode-se concluir que, a incerteza atual utilizada pelo laboratório é confiável, uma vez que, apresentou um desvio em relação ao valor real calculado, de aproximadamente 7,5 % para a dimensão de 100 (mm).

Para o cálculo da incerteza de medição, foi atribuído que a variação da temperatura vale $\Delta T = \pm 0.5^{\circ}\text{C}$.

Para se determinar a influência da variação da temperatura na incerteza de medição, baseado nos dados observados em 11.8, foi calculado teoricamente, as incertezas, variando-se hipoteticamente a temperatura do laboratório através da metodologia indicada no item 11.8.1. Para o cálculo foram supostas as seguintes variações de temperatura:

$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$	$\pm 1.0^{\circ}\text{C}$	$\pm 1.5^{\circ}\text{C}$	$\pm 2.0^{\circ}\text{C}$	$\pm 2.5^{\circ}\text{C}$	$\pm 3.0^{\circ}\text{C}$
---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------

A figura 12.3, mostra a comparação das incertezas em função da variação da temperatura.

Pode-se observar que, para um bloco padrão com valor de 1 (mm), o valor da incerteza se mantém inalterado. Para um bloco de 100 (mm), as diferenças de temperatura influenciam o valor da incerteza, conforme mostra a tabela 12.2

Tabela 12.2 - Incerteza de medição em função da variação da temperatura

Temperatura	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$	$\pm 1.0^{\circ}\text{C}$	$\pm 1.5^{\circ}\text{C}$	$\pm 2.0^{\circ}\text{C}$	$\pm 2.5^{\circ}\text{C}$	$\pm 3.0^{\circ}\text{C}$
U(xi) em μm (BP=100mm)	0.140	0.163	0.197	0.236	0.279	0.323
Diferença em μm	0.000	0.024	0.057	0.096	0.139	0.184
Diferença em %	0.0 %	16.4 %	40.7 %	68.6 %	99.3 %	130.7 %

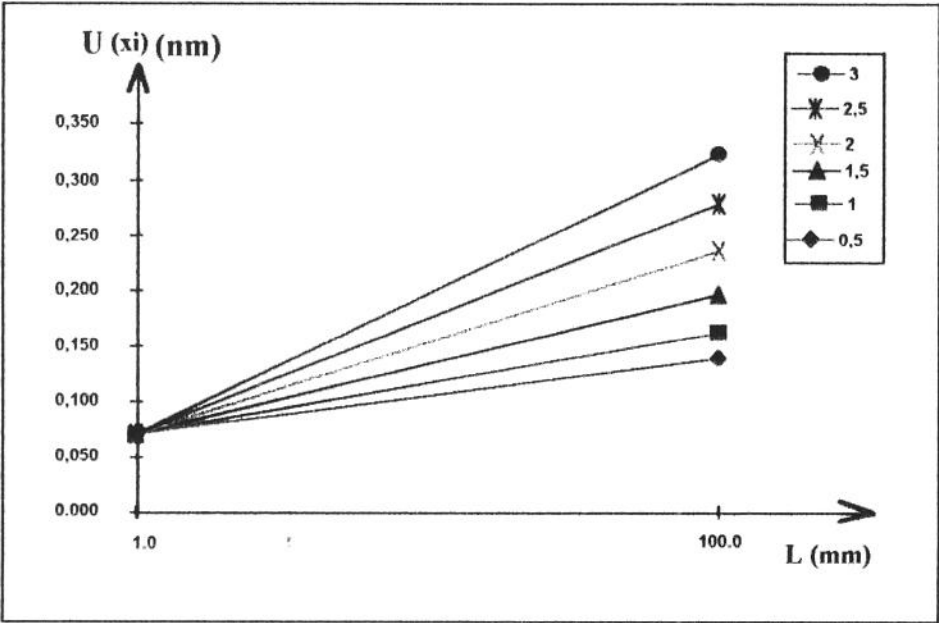


Figura 12.3 - Comparação da incerteza de medição em função da variação da temperatura

Da figura 12.3, percebe-se que a temperatura é um fator de grande importância na calibração de blocos padrão e que deve se manter um rígido controle sobre a variação da mesma. Ou seja, deve-se sempre saber a incerteza de variação da temperatura, para apresentar o resultado final de uma calibração.

De acordo com a análise das variâncias de cada grandeza de influência, conclui-se que as grandezas de maior influência para a incerteza de medição são: a calibração dos blocos padrão de referência e a calibração do sistema de medição. Desprezando-se a repetitividade, as demais grandezas de influência irão alterar a inclinação da curva que representa a incerteza, ou seja, irá alterar a segunda parcela da expressão 43.

Dentre as melhorias para se minimizar a incerteza de medição, pode-se propor:

- Calibrar o sistema de medição através de blocos padrão calibrados por processo de interferometria.
- Calibrar os blocos padrão de referência por processo de interferometria.
- Adquirir um jogo de blocos padrão com classe de exatidão superior ao bloco padrão utilizado como padrão de referência, e calibra-lo por processo de interferometria.

De acordo com as propostas mencionadas, se os blocos padrão de referência utilizados para o cálculo, fossem calibrados por interferometria e estimando-se a incerteza da calibração do bloco de referência $U = 0.02 + 0.3e-06 L$ (mm) (VAUCHER, 1995), a incerteza de medição estimada referente à calibração do bloco padrão seria:

$$U(x_i) = 0.053 + L / 1730.00 \text{ (mm)} \quad (39)$$

A tabela 12.3 apresenta uma comparação entre o resultado apresentado pela expressão (38) e a incerteza recalculada pela expressão (39), e a figura 12.4 ilustra a comparação.

Tabela 12.3 - Comparação entre incertezas

Dimensão dos Blocos padrão	Expressão 38 (nm)	Expressão 39 (nm)	Diferença (nm)
1(mm)	0.071	0.053	0.018
100 (mm)	0.139	0.110	0.029

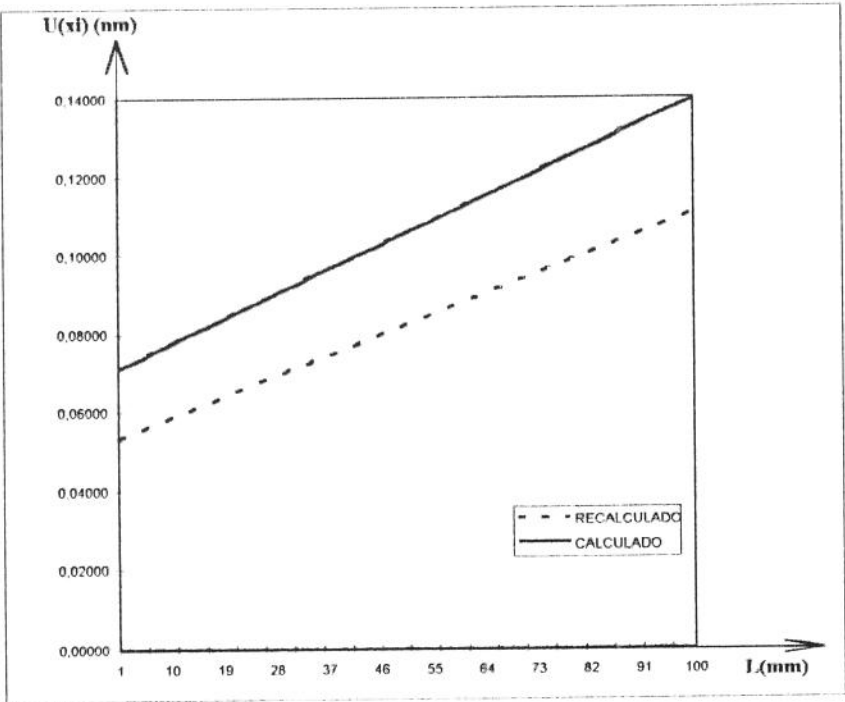


Figura 12.4 - Comparação entre incertezas.

Nota-se da figura 12.4, que através de uma melhoria no processo, obter-se-ia um resultado bem melhor, no que tange à constante inicial (0,053 μm para o recalculado, contra 0,071 μm para o calculado e 0.080 μm recomendado pelo INMETRO). A inclinação da curva mostra uma pequena diferença.

Capítulo 13

Conclusão

13.1 Conclusão

O objetivo do trabalho era o de apresentar os requisitos para aplicação e avaliação de confiabilidade metrológica em laboratório de metrologia e, através destes requisitos, avaliar a comprovação metrológica de um laboratório pertencente à RBC (Rede Brasileira de Calibração) para a calibração de blocos padrão. Neste sentido, foi determinada a incerteza de medição, aplicada à calibração dos blocos padrão, e avaliado o resultado obtido pelo cálculo, com o fornecido pela recomendação do INMETRO.

A proposta inicial do trabalho de confiabilidade metrológica foi alcançada, uma vez que, foi possível avaliar a eficiência do laboratório, para produzir resultados confiáveis na calibração de blocos padrão.

Pela análise dos resultados conclui-se que, a incerteza atual utilizada pelo laboratório recomendada pelo INMETRO, é confiável, uma vez que, apresentou um desvio em relação ao valor real calculado, de aproximadamente 7.5%, para a dimensão de 100 (mm).

Apesar da confiabilidade, na incerteza de medição, percebeu-se que esta poderia ser minimizada, na ordem de 20 (nm), se os blocos padrão de referência fossem calibrados por interferometria.

De acordo com a análise das variâncias de cada grandeza de influência, conclui-se que, as grandezas de maior influência para a incerteza de medição são: a calibração dos blocos padrão de referência e a calibração do sistema de medição. Estas grandezas de influência podem ser minimizadas se: o sistema de medição for calibrado através de blocos padrão calibrados por processo de interferometria; os blocos padrão de referência forem calibrados por processo de interferometria; os blocos padrão de referência tiverem classe de exatidão superior.

Observou-se também que a temperatura deve se manter rigidamente controlada, uma vez que a variação da mesma afeta sobremaneira o resultado final da calibração.

13.2 Proposta de Trabalhos Futuros

- Determinação da deformação, provocada pela força de medição do apalpador na calibração de blocos padrão de diferentes tipos de materiais.
- Comparação entre as incertezas de medições na calibração de blocos padrão pelos métodos interferométrico e diferencial.
- Determinar parâmetros para estabelecimento e ajuste de intervalos de calibração.

Referências Bibliográficas

ADAMS, L.F. , Engineering Measurements and Instrumentation, London, The English Universities Press Ltd., 1975.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS, Rio de Janeiro. ABNT ISO IEC GUIA 58; Sistemas de credenciamento de laboratórios de calibração e ensaios - requisitos gerais para operação e reconhecimento. Rio de Janeiro, 1993. 7p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR ISO 10012-1; Requisitos de Garantia da Qualidade para Equipamentos de Medição. Rio de Janeiro, nov. 1993. 14p.

BARNEY, GEORGE C. , Intelligent Instrumentation, 2 ed., London, Prentice Hall International (UK) Ltd., 1988.

BECKWITH, THOMAS G., Mechanical measurements, 3 ed., Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1982.

BEERS, JOHN S. , TAYLOR, JAMES E. , Contact deformation in gage block comparisons, NBS Technical Note 962, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1995, 30p.

COUTO, PAULO R.G., Incerteza de medição, Rio de Janeiro. Revista INMETRO, V2, n1, p.19-20, jan/mar 1993.

DEUTSCHES INSTITUT FUER NORMUNG. DIN 1319; Basic concepts in metrology, part 3, january 1977, 14p.

- DOEBELIN, ERNEST O. Measurement systems, 3 ed.: McGraw-Hill, Inc, 1983.
- DRNAS, THOMAS M. Methods of Estimating Reliability, Industrial Quality Control, p118-122, september 1966.
- GONÇALVES, A.A.Jr., Técnicas de Medição, Instrumentação e Padrões Aplicados à Metrologia Dimensional, UFSC, Florianópolis, SC, 1993,70p.
- HOLMAN J.P., Métodos Experimentales para Ingenieros. McGraw-Hill de México, 1977,447p.
- INMETRO, Critérios gerais para credenciamento de Laboratórios de calibração e de ensaios. Rio de Janeiro: INMETRO, 1993. 24p.
- INMETRO, Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia. Rio de Janeiro: INMETRO, 1995, 52p.
- INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE - IPQ. Guia para expressão da incerteza de medição nos laboratórios de calibração. Lisboa: Ministério da Industria e Energia, maio 1993, 8p.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO GUIDE 25; General requirements for the competence of calibration and testing laboratories, 3 ed.. Geneve, 1990. 7p.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO TAG 4/WG; Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Switzerland, 1993. 111p.
- JURAN, J.M., FRANK M. GRZYNA , Controle de Qualidade. São paulo: Makron Books do Brasil, 1992, vol.4 , 225p.
- KOTTAUS, HUGO. Técnicas da Produção Industrial , Medição e Controle. São Paulo: Editora Polígono S.A., 1971, vol.6, 151p.
- LEAL, JAHYR. Tabelas numéricas e Estatísticas. Rio de Janeiro: Livro Técnico S.A., 1971, 151p.

MIODUSKI, ALFONS LEOPOLD. Elementos e técnicas Modernas de Medição Analógica e Digital. Rio de Janeiro: Guanabara Dois S.A., 1982.

MORETTIN, L. GONZAGA. Estatística Básica - Probabilidade. São Paulo: McGraw-Hill, 1990, 185p.

NORME EUROPÉENNE, EN45001, Critères généraux concernant le fonctionnement de laboratoires d'essais, mai 1990, 15p.

OLIVEIRA, J.C. VALENTE, Confiabilidade Metrológica. Rio de Janeiro: Revista INMETRO, vol 2, n 1, p15, jan/mar 1993.

PARADINE, C.G. , RIVETT, B.H.P. Statistical methods for tecnologists. London: The English Universities Press Ltd. ,1974, 350p.

REDE DE TECNOLOGIA DO RIO DE JANEIRO - RTRJ. Manual de Qualidade para Laboratório, Rio de Janeiro: INMETRO, 1991, 29p.

RESNICK R. , HALLIDAY D. Física, Rio de Janeiro: LTC - Livros técnicos e científicos, 1984, 309p.

VAUCHER, B.G. , THALMANN R., BAECHLER H. European comparison of short gauge block measurement by interferometry. Metrologia, v.32, p.79-86, 1995.

VUOLO, J. HENRIQUE Fundamentos da Teoria de Erros. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1992, 225p.

WAENY, J.C.CASTRO Procedimentos e Padrões Internos para Sistema Dinâmico de Confiabilidade Metrológica. São Paulo: Instituto De Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. , publicação IPT n.1117, 1978, 17p.

WOODS, W. MAX, ZEHNA, PETER W. Cumulative Effect of Calibration Errors. Industrial Quality Control, p.411-412, february 1966.

Bibliografia Adicional

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS, Rio de Janeiro. ABNT ISO IEC GUIA 43; Desenvolvimento e operação de ensaios de proficiência de laboratórios. Rio de Janeiro, 1993. 5p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR ISO 8402; Sistemas de Gestão de qualidade e garantia da qualidade - terminologia . Rio de Janeiro, 1994. 15p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR ISO 9003; Sistema da qualidade - Modelo para garantia da qualidade em inspeção e ensaios finais. Rio de Janeiro, Dez. 1994. 7p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR ISO 9004-1; Gestão da qualidade e elementos de sistema da qualidade - diretrizes. Rio de Janeiro, Dez. 1994. 23p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR ISO 9004-4; Gestão da qualidade e elementos de sistema da qualidade - diretrizes para melhoria da qualidade. Rio de Janeiro, Nov. 1993. 23p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR ISO 10011-1; Diretrizes para auditoria de sistema da qualidade parte 1. Rio de Janeiro, Julho, 1993. 7p.
- GODFREY, JAMES. Air Force Metrology & Calibration Policy on Part Number Calibration Interval analysis By Exponential Probability Distribution, Aerospace Guidance and Metrology Center, jun 1984. 7p.
- INMETRO - Sistema Internacional de Unidades SI. Duque de Caxias: INMETRO, 1991, 91p.

TAMS, Technical Requirements for calibration Interval Establishment for Test and Monitoring Systems, Navy Metrology Engineering Center, California: jan.1986, 35p.

WAENY, J.C.C. Recomendações para expressão numérica de resultados. São Paulo: IPT, publicação n.3, nov.1979, 12p.

WAENY, J.C.C. Repetitividade e Reprodutividade. São Paulo: IPT, publicação n.5, abr.1980, 18p.

WAENY, J.C.C. Programas Interlaboratoriais - Introdução à Metodologia e análise dos Resultados. São Paulo: IPT, publicação 1140, 1980, 24p.