Cálculo da incerteza na calibração de instrumentos de medição

EFACEC -Empresa Fabril de Máquinas Eléctricas, S.A.

Maria José Giesteira Pereira

Estágio curricular
5º ano Gestão e Eng.Industrial - F.E.U.P.



621/047.3) DEMEG1/GE1531996/PERm
Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia
Biblioteca
Nº 68055
CDU 621(047.3)
Data 4/8/2003

Agradecimentos

Gostaria de realçar que este trabalho só foi possível graças à colaboração de algumas pessoas que directa ou indirectamente estiveram envolvidas.
Assim, e como sem matéria prima não se fazem obras, tenho a agradecer ao Sr. Eng. Carlos Sousa toda a documentação facultada bem como a sua preciosa disponibilidade para esclarecedoras discussões.
Também estou grata às pessoas do Gabinete de Metrologia da EFACEC, particularmente ao Sr. Carvalho, que simulando as calibrações, permitiu toda a recolha de dados indispensáveis aos procedimentos práticos.
Tenho ainda de reconhecer a importância que o Sr. Eng. Sarsfield Cabral teve, não só no acompanhamento e esclarecimento de questões técnicas, mas sobretudo no encorajamento e compreensão demonstrados.

Documento:	Relatório de estágio curricular.
Assunto principal:	Incertezas na calibração.
Responsável:	Maria José Giesteira Pereira. Aluna do 5°ano do Curso de Gestão e Engenharia Industrial da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
Local de Realização:	EFACEC, Empresa Fabril de Máquinas Eléctricas, S.A. Direcção de Construções Mecânicas.
Orientador na empresa:	Eng. Paulo Viegas.
Orientador na faculdade:	Eng. José Sarsfield Cabral.
Data de ínicio:	1-Março-1996.
Data de conclusão:	30-Setembro-1996.
Duração:	6 meses

INDÍCE

Página

OBJECTIVO v

I - APRESENTAÇÃO 1

1 - O Grupo EFACEC 2

2 - A EFACEC Energia 4

3 - A Direcção de Construções Mecânicas 5
3.1 - Sectores 5
3.2 - Documentos 7

4 - O Sector da Qualidade 8
4.1 - Política da Qualidade 8
4.2 - Responsáveis pela Política da Qualidade 8
4.3 - Documentos do Programa da Qualidade 9
4.4 - Funções do Sector da Qualidade 10

5 - O Gabinete de Metrologia 11
5.1 - Localização 11
5.2 - Funções 11
5.3 - Documentos 12
5.4 - Gestão dos equipamentos de inspecção, medição e ensaio 13
5.4.1 - Base de dados 14
5.4.2 - Classificação dos equipamentos 14
5.4.3 - Aquisição 14
5.4.4 - Gestão das existências em stock 15
5.4.5 - Saídas e entradas para medição 15
5.4.6 - Calibração 16
a) Condições do meio ambiente 17
b) Periodicidade 17
c) Padrões 18
d) Incertezas 19

BIBLIOGRAFIA 20

Apêndice I-1
Apêndice I-2
Apêndice I-3

II - INCERTEZA 21

1 - Introdução 22
1.1 - O que é a incerteza 22
1.2 - O porquê da incerteza

2 - Tolerância vs incerteza 24
2.1 - Resultado de Medição 24
2.2 - "Valor Verdadeiro" 25
2.3 - Erros 26
2.4 - Incerteza 27
2.5 - Tolerância 29
2.6 - Incerteza *vs* Tolerância 29

3 - Avaliação da incerteza 34
3.1 - Modelo matemático 34
3.2 - Estimativas de entrada e de saída 34
3.3 - Incerteza padrão 35
3.3.1 - Conceito 35
3.3.2 - Métodos para avaliar Incertezas de medição de grandezas de entrada 35
3.3.2.1 - Avaliação de tipo A da incerteza padrão 36
3.3.2.2 - Avaliação de tipo B da incerteza padrão 38
3.4 - Incerteza padrão combinada 40
3.4.1 - Conceito 40
3.4.2 - Coeficientes de sensibilidade 41
3.4.3 - Lei da Propagação da incerteza 41
3.4.4 - Simplificações 42
3.4.5 - Forma de apresentação 43
3.5 - Incerteza expandida 44
3.5.1 - Conceito 44
3.5.2 - Escolha de um factor de expansão (k) 44

4 - Expressão da incerteza 47
4.1 - Em documentos auxiliares 47
4.2 - Em certificados de calibração 47

BIBLIOGRAFIA 50

Apêndice II-1
Apêndice II-2
Apêndice II-3
Apêndice II-4

III - INCERTEZAS EM C.M.G.Q. 51

1 - Decisões tomadas em c.m.g.q. 52
(na avaliação e interpretação da incerteza nas calibrações)
1.1 - Fontes de incerteza 52
1.2 - Número de observações 57
1.3 - Nível de confiança e Factor de expansão 58
a) Nível de confiança 58
b) Factor de expansão (k) 58
c) Determinação de k a partir de G.L.efectivos 59
1.4 - Declaração de Conformidade ou Não Conformidade 61

2 - Procedimentos de cálculo da incerteza 65
2.1 - Elaboração dos procedimentos 65
2.2 - Exemplo: Calibres de Tampão Liso 66

BIBLIOGRAFIA 74

Apêndice III-1
Apêndice III-2
Apêndice III-3
Apêndice III-4
Apêndice III-5

BALANÇO E CONCLUSÃO

ANEXOS - Documentos criados

A - Procedimentos que deram origem a Instruções Operacionais para o cálculo da incerteza nas calibrações.

CMGQ 48101 - Cavilhas para medir roscas.
CMGQ 48102 - Calibres de tampão liso.(incluído no cap.III)
CMGQ 48103 - Calibres de tampão roscado e Calibres padrão de tampão roscado.
CMGQ 48104 - Calibres de roscado interior.
CMGQ 48105 - Paquímetros.
CMGQ 48106 - Réguas, Escalas e Fitas métricas.
CMGQ 48107 - Medidores de Interiores e de Espessuras.
CMGQ 48108 - Micrómetros.
CMGQ 48109 - Comparadores e Comparadores de alavanca.

B - Procedimentos que deram origem a Instruções operacionais para uso prático no cálculo da incerteza nas calibrações.

Objectivo

O presente estudo insere-se no âmbito do estágio curricular do segundo semestre do 5° ano da Licenciatura em Gestão e Engenharia Industrial.

Pretende-se por um lado que o estagiário se valorize com a experiência adquirida, e por outro, que a empresa onde este foi inserido lucre também com os conhecimentos e o trabalho realizado pelo mesmo.

Neste caso a empresa é a EFACEC, Empresa Fabril de Máquinas Eléctricas, S.A. tendo sido o estágio proporcionado pela Direcção de Construções Mecânicas, actualmente certificada segundo as normas NP EN ISO 9002.

O estudo feito vem responder às necessidades geradas pelo alargamento do âmbito do Programa da Qualidade, de modo a permitir certificar o Sistema da Qualidade de acordo com as normas NP EN ISO 9001.

Nesse sentido e também para colmatar uma lacuna já anteriormente referida pelos auditores, este trabalho terá como objectivo primordial a **análise, adaptação e cálculo das incertezas de calibração** dos instrumentos de medição pertencentes ao laboratório de Metrologia e Calibração desta Direcção.

I

Apresentação

Nesta apresentação será dada uma visão global do funcionamento do Gabinete de Metrologia e Calibração da Direcção de Construções Mecânicas, local onde foi realizado e onde será aplicado o estudo feito.
Antes disso, e para que se tenha uma ideia do seu enquadramento na empresa, procurar-se-à "descer" gradualmente na estrutura organizacional da mesma aproveitando para referir alguns aspectos mais relevantes.

1 - O GRUPO EFACEC

O Grupo EFACEC nasceu na área metropolitana do Porto a partir de uma empresa fundada em 1948, com maioria de capital de uma multinacional belga de electrotecnia. Durante quatro décadas dedicou-se ao fabrico de equipamenos de produção e distribuição de energia eléctrica quase exclusivamente para o mercado interno. Em 1987 deu-se a saída do accionista belga o que levou a uma profunda renovação da estrutura industrial e da gestão dos negócios. Surgiu então um Grupo constituido por empresas autónomas e desenvolveu-se paralelamente um processo de internacionalização dos respectivos negócios.

O Grupo é assim composto por um conjunto de 26 sociedades, 23 das quais a EFACEC (Empresa Fabril de Máquinas Eléctricas, S.A.) participa em mais de 50% do capital .

As empresas do Grupo EFACEC inserem-se no sector dos bens de equipamento e as suas actividades abrangem :

- Transformadores de média e alta tensão
- Aparelhagem de média e alta tensão
- Electrónica industrial
- Telecomunicações
- Automação e robótica
- Motores eléctricos
- Bombas hidráulicas
- Ambiente

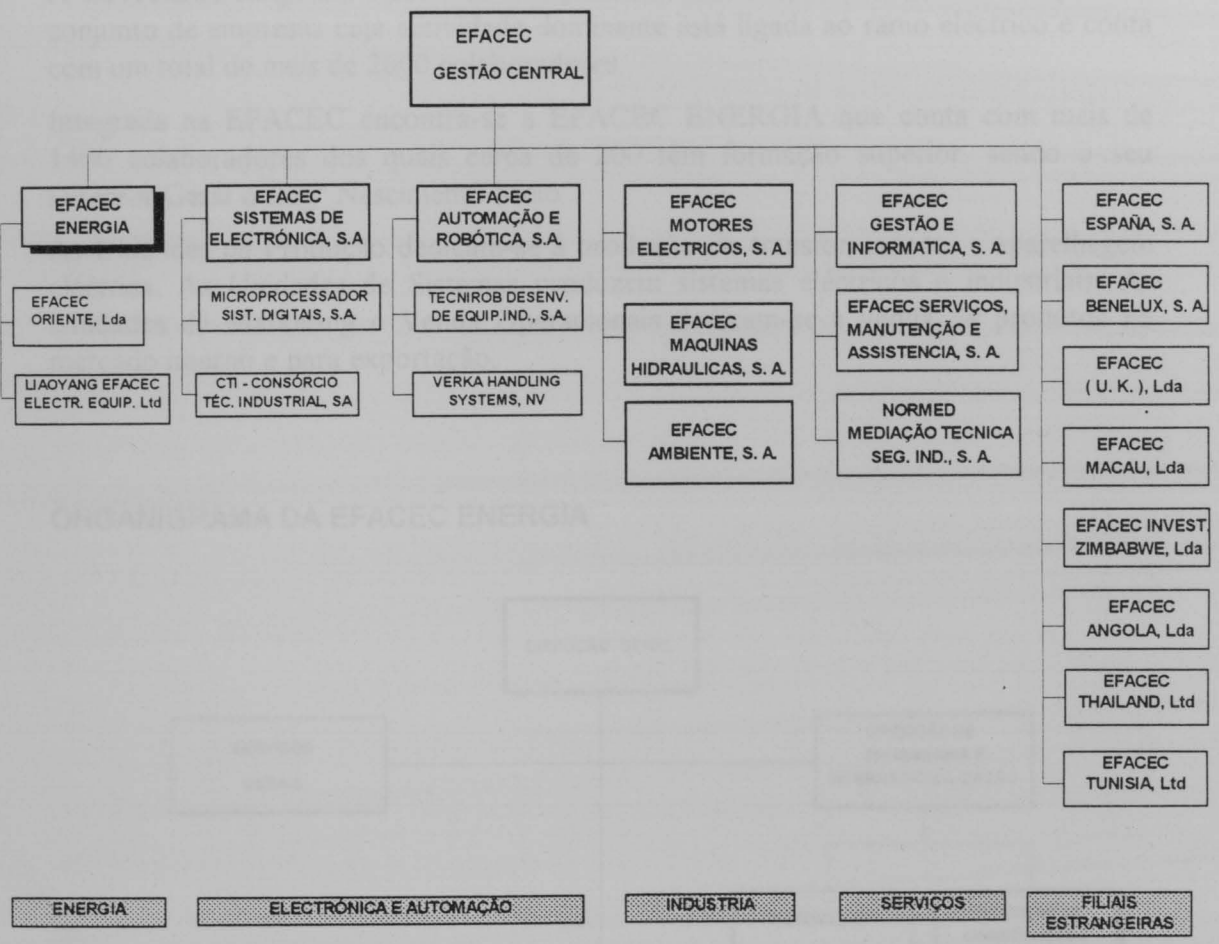
Além das actividades do sector industrial, o Grupo possui igualmente equipas de engenharia especializadas no projecto, aprovisionamento, montagem e ensaio de sistemas de energia e industriais, e ainda na produção de software de gestão, de automação industrial e de telecomunicações.

Apesar da situação geral desfavorável no sector, o Grupo aumentou sensivelmente o volume de negócios no mercado interno, por via de um crescimento considerável de encomendas nas áreas dos Sistemas de Electrónica, Ambiente e Automação e Robótica.

O Grupo continuou a desenvolver fortemente a sua implantação nos mercados internacionais, através de um investimento técnico-comercial significativo em zonas geográficas prioritárias.

O conselho de administração é presidido pelo Engº Sabino Marques tendo-se criado uma comissão executiva para coordenação e gestão corrente do grupo.Esta comissão é formada por: Eng. Fernando Pinto Oliveira, Eng. José Duarte Vieira e Prof. Manuel de Oliveira Marques.

ORGANIGRAMA DO GRUPO EFACEC



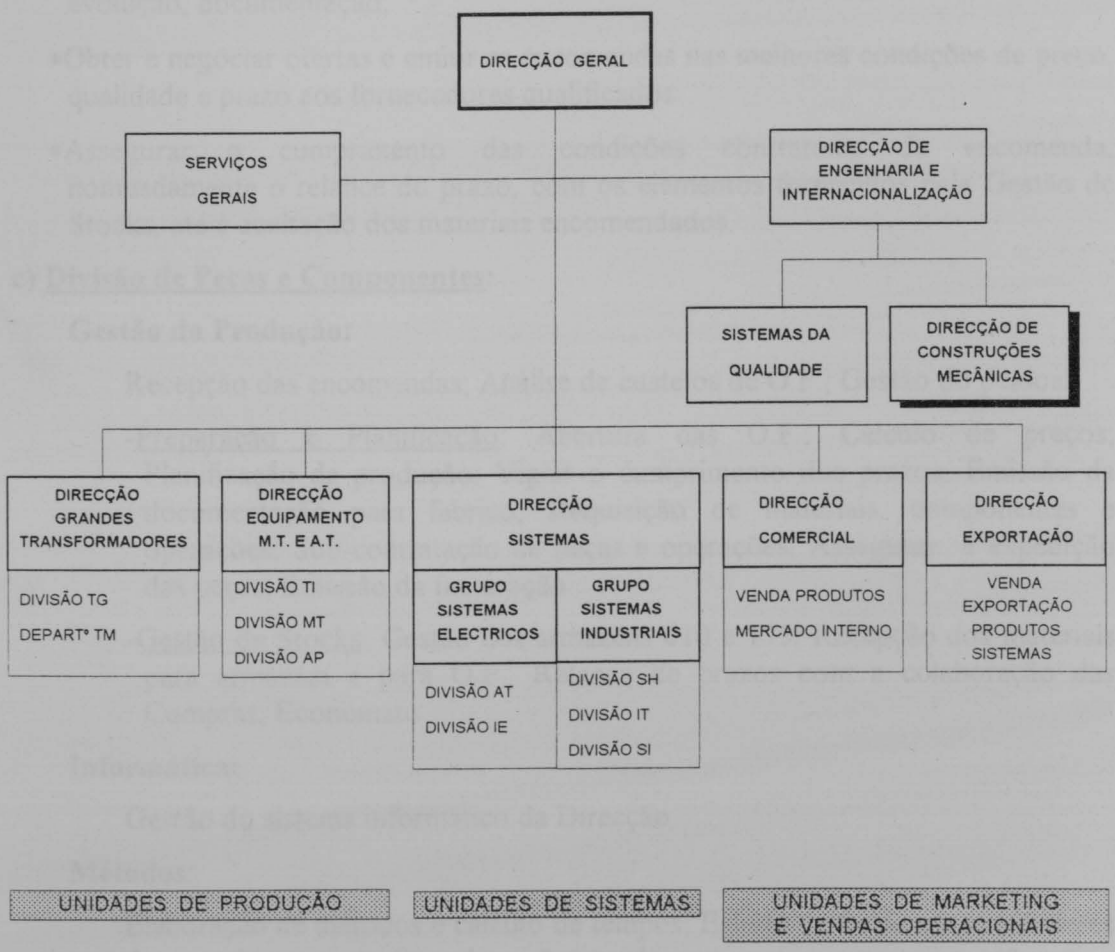
2 - A EFACEC ENERGIA

A **EFACEC, Empresa Fabril de Máquinas Eléctricas, S.A.** é constituída por um conjunto de empresas cuja actividade dominante está ligada ao ramo eléctrico e conta com um total de mais de 2600 colaboradores.

Integrada na EFACEC encontra-se a EFACEC ENERGIA que conta com mais de 1400 colaboradores dos quais cerca de 200 têm formação superior, sendo o seu Director Geral o Engº Nascimento Melo.

As Unidades de Produção dedicam-se à produção de transformadores e aparelhagem eléctrica. As Unidades de Sistemas produzem sistemas eléctricos e industriais. As Unidades de Marketing e Venda Operacionais dedicam-se à venda de produtos no mercado interno e para exportação.

ORGANIGRAMA DA EFACEC ENERGIA



3 - A DIRECÇÃO DE CONSTRUÇÕES MECÂNICAS

A Direcção de Construções Mecânicas tem um efectivo de 102 pessoas, incluindo 5 engenheiros.

O Director de Construções Mecânicas e Chefe da Divisão de Peças e Componentes é o Engº Pinheiro Vieira.

3.1- Sectores:

Esta Direcção é composta por vários sectores com as seguintes funções:

a) Qualidade:

(desenvolvimento das funções no ponto 4.4)

b) Compras:

- Conhecimento do mercado fornecedor: prospecção, inventário, concorrência, evolução, documentação.
- Obter e negociar ofertas e emitir as encomendas nas melhores condições de preço, qualidade e prazo aos fornecedores qualificados
- Assegurar o cumprimento das condições contratuais da encomenda, nomeadamente o relance do prazo, com os elementos fornecidos pela Gestão de Stocks, até à aceitação dos materiais encomendados.

c) Divisão de Peças e Componentes:

Gestão da Produção:

Recepção das encomendas; Análise de custeios de O.F.; Gestão do pessoal

-Preparação e Planificação: Abertura das O.F.; Cálculo de preços; Planificação da produção; Vigiar o cumprimento dos prazos; Emissão da documentação para fabrico; Requisição de materiais, componentes e operações; Sub-contratação de peças e operações; Assegurar a expedição das peças; Emissão da facturação

-Gestão de Stocks: Gestão dos armazéns 010 e 175; Recepção dos materiais para armazém e para O.F.; Relance de prazos com a colaboração das Compras; Economato

Informática:

Gestão do sistema informático da Direcção

Métodos:

Elaboração de métodos e cálculo de tempos; Estudo de ferramentas auxiliares de maquinagem; Análise de cadernos de encargos e outras especificações; Gestão e arquivo de documentações (desenhos e modos operatórios)

- Ferramentas de Corte: Estudo e análise de aquisição de ferramentas de corte; Gestão de ferramentas.

Fabrico:

Fabrico dos produtos encomendados; Gestão dos meios técnicos e dos recursos humanos; Assegurar a manutenção dos meios técnicos de produção.

d) Departamento de Construção e Reparação de Máquinas:

Projecto, construção e reparação de máquinas.

Assistência após venda.

e) Departamento de Manutenção Geral - Sector Mecânico:

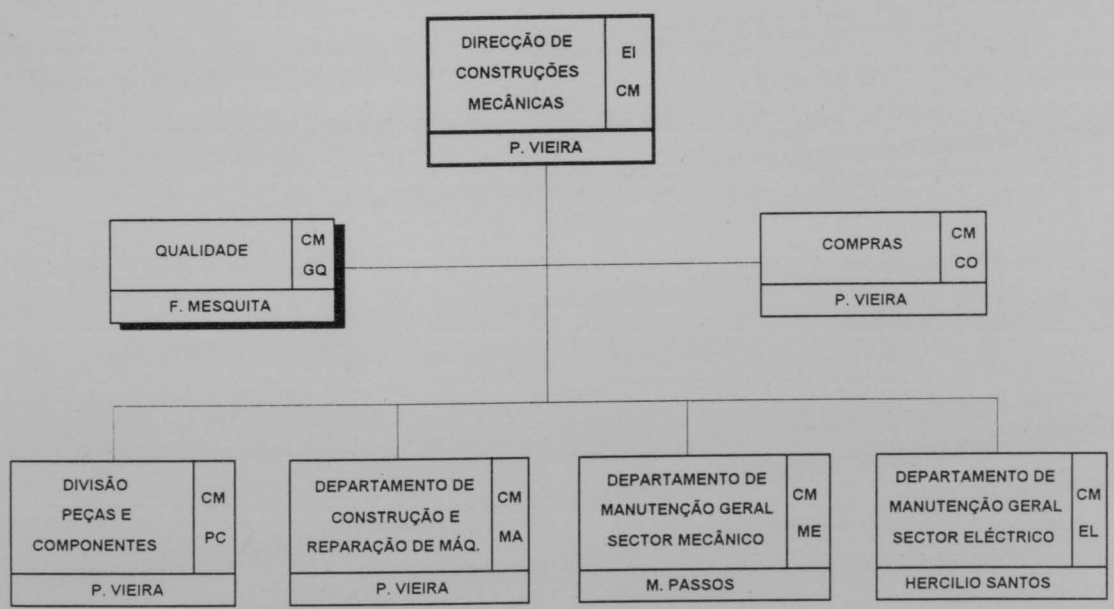
Manutenção preventiva e correctiva das máquinas e equipamentos no que diz respeito aos componentes mecânicos.

f) Departamento de Manutenção Geral - Sector Eléctrico:

Manutenção preventiva e correctiva das máquinas e equipamentos no que diz respeito aos componentes eléctricos.

As funções Comercial e de Marketing são da responsabilidade do Director de Construções Mecânicas.

ORGANIGRAMA DA DIRECÇÃO DE CONSTRUÇÕES MECÂNICAS



3.2 - Documentos:

- Alimentação da Existência do Armazém
- ACS: Alteração dos custos contabilisticos standards
- Encomenda ao exterior
- EIG: Encomenda interna geral
- Ficha de acompanhamento
- Ficha de defeito
- VT: Vale de trabalho (Ficha de mão-de-obra)
- Ficha de peça acabada
- Ficha de custos de produtos e peças standards
- M.O: Modo operatório (Folha de operações)
- GA: Guia de Acompanhamento
- Guia de devolução
- Guia de transporte
- IPM: Inventário permanente de materiais
- Pedido de transporte
- REC: Requisição ao economato
- RM: Requisição de matérias primas e componentes (pedido a Compras)
- VM: Vale de materiais

4 - O SECTOR DA QUALIDADE

Antes de se abordar especificamente este sector, vai-se tentar posicioná-lo dentro da **função Qualidade.**

4.1 - Política da Qualidade:

A política iniciada em 1986 para satisfazer numa primeira fase as normas ISO 9002, CAN3-Z229.2 e NP EN 29002 permitiu em 1987 a certificação do Sistema da Qualidade por parte do IPQ.

O funcionamento do Sistema tem vindo a ser regularmente auditado por duas entidades exteriores: Instituto Português da Qualidade e Lloyd's Register.

Em 1994 foi decidido alargar o âmbito do Programa da Qualidade de modo a permitir certificar o Sistema da Qualidade de acordo com a norma NP EN ISO 9001.

Assim se definiu como actual política:

- O estabelecimento de um **Programa da Qualidade** baseado nos requisitos das normas **NP EN ISO 9001** e que privilegie duas acções:

  -O acompanhamento da execução de contratos cliente;

  -A aprovação da qualidade de novas peças e máquinas.

- A existência de um **Manual da Qualidade**.
- A emissão e actualização de **Planos de Inspecção e Ensaio** para cada tipo de máquinas.
- O acompanhamento do Programa da Qualidade pelo **Departamento de Sistemas da Qualidade** que tem a independência, a competência e a autoridade necessárias para conduzir auditorias da qualidade.

4.2 - Responsáveis pela Política da Qualidade:

a) Departamento de Sistemas da Qualidade

É independente da Direcção de Construções Mecânicas já que está integrado na Direcção de Engenharia e Internacionalização. Compete-lhe:

-Verificar a aplicação do Programa da Qualidade;

-Evidenciar o Sistema da Qualidade, quando solicitado por um cliente;

-Informar o Director Geral sobre o funcionamento do Programa da Qualidade.

b) Sectores da Direcção de Construções Mecânicas

Todos estes sectores são responsáveis pela aplicação e pelo aperfeiçoamento do Programa da Qualidade de acordo com a particularização de responsabilidades definida em cada Procedimento.

Naturalmente o **Sector da Qualidade** terá uma responsabilidade acrescida e funções especificas tal como será visto posteriormente.

O Director de Construções Mecânicas e o Chefe do Departamento Sistemas de Qualidade reunem, pelo menos semestralmente, com o objectivo de analisar a aplicação e evolução do Programa da Qualidade. Nestas reuniões, das quais se mantém o registo, são tratadas essencialmente as seguintes questões:

- Organização
- Procedimentos
- Auditorias
- Não conformidades
- Reclamações
- Custos da Qualidade

4.3 - Documentos do Programa da Qualidade:

a) Manual da Qualidade:

Este documento descreve o Sistema da Qualidade aplicado, ou seja, a política e organização da Qualidade bem como os procedimentos que a permitem pôr em práctica.

Estes procedimentos (em número de 20) definem a organização, as responsabilidades, as acções e os documentos aplicados às funções do Sistema da Qualidade.

O Manual da Qualidade é emitido, distribuído e actualizado pelo Sector da Qualidade da Direcção, com directivas e após aprovação do Director de Construções Mecânicas, em consonância com as orientações do Departamento de Sistemas da Qualidade.

b) Planos de Inspecção e Ensaio:

Estes documentos descrevem o controlo e inspecções de rotina que são realizados desde os aprovisionamentos até à entrada em serviço das máquinas, referindo ainda as Instruções Operacionais aplicadas.

São emitidos, distribuídos e actualizados pelo Sector de Qualidade da Direcção com a colaboração do Fabrico.

c) **Instruções Operacionais:**

Estas instruções completam e particularizam a aplicação dos Procedimentos do Manual a cada situação e definem completamente as acções e responsabilidades em cada aplicação.

São emitidas, distribuidas e actualizadas pelos respectivos chefes do Sector em que se aplicam, com a aprovação do Director.

Estas Instruções Operacionais são confidenciais e para uso exclusivamente interno. Podem contudo ser consultadas na EFACEC pelo cliente ou seu representante.

4.4 - Funções do Sector da Qualidade

- Gestão do Sistema da Qualidade da Direcção conjuntamente com o Director (nomeadamente emissão e actualização do Manual da Qualidade) e em colaboração com o Departamento Sistemas da Qualidade da Direcção Engenharia e Internacionalização.
- Vigiar os sub-fornecedores: inspecções, auditorias e acompanhamento dos programas de Garantia da Qualidade.
- Estabelecimento e actualização dos documentos:
  - Planos de Inspecção e Ensaio
  - Instruções Operacionais de controle
  - Plano Anual de Calibração
  - Plano Anual de Controle de Aparelhos
  - Plano Anual de Auditorias a Sub-Fornecedores
- Definição de ferramentas de controle, em colaboração com os Métodos e Fabrico.
- Realização da inspecção de recepção de peças e materiais, inspecção volante em curso de produção e inspecção final das máquinas.
- Gestão dos instrumentos de verificação, medida e ensaio.

Esta última função será vista mais detalhadamente na secção seguinte onde se apresentará o ***Gabinete de Metrologia e Calibração*** *pertencente ao Sector da Qualidade.*

5 - O GABINETE DE METROLOGIA E CALIBRAÇÃO

De seguida serão abordados os aspectos mais relevantes do funcionamento deste Gabinete. Tentar-se-á não só relatar a situação real como também comentá-la à luz de normas ou outra bibliografia apropriada. Por uma questão de simplicidade os aspectos positivos serão assinalados por ☑ e os negativos por ☒.

5.1 - Localização

O Gabinete de Metrologia e Calibração situa-se fisicamente na Oficina de Fabricação da Direcção de Construções Mecânicas e conta para além do chefe da Garantia da Qualidade, com três colaboradores, dois dos quais executam a calibração dos instrumentos.

☒ Tal como será visto no ponto 5.4.6.a) esta localização é propícia à ocorrência de vibrações que prejudicam as medições.

☑ Por outro lado facilita as requisições de instrumentos por parte do pessoal da oficina podendo-lhes ser prestada qualquer assistência.

5.2 - Funções

- Assegurar que as condições ambientais são as adequadas às medições a realizar.
- Identificar as medições a fazer e seleccionar o equipamento mais adequado tendo em conta o fim a que se destina.
- Assegurar que o manuseamento, conservação e armazenamento dos equipamentos de inspecção, medição e ensaio são efectuados de forma a manter a precisão e adequação ao uso.
- Estabelecer regras de verificação periódica dos diferentes equipamentos de inspecção, medição e ensaio utilizados na produção, laboratórios, assistência a clientes e manutenção geral.
- Realização das calibrações periódicas previstas ou em alguns casos enviar os instrumentos à entidade calibradora respectiva.
- Estabelecer e actualizar todos os documentos relativos à gestão dos equipamentos.
- Registo na base de dados informática de todos os movimentos originados por novas aquisições, calibrações, entradas e saídas para medições ou eliminação por falta de conformidade.

☑ A experiência e empenho das pessoas envolvidas tem levado ao cumprimento eficaz destas funções, ultrapassando a falta de alguns meios técnicos, a escassez de tempo e informação.

5.3 - Documentos

No apêndice I-1 podem ser vistos os vários tipos de documentos, a apresentar:

a) Plano Anual de Calibração (P.A.C.)

Documento emitido anualmente e no qual são inventariados todos os aparelhos de medição e ensaio a calibrar em cada mês.

Comporta as seguintes indicações:

Mês / Nº de registo do aparelho na EFACEC / Designação do aparelho / Exactidão / Localização / Instrução Operacional aplicável na calibração / Data em que ocorreu a calibração e rubrica do responsável que a efectuou.

Após a realização das calibrações, o P.A.C. é datado e rubricado.

O resultado de calibração "não conforme" implica que se carimbe " *Não conformidade* " no respectivo local do P.A.C. e esse aparelho já não será incluido no P.A.C. do ano seguinte.

Por sua vez qualquer aquisição de um equipamento de inspecção, medição e ensaio leva também à actualização do P.A.C.

Há no entanto aparelhos que não são mencionados no P.A.C. , como é o caso dos que não requerem calibração e dos que requerem calibração antes de cada utilização.

b) Folha de cadastro.

Folha indicando para cada aparelho todas as suas características e todo o seu "percurso" em termos de calibrações.

Contém por isso as seguintes informações:

Nº de registo na EFACEC / Designação / Referências do fabricante / Características / Limites de rejeição / Periodicidade de calibração / Instrução Operacional / Localização / Registo de todas as calibrações efectuadas (com datas, rubrica do controlador e resultado).

c) Certificado de calibração.

Folha emitida aquando da realização de uma calibração de um aparelho de medição.

Nela constam:

- Identificação e características do aparelho a calibrar e dos aparelhos padrão/ Condições ambientais / Data da calibração / Resultados obtidos / Rubrica do controlador e conclusão da calibração: "Conforme" ou "Não-Conforme".

No caso das calibrações externas a entidade calibradora é obrigada a fazer acompanhar o instrumento calibrado do respectivo certificado de calibração que é de uma maneira geral não conclusivo.

d) Instruções operacionais de calibração (I.O. de calibração)

Resultam de apanhados de normas referentes ao caso particular do aparelho a calibrar ou no caso de não existirem normas, são o resultado de um método estipulado pelo Gabinete da Qualidade com base na experiência e noutros conhecimentos.

Estas instruções definem o processo de calibração, ou seja : o que medir, como medir e quais os valores considerados aceitáveis.

Indicam por isso :

Padrões e equipamentos a utilizar / Modo Operatório / Critério de aceitação/ Decisões a tomar em caso de não conformidade.

e) Etiquetas

Etiquetas autocolantes apostas sobre os aparelhos.

Podem ser de vários tipos consoante a informação que pretendem dar:

- Etiqueta "Nº de Cadastro": Número de cadastro do instrumento e indicações importantes tais como: *Não conforme; Calibrar antes de cada utilização; Fora de Serviço; Não requer calibração.*
- Etiqueta "Nº de Cadastro/Calibração": Número de cadastro do instrumento; data da última e da próxima calibração e rubrica do controlador.

  Esta etiqueta só é utilizada no equipamento "*conforme*".
- Etiqueta "Selo de Calibração": Pretende detectar se houve violação do instrumento durante o intervalo de calibração pelo que deverá ser colocada numa zona de abertura ou sobre parafusos de aferição.
- Etiqueta "Não requer calibração": Identificar equipamentos não susceptíveis de sofrer alterações que possam influenciar as medições a que se destinam.

A colocação das etiquetas é da responsabilidade do controlador que efectuou a calibração.

5.4 - Gestão dos equipamentos de inspecção, medição e ensaio

O gráfico do apêndice I-2 mostra o tipo e número de equipamentos existentes no início do ano corrente:

5.4.1- Base de dados

Para facilitar a gestão dos equipamentos de inspecção, medição e ensaio o sector conta com uma base de dados informática onde se registam todas as informações acerca dos equipamentos e movimentos originados por novas aquisições, calibrações, entradas e saídas para medições ou eliminação por falta de conformidade.

☒ A obsolescência do computador (processador 286) que serve de suporte à base de dados impede que seja instalado um programa que contemple as novas necessidades deste gabinete, nomeadamente a emissão de certificados de calibração mais completos.

5.4.2- Classificação dos equipamentos

Existe um critério de classificação dos instrumentos que consiste em lhes atribuir individualmente um número de código composto por 7 algarismos, os quais têm um significado próprio.
O número de código assume o seguinte aspecto: A B CC D EE e através dele identificam-se as seguintes características:
A: Família
B: Tipo
CC: Capacidade ou Tolerância ou Passo, consoante o instrumento
D: Resolução ou capacidade, consoante o instrumento.
EE: Número de ordem

☑ Qualquer instrumento é considerado um caso único, com uma "vida" própria, mesmo que existam outros fisicamente iguais.
☒ De cada vez que um instrumento é colocado fora de serviço, o seu número identificativo não é reutilizado. Com o correr dos tempos geram-se assim uma série de lacunas nos números de ordem. Verifica-se por exemplo que as fitas métricas necessitam já de 8 algarismos devido ao seu elevado número.
Para além disso, este critério é relativamente recente pelo que está a ser aplicado apenas aos instrumentos adquiridos posteriormente.
Esta falta de uniformização pode levar a interpretações erradas quando se analisa qualquer um dos documentos nos quais constam os n^{os} de código.

5.4.3-Aquisição:

A necessidade de adquirir equipamentos provém da existência de novas fabricações, substituições, avarias irreparáveis ou obsolescência do actual equipamento.

Cada equipamento de inspecção, medição e ensaio adquirido implica:

- Atribuição de um número de cadastro.
- Preenchimento da folha de cadastro.
- Verificação do relatório de ensaios ou do certificado enviado pelo fabricante ou ainda a calibração do instrumento se aqueles elementos não tiverem sido fornecidos.
- Verificação do seu funcionamento.
- Colocação da etiqueta "número de cadastro"e de "calibração".
- Emissão da I.O. de calibração, se não existir.
- Inclusão no Plano Anual de Calibração.

O equipamento adquirido pode ter como destino:

- Metrologia
- Ferramentaria
- Uso pessoal / sectorial
- Stock

No apêndice I-3 parte A são apresentados os custos de aquisição ao longo dos últimos anos.

5.4.4- Gestão das existências em stock:

Existem vários tipos de instrumentos em stock, sobretudo os que são mais utilizados.
No entanto, esse número de instrumentos não resultou de nenhum estudo feito. Normalmente são aproveitadas as condições promocionais oferecidas pelos vendedores.

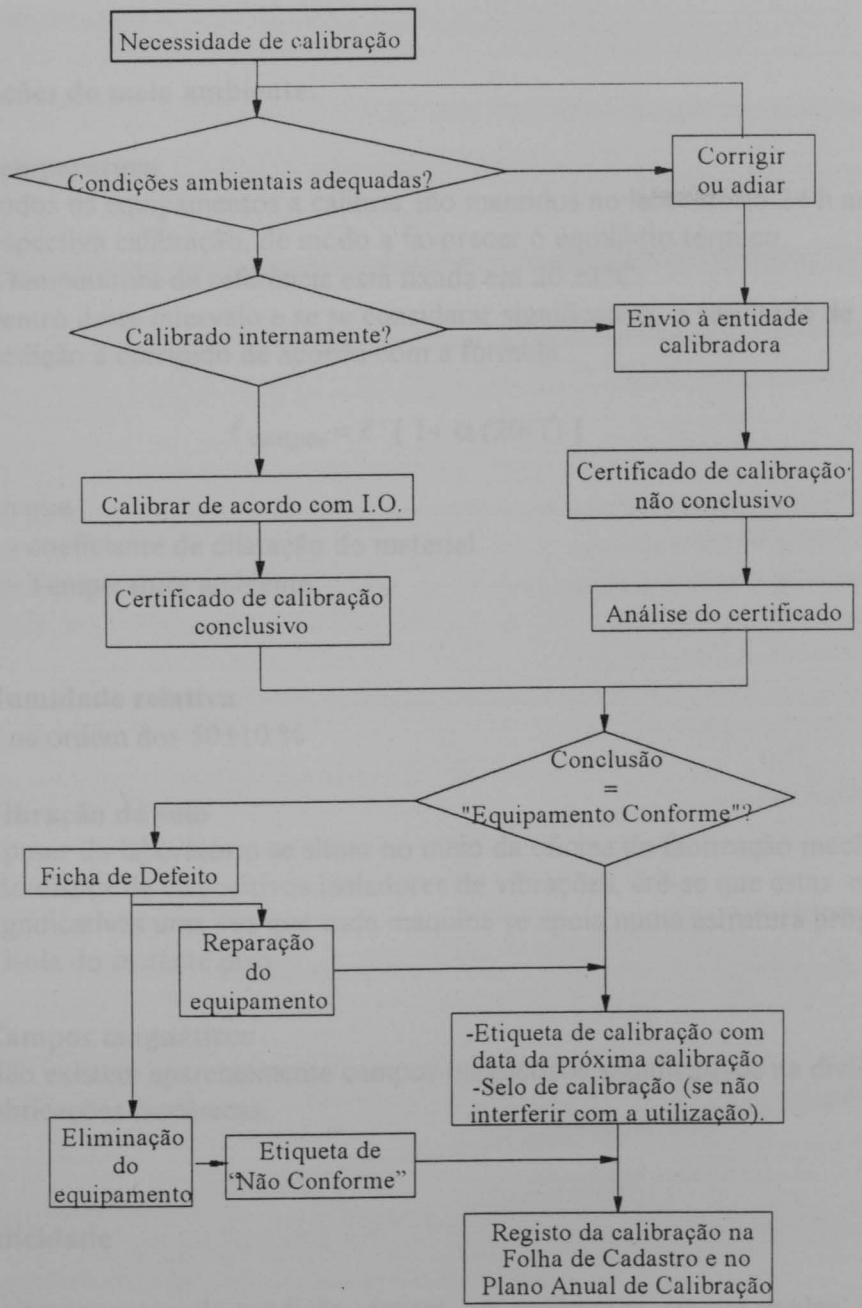
5.4.5-Saídas e entradas para medição:

Sempre que um funcionário do fabrico necessite de um instrumento para efectuar uma medição dirige-se ao Gabinete de Metrologia e Calibração. Aqui encontra um funcionário que se dedica exclusivamente a fornecer e receber os instrumentos requisitados registando a sua saída e entrada bem como outro tipo de informações necessárias ao permanente controlo dos instrumentos.
Caso não se saiba exactamente que tipo de instrumento a utilizar na medição, o pessoal deste gabinete tem a responsabilidade de seleccionar o equipamento mais

adequado, recorrendo frequentemente à regra de que a exactidão do instrumento deve ser tal que possa medir a décima parte da tolerância especificada.

5.4.6- Calibração

Em cada mês fixado no Plano Anual de Calibração decorrem as calibrações de um conjunto de equipamentos. Este processo pode-se ilustrar sucintamente através do seguinte fluxograma:



Para se ter uma ideia da actividade deste sector de calibrações pode-se dizer que em 1995 o número total de calibrações ascendeu a 1684 , sendo 1486 destinadas ao próprio sector e as restantes 198 referentes a equipamentos de outros sectores da empresa.

Ao exterior apenas foram requisitadas 71 calibrações.

No apêndice I-3 parte B são apresentados os custos de calibrações externas ao longo dos últimos anos.

a) Condições do meio ambiente:

- **Temperatura**
  Todos os equipamentos a calibrar são mantidos no laboratório 24 h antes da respectiva calibração, de modo a favorecer o equilíbrio térmico.
  A temperatura de referência está fixada em 20 ±1°C.
  Dentro deste intervalo e se se considerar significativo, o resultado de uma medição é corrigido de acordo com a fórmula :

$$\ell_{\text{corrigido}} = \ell \cdot [\, 1 + \alpha\,(20\text{-}T)\,]$$

  em que
  α - coeficiente de dilatação do material
  T - Temperatura ambiente.

- **Humidade relativa**
  É na ordem dos 50±10 %

- **Vibração do solo**
  Apesar do laboratório se situar no meio da oficina de fabricação mecânica e de não dispôr de dispositivos isoladores de vibrações, crê-se que estas não sejam significativas uma vez que cada máquina se apoia numa estrutura própria e que a isola do restante piso.

- **Campos magnéticos**
  Não existem aparentemente campos magnéticos significativos na divisão de fabricações mecânicas.

b) Periodicidade

Os instrumentos de medição devem ser calibrados em intervalos adequados baseados num determinado critério.

Pretende-se assim evitar que entre calibrações sucessivas ocorra qualquer alteração da exactidão ou outras caracteristicas do instrumento, que conduziriam a resultados falsos. Evidentemente quanto mais se apertasse o intervalo entre calibrações menor seria a probabilidade de tal acontecer . No entanto os custos tornar-se-iam insustentáveis. É por isso necessário chegar a uma solução de compromisso.
Existem métodos para uma escolha inicial da periodicidade de calibração e para a revisão dessa periodicidade. Estes métodos e outras informações podem ser consultados em [4] e [5].

No Manual da Qualidade define-se o seguinte critério :

"A periodicidade de calibração de um equipamento é em função de:

- Instruções do fabricante.

- Orientação fixada em normas nacionais ou outras, quando apropriado.

- Utilização do aparelho, sua função e localização.

- Resultados estatísticos de calibração.

A periodicidade poderá eventualmente ser reduzida ou alongada segundo os resultados de calibração."

☒ Na práctica e ao contrário do recomendado na secção 4.11 da norma ISO 10012, não se tem feito uma análise estatística dos resultados obtidos nas calibrações por se considerar relativamente pequeno o número obtido de instrumentos não conformes. Também não se consegue saber qual a utilização que cada instrumento está a ter de facto, porque apenas são registadas as requisições feitas pelos funcionários, e não o número de utilizações feitas durante essa requisição. Assim, e de uma maneira geral a periodicidade de calibração é determinística e ocorre segundo a instrução operacional que trata este assunto.

☑ Há no entanto uma forte preocupação em sensibilizar os funcionários do fabrico no sentido de comunicar imediatamente aos responsáveis qualquer tipo de acidente com os instrumentos (queda, pancada,etc). Quando tal suceder procede-se de imediato à sua calibração mesmo que não seja a data prevista.

c) Padrões

- Aparelhos de exactidão adequada ao processo de calibração em causa e com rastreabilidade assegurada a laboratórios primários.
- São acompanhados de um certificado de calibração estabelecido pelo fabricante ou por um organismo reconhecido.
- Calibram-se periodicamente por um organismo reconhecido que emite um certificado.

- São guardados em locais próprios e utilizados exclusivamente em calibrações.

d) Incertezas

☒ Segundo a norma NP EN ISO 9001, secção 4.11.1:

"O equipamento de inspecção, medição e ensaio deve ser utilizado de forma a assegurar que a *incerteza* das medições é conhecida e compatível com a capacidade de medição requerida:".

Também na norma 10012-1, secção 4.6 é dito que:

"Para proceder às medições, exprimir os resultados e utilizá-los, o Fornecedor deve ter em conta todas as fontes de *incerteza* identificadas e significativas do processo de medição."

Ainda segundo a Directiva CNQ 26/94, secção 3 alínea m) e secção 4 alínea c) é dito respectivamente que:

"Cada certificado de calibração deve conter os resultados de medição e a incerteza associada."

"Quando um parâmetro é certificado como estando dentro de uma tolerância, a incerteza de medição deve ser tida em conta."

Até agora nada foi feito no sentido de dar resposta a estes requisitos. Porém, e tal como foi apontado pelos auditores envolvidos na certificação em curso, o cálculo e análise das incertezas passarão a fazer parte integrante das calibrações realizadas e deverão constar nos certificados de calibração.
O estudo que se segue pretende por isso colmatar esta lacuna .

NOTA:

Relativamente à conformidade com as normas, apenas se assinalaram (com ☒) os aspectos negativos ou lacunas. Ou seja, todos os outros respeitam os requisitos dessas mesmas normas.

BIBLIOGRAFIA:

Secção 1
Manual da Qualidade-secção nº3
Revista "Comunicações" nº65, Março-Abril 1996

Secção 2
Manual da Qualidade-secção nº3

Secção 3
Manual da Qualidade-secção nº3
I.O. relativa a documentos

Secção 4
Manual da Qualidade-secção nº2 e nª3

Secção 5

[1] Manual da Qualidade - Secção nº 6.6

[2] Norma NP EN ISO 9001 (1995) - secção 4.11:Controlo do equipamento de inspecção, medição e ensaio.

[3] Norma ISO 10012-1:1992 -Requisitos de Garantia da Qualidade para o equipamento de medição.

[4] Norma NF E 10-100 (1984) - Méthodes de Mesurage Dimensionnel.

[5] Directiva CNQ 19/90 - Recomendações para a determinação da periodicidade de calibração dos instrumentos de medição utilizados nos laboratóris de ensaios.

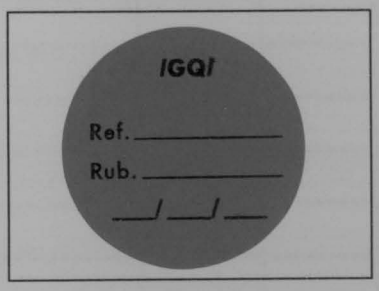
[6] Recomendação CNQ 4/93 - Exemplos de períodos iniciais de calibração.

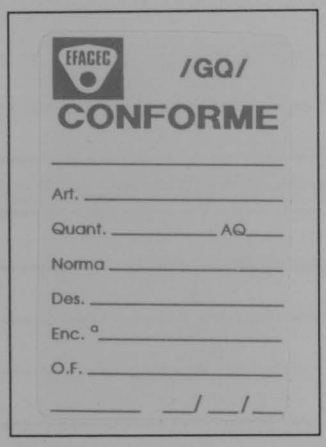
[7] Directiva CNQ 26/94 - Certificados de Calibração; Requisitos para a emissão por laboratórios acreditados.

[8] Instruções Operacionais internas sobre os diversos assuntos tratados.

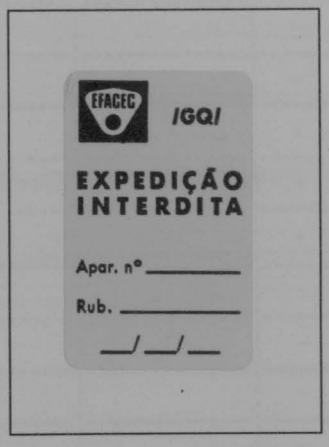
Apêndices do Capítulo I

ETIQUETAS



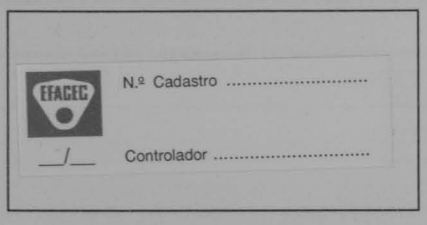




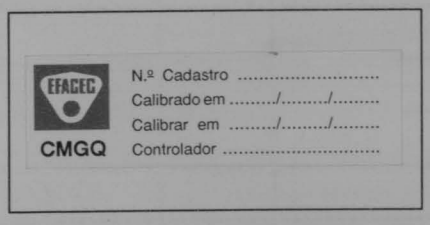


Apenas para os equipamentos de inspecção, medição e ensaio:

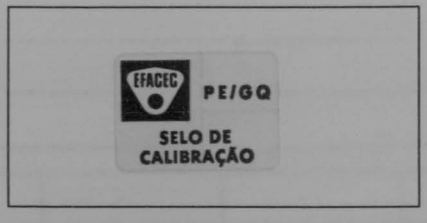
Etiqueta "Nº de Cadastro"



Etiqueta "Nº de Cadastro/Calibração"



Etiqueta "Selo de Calibração"



Etiqueta "Não requer calibração"



EFACEC, EMPRESA FABRIL DE MAQUINAS ELECTRICAS, S.A.
EFACEC ENERGIA
DIRECÇAO DE CONSTRUÇOES MECANICAS

********** P L A N O A N U A L D E C A L I B R A Ç A O **********

C M G Q 4 5 0 0 _ 199_ - F E V E R E I R O

NºCADASTRO	DESIGNAÇAO	PREC/RESOL	LOCAL	I.O. Nº	ANOTACOES	DATA	RUBRICA
						- -	
						- -	
						- -	

EFACEC, EMPRESA FABRIL DE MAQUINAS ELECTRICAS, S.A.
EFACEC ENERGIA
DIRECÇAO DE CONSTRUÇOES MECANICAS

FOLHA DE CADASTRO

IDENTIFICAÇAO

DESIGNAÇAO DO INSTRUMENTO -	- Nº CADASTRO - - - - - - -

MARCA	MODELO/TIPO	Nº SERIE/REFERENCIA	COMPONENTES
-	-	/	
CAPACIDADE (mm)	RESOLUÇAO (mm)	PRECISAO (mm)	
-	-	-	

AQUISIÇAO

Nº ENCOMENDA	DATA DA COMPRA	CUSTO	FORNECEDOR
	- -	$00	

ENSAIOS DE RECEPÇAO

EQUIPAMENTO UTILIZADO	RESULTADOS OBTIDOS	LIMITE DE REJEIÇAO	DATA/RUBRICA
			- -

DESTINO / PERIODO DE CALIBRAÇAO

LOCALIZAÇAO	PERIODICIDADE	INSTRUÇAO OPERACIONAL	RESPONSABILIDADES
	-- MESES	CMGQ-----	CMGQ

REGISTO DE CALIBRAÇOES E OCORRENCIAS

DATA	ENT.CALIBRADORA	Nº CERTIFICADO	ESTADO	RUBRICA	TIPO DE OCORRENCIA	OBSERVAÇOES
- -						
- -						
- -						
- -						
- -						
- -						
- -						
- -						
- -						
- -						

EFACEC

EFACEC ENGENHARIA E SISTEMAS, S.A.
GRUPO SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA
DEPARTAMENTO DE GARANTIA DA QUALIDADE

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

Nº.: 9602

IDENTIFICAÇÃO

NR. CADASTRO	DESIGNAÇÃO DO APARELHO	MARCA	MODELO	LOCALIZAÇÃO
32218	APALPADOR-A MA.31-DF.1624	MITUTOYO		CMPC

CONDIÇÕES DE AMBIENTE

TEMPERATURA (°C)	HUMIDADE RELATIVA (%)
19.5	57.5

APARELHOS CALIBRADORES

NR. CADASTRO	DESIGNAÇÃO	MARCA	MODELO	E. CALIBRADORA	NR CERTIF.	PROX. CALIBRAÇÃO
2413001	CALIBRADOR COMPARADORES	MITUTOYO		[illegible]	MD94/1776C	96.06.30
7400014	DINANOM. PRESSÃO	MITUTOYO		[illegible]	MF95/01-C	97.03.0[illegible]

RESULTADO DA CALIBRAÇÃO

FUNÇÃO	ALCANCE	EXACTIDÃO		INSTRUÇÃO OPERACIONAL
COMPARAÇÕES	0.5mm	DIN 2270		CMGG46021
LEITURA PADRÃO	LEITURA NO APARELHO	ERRO	ERRO (%)	OBS. LEITURA
0	0.006	0.006	1	DIR.1-(fe)
0	0.003	0.003	0	DIR.1-(ft)
0	0.006	0.006	1	DIR.1-(fobs)
0	0.001	0.001	0	DIR.1-(fu)
0	0.005	0.005	1	DIR.1-(fw)
0	13.5	13.5	3	DIR.1-FORÇA MAXIMA (qf)
0	9	9	2	DIR.1-DIF.ENTRE FORÇAS Ma
0	0.5	0.5	0	DIR.1-(fk)
0	0.007	0.007	1	DIR.2-(fe)
0	0.004	0.004	1	DIR.2-(ft)
0	0.008	0.008	2	DIR.2-(fobs)
0	0.003	0.003	0	DIR.2-(fu)
0	0.004	0.004	1	DIR.2-(fw)
0	15	15	3	DIR.2-FORÇA MAXIMA (qf)
0	5	5	1	DIR.2-DIF.ENTRE FORÇAS Ma
0	1	1	0	DIR.2-(fk)

OBSERVAÇÕES:

DATA DA CALIBRAÇÃO: 96.03.18

DATA DA PROXIMA CALIBRAÇÃO: 96.09.18

RUBRICA E CARIMBO

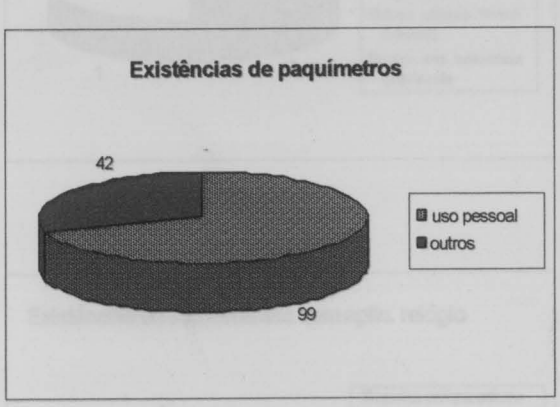
CMGO
CONFORME
M. CARVALHO
960318

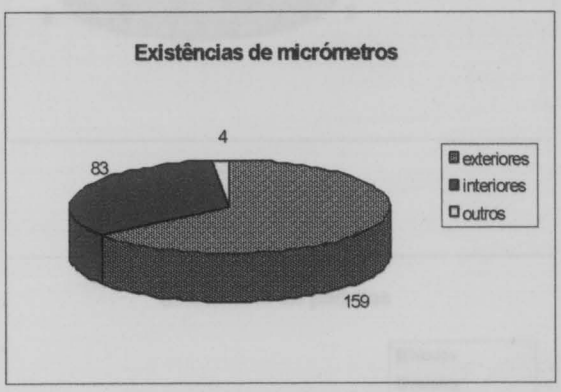
RESULTADO DA CALIBRAÇÃO: CONFORME

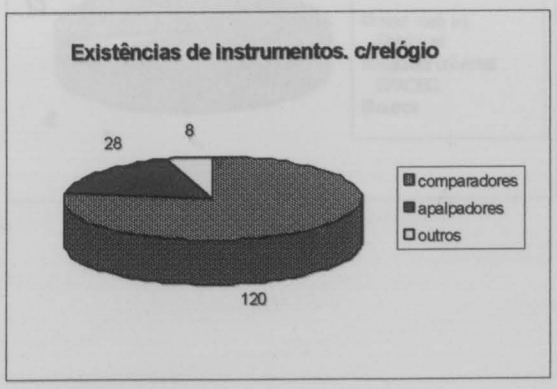
INSTRUMENTOS

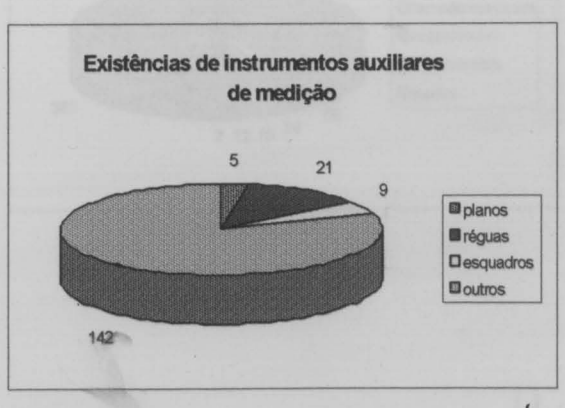
Família de instrumentos	*Sub - famílias*	*Existências*	*Total Família*
Paquímetros	uso pessoal	99	
	outros	42	141
Micrómetros	exteriores	159	
	interiores	83	
	outros	4	246
Instrumentos com relógio	comparadores	120	
	apalpadores	28	
	outros	8	156
Calibres	tampão lisos	254	
	tampão roscados	157	
	rosc. interior-ferradura	42	
	rosc. interior-anel	20	473
Padrões	blocos	246	
	varetas	68	
	argolas	24	
	tampão roscados	15	
	outros	383	
	rugosidades	12	
	apalpa-raios	2	750
Inst. aux. verif. medição	planos	5	
Outros instrumentos	réguas	21	
Máq. de ensaio de materiais	esquadros	9	
Diversos	outros	142	177
Instrumentos c/aplic. relógio	hastes comparadoras	30	
	multimar	6	
	med. rosc. int. Reishauer	4	
	medidor universal EFACEC	13	
	outros	4	57
Auxiliar de verificação	conta-fios	7	
	planos de ferro fundido	2	
	niveis	5	
	calços " boca de lobo "	11	
	bases magnéticas	32	
	suportes	12	
	compassos	12	
	outros	3	84
Máq. de ensaios de materiais	fer. en. im. qu. martelo	1	
	medid. condutiv. sigmatest	1	
	med. espes. reves. minitest	1	
	apar. ens. ader. quadricula	1	4
Outros instrumentos	medidor de vibrações	0	
	microscópio	1	1
Diversos	processadores	3	
	balanças	2	
	aparelhos de soldadura	8	13

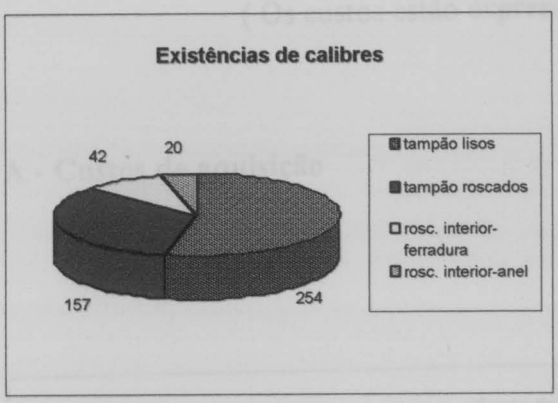

Gráfico de Existências
800
700
600
500
400
300
200
100
0
141
246
156
473
750
177
57
84
4
1
13
Paquímetros
Micrómetros
Instrumentos c/ Relógio
Calibres
Padrões
Inst. aux.
Instr.c/Aplic. Relogio
Auxiliar Verificação
Máq. Ensaios de Materiais
Outros Instrumentos
Diversos
Tipo de Instrumentos

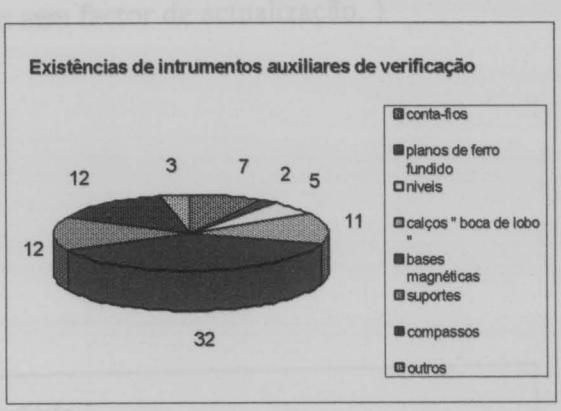

Existências de paquímetros
42
99
uso pessoal
outros

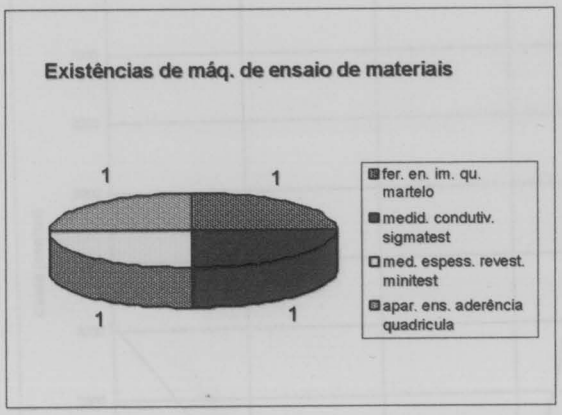

Existências de micrómetros
4
83
159
exteriores
interiores
outros

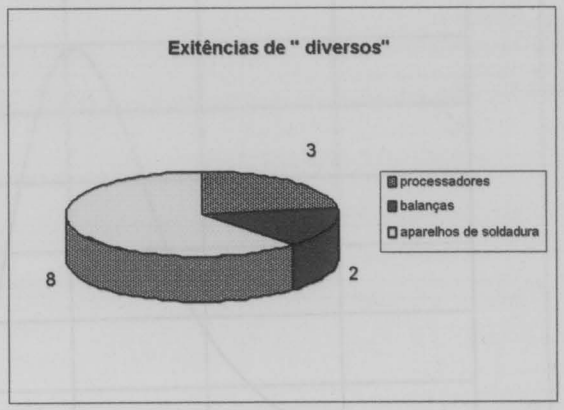

Existências de instrumentos. c/relógio
28
8
120
comparadores
apalpadores
outros

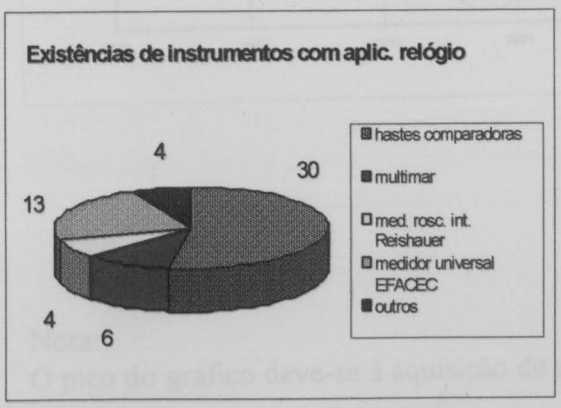

Existências de instrumentos auxiliares de medição
5
21
9
142
planos
réguas
esquadros
outros

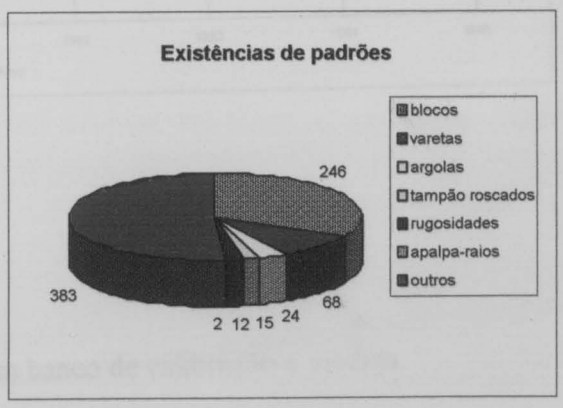

Existências de calibres
42
20
157
254
tampão lisos
tampão roscados
rosc. interior-ferradura
rosc. interior-anel


Existências de intrumentos auxiliares de verificação
12
3
7
2
5
11
12
32
conta-fios
planos de ferro fundido
niveis
caiços " boca de lobo "
bases magnéticas
suportes
compassos
outros


Existências de máq. de ensaio de materiais
1
1
1
1
fer. en. im. qu. martelo
medid. condutiv. sigmatest
med. espess. revest. minitest
apar. ens. aderência quadricula


Exitências de " diversos"
3
8
2
processadores
balanças
aparelhos de soldadura

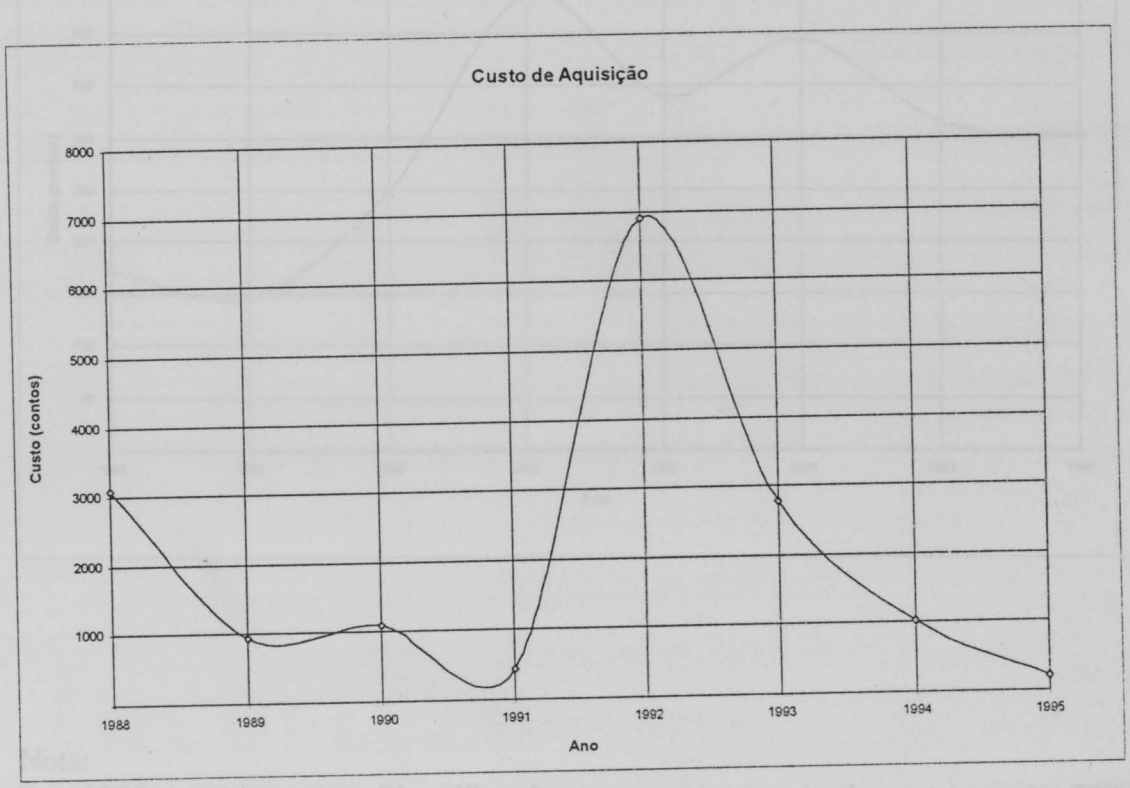

Existências de instrumentos com aplic. relógio
4
30
13
4
6
hastes comparadoras
multimar
med. rosc. int. Reishauer
medidor universal EFACEC
outros


Existências de padrões
246
383
2
12
15
24
68
blocos
varetas
argolas
tampão roscados
rugosidades
apalpa-raios
outros

CUSTOS

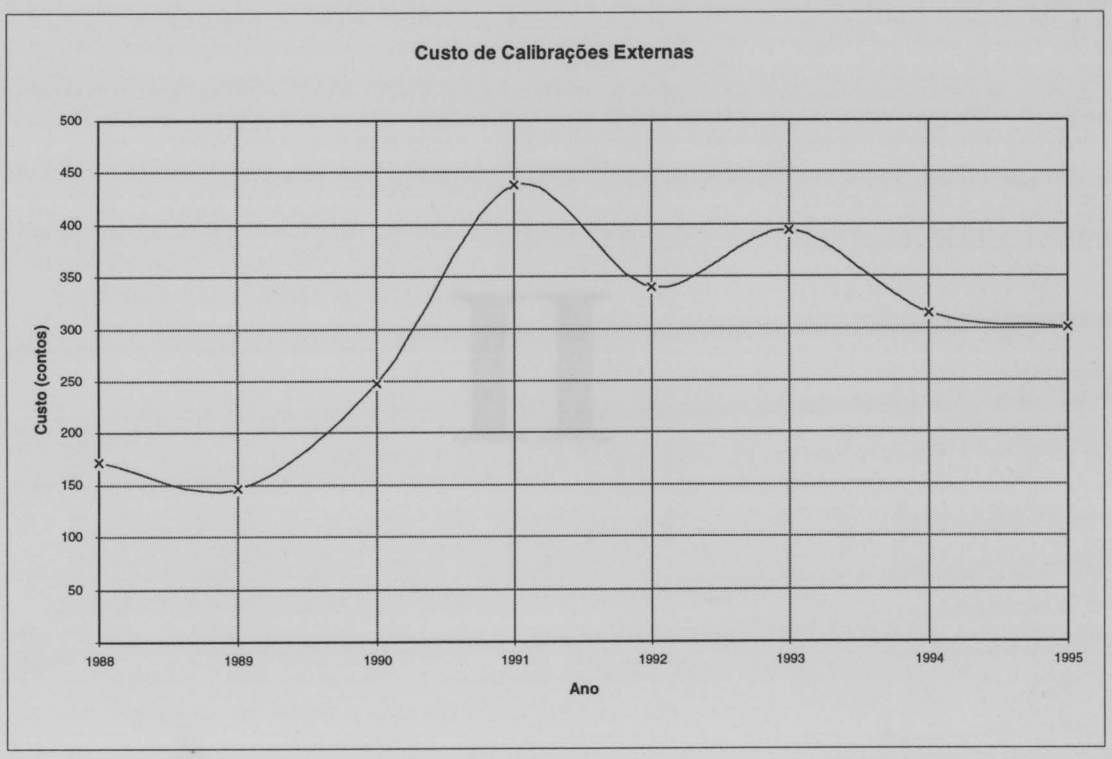
(Os custos estão expressos sem factor de actualização.)

A - Custos de aquisição



Nota:
O pico do gráfico deve-se à aquisição de um banco de calibração e medida.

B - Custos de calibrações externas



Nota:
Em 1995 requisitaram-se 71 calibrações ao exterior rondando o seu custo 300 contos.Como este ano os preços das calibrações ao exterior aumentaram mais de 50%, pode-se grosseiramente considerar que uma calibração no exterior fica por cerca de 7 contos.

II

Incerteza

Este capítulo pretende servir de Guia geral na avaliação da incerteza de medição e na expressão desta incerteza nos certificados de calibração. Por esse motivo adopta uma formulação genérica sendo válido em todos os domínios da medição. No capítulo seguinte (III) será dado um complemento mais específico para o caso concreto do laboratório de Metrologia e Calibração mencionado no capítulo anterior.

Este documento (excluindo os pontos 2.5 e 2.6) é elaborado de acordo com o *Guia para a expressão da incerteza na medição*, publicado em 1995 sob a autoria do BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP e OIML.

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - O que é a incerteza

Tal como já foi atrás referido, ***incerteza*** significa dúvida, ou seja, ***incerteza de medição*** refere-se à dúvida acerca da validade do resultado de uma medição.
Formalmente, e de acordo com o V.I.M. [2] , a incerteza de medição é definida como sendo o

> **"Parâmetro associado ao resultado de uma medição que caracteriza a dispersão dos valores que podem razoavelmente ser atribuídos à mensuranda."**

Ainda como notas se acrescenta que:

- "O **parâmetro** pode ser, por exemplo, um **desvio padrão** (ou um dado múltiplo dele), ou a metade de um intervalo para um dado nível de confiança."

- A incerteza de medição compreende, em geral, **muitos componentes**.
  Alguns destes componentes podem ser avaliados pela distribuição estatística dos resultados de séries de medições e podem ser caracterizados pelos desvios-padrão experimentais.
  Os outros componentes, que também podem ser caracterizados por desvios-padrão, são avaliados a partir de distribuições de probabilidade assumidas, baseadas na experiência ou outra informação.

- Entende-se que o **resultado da medição é a melhor estimativa do valor da mensuranda**, e que todos os componentes da incerteza, incluindo os resultados de efeitos sistemáticos tais como os componentes associados à correcção e padrões de referência, contribuem para a dispersão."

1.2 - O porquê da incerteza

Reconhece-se actualmente que numa medição, mesmo depois de identificados todos os componentes de erro e feitas as respectivas correcções, resta ainda uma dúvida sobre o resultado expresso, ou seja, até que ponto este representa realmente o valor da grandeza medida.
Assim se passou a exigir (ver capítulo I secção 5.4.6d)) que, quando se exprime o resultado da medição de uma grandeza, seja obrigatório fornecer alguma ***indicação quantitativa da qualidade do resultado***. Deste modo quem o utiliza pode ter uma ideia da sua credibilidade.

Sem essa indicação não faz sentido compararem-se entre si resultados de medições, nem comparar um resultado obtido com valores de referência dados em normas ou outras especificações.

De igual modo não fará sentido essa comparação se, apesar de ter sido expressa a incerteza de um resultado, não tenha sido utilizado para tal o mesmo método de cálculo. Por isso o BIPM propôs um método geral de consenso internacional que permite exprimir a incerteza.Tal método será exposto na secção 3.

Porém, não basta indicar apenas o valor da incerteza sem que após isso se analise esse mesmo resultado e se tirem conclusões pertinentes. Só assim se poderá interligar *incerteza de um resultado de medição* com *objectivo do resultado de medição*. A secção 2 que se segue ("incerteza vs tolerância") destina-se exactamente a discutir esta questão.

2 - TOLERÂNCIA VS. INCERTEZA

No apêndice II-1 são apresentados alguns dos termos e definições mais utilizados, e que se destinam principalmente à uniformização da linguagem usada. Esse apêndice não dispensa porém a consulta do Vocabulário Internacional de Metrologia.
Devido à sua importância serão discutidos mais pormenorizadamente alguns conceitos e a sua interligação, após o que se abordará o papel da incerteza no critério de aceitação.

2.1 - Resultado de Medição

O **objectivo de uma medição é o de determinar o valor da mensuranda**, ou seja o valor da grandeza particular a ser medida.

Em [1], a mensuranda é tratada sempre como uma **grandeza escalar**. Se se pretendesse alargar o âmbito deste estudo à medição simultânea de um conjunto de mensurandas relacionadas entre si, seria necessário substituir a mensuranda escalar e a sua variância por uma mensuranda vectorial e correspondente matriz de covariância.

O primeiro passo numa medição é o de especificar a mensuranda, o que não é possível fazer de um modo totalmente completo, visto necessitar de uma quantidade imensa de informação.
Normalmente a mensuranda define-se especificando certos estados físicos e condições. Por exemplo: Pressão do vapor de uma amostra de água a 20 °C.

Seguidamente é necessário especificar o método de medição e o procedimento de medição.

Geralmente o **resultado de uma medição é apenas uma aproximação ou estimativa do valor da mensuranda** e **por isso só está completo quando acompanhado por uma expressão da incerteza dessa estimativa**.

O resultado de uma medição é então composto por três elementos: um **valor numérico**, uma **unidade** e uma **incerteza** .
Pode ser expresso como uma distribuição caracterizada por dois parâmetros:
- O valor encontrado **y**, que corresponde à estimativa da mensuranda **Y**.
- A incerteza padrão combinada $\mathbf{u_c}(y)$ que corresponde ao desvio padrão da distribuição de Y.

$$\mathbf{Y = y \pm U} \qquad \mathbf{U = k \cdot u_c}(y)$$

Sob este ponto de vista o resultado de uma medição é considerado como sendo uma **variável aleatória** com valor esperado y que define a sua localização, e com incerteza (e.g. desvio padrão) que caracteriza a sua dispersão.

Em muitos casos o resultado de uma medição é determinado com base numa série de observações obtidas sob condições de repetibilidade.

O valor encontrado está dependente de uma série de componentes, tais como a própria definição de mensuranda, a qualidade dos instrumentos utilizados, a confiança em valores de tabela utilizados, etc. Estes componentes são usualmente chamados de ***fontes de incerteza*** e serão vistas adiante em 2.4.

2.2 - "Valor Verdadeiro"

Já foi dito que normalmente a **mensuranda se define especificando certos estados físicos e condições sendo muito difícil defini-la completamente** .
Assim quando se realiza a medição nas condições especificadas, encontra-se um valor que não se refere à mensuranda que se pretendia mas apenas à grandeza aproximada que se conseguiu especificar.

Tome-se como exemplo a adaptação do caso exposto em [1] secção D.3.2:

Suponha-se que a mensuranda é a espessura (X) de uma chapa de material a uma temperatura especificada.
Essa medição realizou-se a uma temperatura próxima da especificada e a espessura foi medida com um micrómetro numa zona particular do material. Obteve-se assim um valor (x).
Conhecia-se a temperatura do material no momento da medição e ainda a pressão aplicada.
Corrige-se por isso o valor obtido (x) tendo em conta a curva de calibração do micrómetro, a ligeira compressão do material e o afastamento da temperatura do material relativamente à temperatura especificada. Obtém-se assim o valor corrigido x'.
Este valor corrigido pode ser considerado como a melhor estimativa do "valor verdadeiro", já que corresponde à grandeza que se supõe satisfazer completamente a definição da mensuranda.
Imagine-se agora que se tinha aplicado o micrómetro numa outra zona do material, não se estando por este facto a contradizer a definição da mensuranda já que esta não especifica nada sobre a zona a efctuar a medição.
Muito provavelmente se obteriam valores diferentes de x, por exemplo x_1 , mas que satisfazia igualmente a definição da mensuranda.
Percebe-se agora que devido a uma definição incompleta da mensuranda o "valor verdadeiro" tem uma incerteza que pode neste caso ser avaliada através de medições feitas em diferentes zonas do material. (obtendo-se x_2 , x_3, x_4 , etc com um dado desvio padrão que será considerado como componente da incerteza)

Todas as mensurandas têm uma incerteza deste tipo, mas já seria óptimo se esta fosse a única fonte de incerteza de um resultado de medição.

2.3 - Erros

Do que já foi visto se conclui existirem inevitavelmente diferenças entre o valor da mensuranda e o valor obtido. Existe por isso um erro:

Valor obtido =Valor da mensuranda + Erro

O Erro é tradicionalmente visto como tendo duas componentes:
a) Componente sistemática
b) Componente aleatória

Pode-se assim dizer que:
Valor obtido = Valor da mensuranda + Erro sistemático + Erro aleatório
E(Valor obtido)=E(mensuranda)+E(erro sistemático)+E(erro aleatório)

O objectivo é o de reduzir a diferença entre o Valor obtido e o Valor da mensuranda.
Isto passa por reduzir o erro sistemático e o erro aleatório.

a) Redução da componente sistemática

Consegue-se reduzir o erro sistemático procedendo a **correções**.
Tal como foi visto no exemplo de 2.2, as correcções são calculadas com base nas diferenças entre as condições de definição da mensuranda e as condições reais em que foi feita a medição.
Muitas vezes é difícil reconhecer um efeito ou uma grandeza de influência num resultado de medição. Quando se consegue, o passo seguinte deverá ser o de quantificar esse efeito e seguidamente analisar até que ponto a sua extensão é significativa relativamente à exactidão requerida pela medição. Se significativa, dever-se-à então aplicar uma correcção ou um factor de correcção para compensar o efeito.
Pretende-se que, após correcção, o valor esperado do erro proveniente do efeito sistemático seja zero, ficando apenas:

E(Valor obtido) = E(mensuranda) + 0 + E(erro aleatório)

Assume-se que qualquer resultado de medição expresso tenha já sido corrigido de todos os efeitos sistemáticos significativos.

Note-se que, à semelhança da definição incompleta da mensuranda gerar um componente para a incerteza, o conhecimento incompleto do valor da correcção ou do factor de correcção que seria necessário aplicar gera também um componente para a incerteza do resultado da medição.

b) Redução da componente aleatória

Consegue-se reduzir o erro aleatório **aumentando o número de observações**.
Veja-se porquê:
O erro aleatório surge como resultado de variações temporais e espaciais imprevisíveis das grandezas de influência. O efeito destas variações origina variações nas observações repetidas da mensuranda. Estas variações são imprevisíveis e seguem um processo aleatório em que há igual probabilidade de ocorrerem num sentido ou no outro. Assim, prova-se que com um elevado número de observações estes efeitos em sentido oposto se compensam uns aos outros, de tal forma que em média originam um efeito nulo, ou seja originam um erro aleatório com valor esperado nulo.
Conclui-se por isso que apesar de não ser possível eliminar o erro aleatório compensando o resultado de medição, é possível reduzi-lo com o aumento do número de observações.
Consegue-se assim obter:

$$E(\text{resultado}) = E(\text{mensuranda}) + 0 + 0$$

Note-se também que a determinação de uma série de observações repetidas gera um componente da incerteza - a incerteza da média devida aos efeitos aleatórios. Este componente é quantificado pelo desvio padrão experimental da média da série de observações efectuadas.
O erro aleatório, para um elevado número de observações, é por isso uma variável aleatória que para efeitos prácticos se considera ter uma distribuição:

$N(0 , \sigma / \sqrt{n})$

2.4 - Incerteza

Tal como foi visto em 2.1 e considerando o que foi dito em 2.2 e 2.3, o resultado de uma medição mesmo após ter sido corrigido de todos os efeitos sistemáticos significativos continua a ser apenas uma estimativa do valor da mensuranda devido à existência da incerteza.

Na práctica existem múltiplas **fontes de incerteza** numa medição, incluindo:

a) Definição incompleta da mensuranda.

b) Realização imperfeita da definição da mensuranda.

c) Amostragem não representativa- a amostra medida pode não representar a mensuranda definida.

d) Conhecimento inadequado dos efeitos das condições ambientais ou sua medição imperfeita.

e) Influência pessoal ao ler instrumentos análogos.

f) Resolução finita do instrumento ou limiar de mobilidade.

g) Valores inexactos de padrões e materiais de referência.

h) Valores inexactos de constantes e outros parâmetros obtidos de fontes externas e usadas no algoritmo de tratamento de dados.

i) Aproximações e suposições incorporadas no método e procedimento de medição .

j) Variações em observações repetidas da mensuranda sob condições aparentemente idênticas.

Estas fontes não são necessariamente independentes. Algumas das fontes de a) até i) podem contribuir para j).

Convém não esquecer que:

-Pode-se ter conseguido um resultado de medição após correcção muito próximo do valor da mensuranda, e ainda assim com uma grande incerteza.
Seria o caso se, no exemplo de 2.2 e considerando apenas a fonte de incerteza j), se obtivesse $X-x' \approx 0$ mas x_1 , x_2 , x_3, x_4 muito dispersos.

-Um resultado de medição com uma incerteza muito pequena não indica que esse resultado esteja próximo do valor da mensuranda, mas apenas que está próximo do melhor valor que é possível encontrar tendo em conta a consistência com os conhecimentos que se possui acerca da definição da mensuranda.
Seria o caso de, no exemplo de 2.2 e considerando apenas a fonte de incerteza j), x_1 , x_2 , x_3, x_4 muito próximos, mas X e x' muito afastados.

Isto é perfeitamente natural se se recordar de (2.1) que "**o resultado de uma medição é considerado como sendo uma variável aleatória com valor esperado y que define a sua localização, e com incerteza (e.g. desvio padrão) que caracteriza a sua dispersão**".

Assim se espera que não sejam feitas quaisquer confusões entre ***incerteza*** e ***erro*** tal como normalmente não se faz entre desvio padrão e média.

2.5 - Tolerância

(Aplicada ao caso da calibração de instrumentos)

A tolerância indica **entre que limites se deverá situar o resultado da medição para que se possa aceitar como conforme** um determinado instrumento.

Automaticamente se deduz a extrema importância de uma **definição correcta e realista** desses limites, sendo tão grave uma tolerância demasiadamente apertada (que pode conduzir à rejeição de instrumentos aptos à sua função) como uma tolerância demasiamente relaxada (que pode conduzir à aceitação de instrumentos inaptos à sua função).

Partindo do princípio que a tolerância se encontra correctamente definida esta pode ser vista como um **objectivo a atingir pelo resultado de uma medição**, já que a declaração de conformidade ou não conformidade de um instrumento com as suas especificações é baseada na comparação entre resultado de medição e valores de referência especificados.

Surge então o confronto entre RESULTADO / TOLERÂNCIA.

2.6 - Incerteza *vs* Tolerância

Como mencionado no início deste capítulo, os pontos 2.5 e 2.6 não foram baseados no Guia para a expressão da incerteza na medição, já que este nada refere acerca da aplicação da incerteza de medição .
Esta é aliás uma lacuna apontada em [4] e que se tentará dentro das possibilidades esclarecer.
Considera-se esta questão de crucial importância para um laboratório de calibração que tem forçosamente de tomar uma decisão no sentido de aceitar ou rejeitar um instrumento após calibração mas que não encontra qualquer orientação por parte do referido Guia.

O cálculo da incerteza associada ao resultado de uma calibração justifica-se plenamente na fase de aceitação ou rejeição do instrumento calibrado.

Esta decisão só é possível pelo confronto do resultado obtido com os valores de referência especificados para esse instrumento.

A "qualidade" da decisão tomada é baseada na "qualidade" do resultado da medição.

2.6.1 -Até à introdução do conceito de incerteza associada a um resultado de medição, este confronto consistia apenas em verificar se o valor obtido (média das leituras efectuadas) se encontrava dentro do intervalo da tolerância especificada.
Era uma decisão rígida e pouco fundamentada porque facilmente tanto se aceitava um valor na situação a) como se rejeitava um valor na situação b).

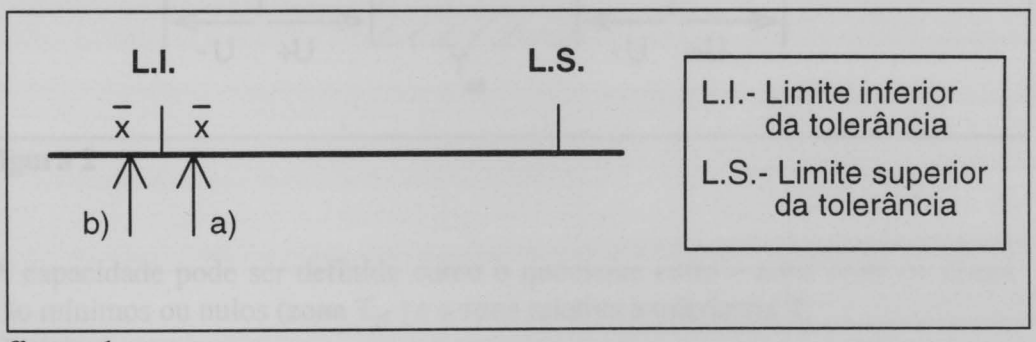


figura 1

Sem espaço para dúvidas tratava-se de uma certeza "cega", pois os riscos associados a cada decisão bem como o estudo da capacidade do processo de medição não eram contabilizados.

2.6.2 -**Com a introdução da incerteza como parte do resultado de medição, consegue-se quantificar a "qualidade" do resultado obtido** (quanto maior for a incerteza do resultado, pior é a sua "qualidade") **e para além disso pode-se associar um determinado risco às decisões tomadas relativamente à conformidade ou não de um instrumento.**

Assim sendo, depois de se obter o valor da incerteza expandida ($U = k \cdot u$, que será tratada de forma mais detalhada na secção 3.5) alguns passos deverão ser seguidos:

↳ Análise da capacidade do processo de medição

A capacidade do processo de medição pretende traduzir até que ponto o processo de medição utilizado (incluindo padrões, condições ambientais, metodologia, etc.) tem "aptidão" para fornecer valores que possam ser aceites sem risco.

O facto de um resultado apresentar uma determinada incerteza implica em termos prácticos que o seu intervalo de tolerância diminuiu. Se se designar a tolerância por **T** poder-se-à chamar tolerância efectiva ($\mathbf{T_{ef}}$) ao intervalo de valores que se obtém subtraindo a T o intervalo correspondente à incerteza expandida (2 · U).
A figura 2 ilustra esta situação:

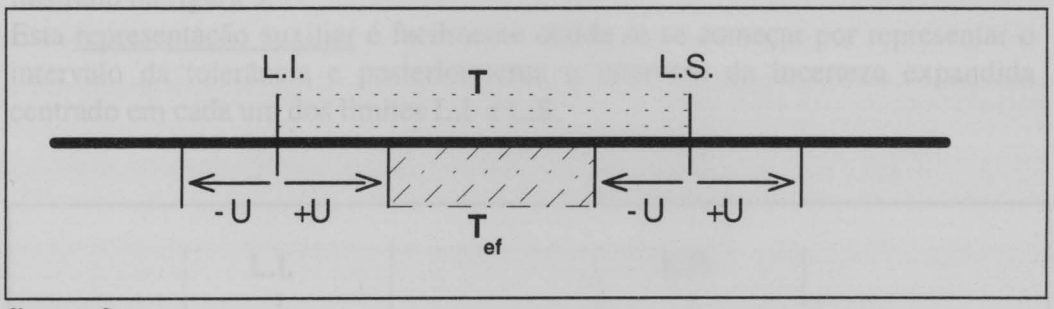


figura 2

A capacidade pode ser definida como o quociente entre a zona onde os riscos são mínimos ou nulos (zona T_{ef}) e a zona relativa à tolerância T.
Ou seja:

$$\text{Capacidade} = \frac{T - 2 \cdot U}{T}$$

- ***Capacidade*** ≤ 0 significa que a amplitude da incerteza é superior à própria tolerância, ou seja não existe qualquer "aptidão" no processo e **nenhum resultado permite aceitar o instrumento em causa sem incorrer em elevados riscos**. Mesmo na situação ideal que ocorre quando o resultado se situa exactamente a meio do intervalo de T, é impossível aceitá-lo sem riscos.

  Quando surgirem casos nesta situação dever-se-à **reformular o processo** tentando encontrar a origem deste facto. Isto pode passar não só por uma **revisão dos cálculos efectuados, como pela revisão da adequabilidade do próprio processo de calibração e ainda pela confirmação da necessidade real das tolerâncias especificadas.**

- ***Capacidade*** ≈ 1 a situação é óptima, significando que existe uma grande confiança no processo já que se obteve uma incerteza practicamente nula. Consequentemente os riscos de aceitar um resultado que se situe algures no intervalo de T, é sempre nulo ou muito pequeno.

- $0 \leq$ ***Capacidade*** < 1 - Trata-se da situação mais comum e **só nestes casos é que faz sentido avançar com a análise do posicionamento do resultado obtido perante o intervalo da tolerância.**
  É o que será visto no passo seguinte.

Análise da conformidade do resultado com a sua especificação

Para facilitar esta análise serão distinguidas três zonas possíveis, tal como ilustrado na figura 3.
Esta representação auxiliar é facilmente obtida se se começar por representar o intervalo da tolerância e posteriormente o intervalo da incerteza expandida centrado em cada um dos limites L.I. e L.S.

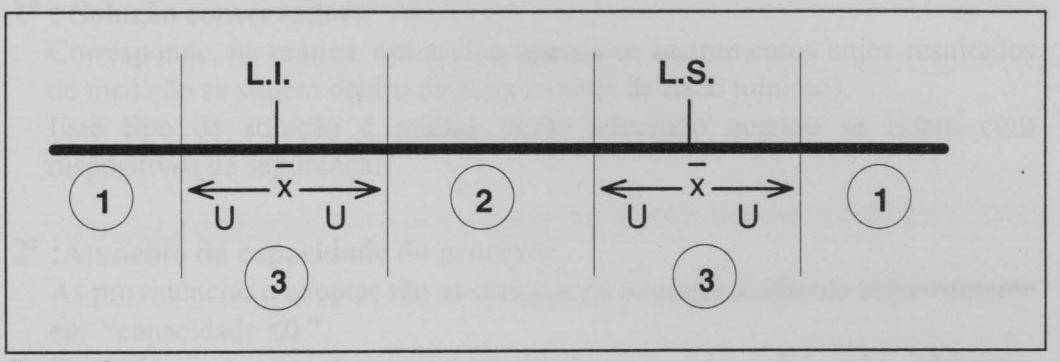


figura 3

Se o resultado obtido **y** estimado por $\bar{x}$ se situar na :

ZONA 1- Não restam dúvidas que o instrumento será considerado não-conforme.

ZONA 2- O instrumento será aceite sem riscos ou **na pior hipótese com um risco máximo associado ao nível de confiança com que se obteve o valor de k. Esta pior hipótese ocorre nos casos em que y = L .I .+ k u** ou **y = L .S. - k u** e o risco é dado pela probabilidade de se obterem valores respectivamente à esquerda de L.I. ou à direita de L.S. (Note-se que, frequentemente, esta probabilidade é calculada assumindo-se que Y se distribui normalmente.)
De qualquer forma o risco é desprezável para valores usuais de k (e.g. se Y seguir uma distribuição normal e k=2 $\Rightarrow$ na pior hipótese há um risco de 2.28%).
Uma representação gráfica desta situação para um nível de confiança de 90% pode ser vista no apêndice III-3.

ZONA 3- Não se consegue afirmar a conformidade ou não do instrumento, já que há sempre a possibilidade de estar a rejeitar um instrumento cujo resultado de calibração se encontra dentro da zona de tolerância ou então de se aceitar um instrumento cujo resultado de calibração se encontre fora da tolerância.

De qualquer forma há que tomar uma decisão nestes casos polémicos. Para tal serão apresentadas 3 tipos de soluções baseadas em propostas discutidas em [5] . Cabe a cada entidade escolher a que melhor se adapta às suas necessidades ou à sua realidade.

Soluções a adoptar quando o resultado de medição (y) se situa na zona 3 (L .I .-U≤ y ≤L .I. + U ou L .S .-U ≤ y ≤L .S. + U)

1ª : Solução conservadora

Corresponde, na prática, em aceitar apenas os instrumentos cujos resultados de medição se situem dentro da zona 2 (zona de risco mínimo).

Este tipo de solução é muitas vezes adoptado quando se lidam com dispositivos de segurança.

2ª :Aumento da capacidade do processo

As providências a adoptar são as mesmas da situação analisada anteriormente em "capacidade ≤0 ".

Pretende-se com isto diminuir a amplitude da incerteza. Há assim a hipótese de que o resultado de medição de situe agora na nova zona 2 levando a que o instrumento seja declarado conforme.

3ª :Partilha de riscos

Corresponde na prática a aceitar os instrumentos cuja decisão não exceda um determinado limite de risco.

Ou seja, assumindo que o resultado de medição (variável aleatória Y) segue uma distribuição normal, então para cada resultado obtido (y) se pode calcular a probabilidade de Y ser inferior ou igual a y (caso y pertença à zona 2 à esquerda) ou a probabilidade de Y ser superior ou igual a y (caso y pertença à zona 2 à direita).

Esta probabilidade corresponde ao risco de se estar a aceitar um instrumento não conforme ou de se rejeitar um instrumento conforme.

Cabe a cada entidade tomar uma resolução quanto ao risco máximo admissível.

3 - AVALIAÇÃO DA INCERTEZA

Nota: Serão utilizadas letras maiúsculas quando se tratar de variáveis aleatórias e letras minúsculas quando se tratar de valores particulares dessas variáveis.

3.1 - Modelo matemático

As mensurandas, as grandezas particulares sujeitas a medição, são na maior parte dos casos grandezas resultantes. Ou seja, a mensuranda Y não é medida directamente, mas é determinada a partir de um certo número (N) de grandezas de entrada X_i (i=1,2,...,N) de acordo com a relação funcional :

$$Y = f(X_1, X_2, ..., X_N). \qquad (1)$$

Em calibração lida-se geralmente com apenas **uma** *grandeza de saída Y.*

A função **f** modeliza o procedimento de medição. Ela descreve o modo como os valores da grandeza de saída Y são obtidos a partir das grandezas de entrada X_i (i=1,2,...,N) .
Na maior parte dos casos trata-se de uma expressão analítica , mas pode também ser um grupo de expressões que incluem correcções e factores de correcção para efeitos sistemáticos, conduzindo então a uma relação mais complicada que não é escrita explictamente como uma função.
É o caso no qual as grandezas de entrada X_1, X_2,.., X_N são também vistas como mensurandas, dependendo também de outras grandezas e assim sucessivamente.
Além disso, **f** pode ser determinada experimentalmente ou existir apenas como um algoritmo de computador que tem de ser avaliado numericamente, ou pode ser ainda uma combinação de todos estes casos.

3.2 - Estimativas de entrada e de saída

O conjunto de grandezas de entrada X_i (i=1,2,...,N) pode ser agrupado em duas categorias, de acordo com o modo como o valor da grandeza e a sua incerteza associada tenham sido determinadas:

- grandezas cuja estimativa e incerteza associadas são determinadas directamente na medição corrente. Estes valores podem ser obtidos, por exemplo, de uma única observação, de observações repetidas ou de atribuições baseadas na experiência. Podem envolver a determinação de correcções aos instrumentos de leitura assim como correcções às grandezas de influência, tais como a temperatura ambiente, pressão barométrica ou humidade.

- grandezas cuja estimativa e incerteza associadas são introduzidas na medição através de fontes externas, como as grandezas associadas aos padrões de medição calibrados, materiais de referência certificados ou dados de referência obtidos de manuais.

A estimativa de saída denotada por **y**, que é uma estimativa da mensuranda **Y** , é obtida a partir da equação (**1**), usando estimativas de entrada $\mathbf{x_i}$ para os valores das grandezas de entrada $\mathbf{X_i}$ (i=1,2,...,N):

$$y = f(x_1, x_2, .., x_N). \qquad (2)$$

Note-se que as estimativas de entrada são supostamente corrigidas de todos os efeitos significativos para o modelo.

3.3 - Incerteza padrão

3.3.1 - Conceito

Para variáveis aleatórias a variância das suas estimativas ou a sua raíz quadrada, denominada *desvio padrão* , são usadas como medidas da dispersão dos valores. A incerteza padrão de medição da estimativa de saída (ou resultado de medição **y**), denotada por **u (y)**, corresponde à estimativa do desvio padrão do resultado da medição. Deve ser determinada a partir das estimativas $\mathbf{x_i}$ das grandezas de entrada e das suas incertezas padrão associadas $\mathbf{u(x_i)}$ (i=1,2,...,N).

A incerteza padrão associada a uma estimativa exprime-se na mesma dimensão da estimativa.
Em alguns casos pode ser apropriado usar a *incerteza de medição relativa* que é dada pelo quociente entre a incerteza de medição de uma estimativa e o módulo dessa estimativa. Não se pode recorrer a este conceito se o valor estimado for igual a zero.

3.3.2 - Métodos para avaliar Incertezas de medição de grandezas de entrada

Os componentes da incerteza de medição de grandezas de entrada podem ser agrupados em duas categorias baseadas no seu método de avaliação, denominadas por avaliação " **Tipo A**" e " **Tipo B**".
A *avaliação de tipo A da incerteza padrão* é o método de avaliação da incerteza através da análise estatística de uma série de observações repetidas. Neste caso a incerteza padrão é o desvio padrão experimental que provém de um procedimento baseado na média ou de uma análise de regressão.

A *avaliação de tipo B da incerteza padrão* é o método de avaliação da incerteza através de outros meios que não a análise estatística de uma série de observações. Neste caso a estimativa da incerteza padrão é baseada noutros conhecimentos científicos a partir dos quais se assume uma distribuição *a priori.*

Esta classificação (tipo A/ tipo B) não pretende significar que existe qualquer diferença na natureza dos componentes. Ambos os tipos de avaliação são baseados em distribuições de probabilidade e os componentes da incerteza resultantes de qualquer tipo são quantificados por variâncias ou desvios padrão (ou melhor, pelas suas estimativas).

3.3.2.1 - Avaliação de tipo A da incerteza padrão

A avaliação da incerteza padrão de tipo A é aplicada quando existem **n observações independentes** de uma das grandezas de entrada X_i, efectuadas sob as mesmas condições de medição. Se não houver resolução suficiente no processo de medição verificar-se-à uma dispersão ou extensão considerável nos valores obtidos.

Assume-se que a grandeza de entrada X_i , medida repetidamente, é a grandeza Q. Com n observações estatisticamente independentes (n>1), a estimativa da grandeza Q é $\bar{q}$, a média ou a média amostral dos valores individuais observados q_j (j=1,2,..,n)

$$\bar{q} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} q_j \qquad (3)$$

a) Os valores individuais observados q_j diferem uns dos outros devido às variações aleatórias nas grandezas de influência, tal como visto em 2.3 b).
Uma estimativa da variância de Q é a *variância experimental* $s^2(q_j)$ dos valores q_j, dada por:

$$s^2(q_i) = \frac{1}{n-1}\sum_{j=1}^{n}(q_j - \bar{q})^2 \qquad (4)$$

Esta estimativa da variância e a sua raíz quadrada -chamada *desvio padrão experimental*- caracterizam a variabilidade dos valores observados q_j , mais concretamente a sua dispersão em torno da média q .

A melhor estimativa da variância da média é a *variância experimental da média* dada por:

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q_j)}{n} \qquad (5)$$

Esta estimativa da variância da média e a sua raíz quadrada -chamada *desvio padrão experimental da média* quantificam até que ponto $\bar{q}$ estima bem o valor esperado de Q e podem ser utilizadas como medidas da incerteza de q .

Assim, para uma grandeza de entrada X_i determinada a partir de n observações repetidas, a incerteza padrão $u(x_i)$ da sua estimativa $x_i = \bar{X}_i$ é dada por:

$$u(x_i) = s(\bar{X}_i) \qquad (6)$$

Atenção: Geralmente, quando o número de medições repetidas n é baixo (n<10), a avaliação de tipo A da incerteza padrão tal como expressa pela equação (6), não é credível.
O número de observações n deve ser suficientemente grande para assegurar que q providencia uma estimativa credível do valor esperado da variável aleatória Q e que $s^2(q)$ é uma estimativa credível da variância de q .

b) No caso de uma medição bem caracterizada e sob control estatístico, uma estimativa combinada (*pooled*) da variância s_p^2 pode ser calculada, caracterizando melhor a dispersão do que o desvio padrão estimado (obtido a partir de um número limitado n de observações). Nesse caso, se o valor da grandeza de entrada Q é estimado a partir da média $\bar{q}$ de um pequeno número de observações independentes, a variância experimental da média pode ser melhor estimada por

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s_P^2}{n} \qquad (7)$$

do que por $s^2(\bar{q}) = \dfrac{s^2(q_j)}{n}$

A incerteza padrão associada é pois: $\mathbf{u} = \dfrac{s_p}{\sqrt{n}}$

Procedimento de determinação de s_p^2 :

1° Obter N séries de observações independentes, sendo cada uma constituida por n_i observações repetidas e independentes.
2° Para cada série calcular a variância experimental segundo a fórmula 4 .
3° Cada série tem $\nu_i = n_i - 1$ graus de liberdade.
4° A estimativa da variância *pooled* é dada por: $s_p{}^2 = \dfrac{\sum_{i=1}^{N} \nu_i s_i{}^2}{\sum_{i=1}^{N} \nu_i}$
5° Os graus de liberdade de s_p^2 são obtidos por: $\nu = \sum_{i=1}^{N} \nu_i$

6° A variância experimental da média aritmética das *m* observações independentes realizadas é dada por $\frac{s_p^2}{m}$ e tem também ν graus de liberdade.

3.3.2.2 - Avaliação de tipo B da incerteza padrão

A avaliação de tipo B da incerteza padrão é a avaliação da incerteza de uma estimativa x_i relativa a uma grandeza de entrada X_i, utilizando outros meios que não a análise estatística de uma série de observações repetidas. A incerteza padrão associada $u_B(x_i)$ é avaliada por um julgamento científico baseado em toda a informação disponível sobre a variabilidade possível de X_i. Essa informação pode ser proveniente de:

- Dados de medições anteriores
- Experiência ou conhecimento do comportamento e propriedades de materiais relevantes e instrumentos
- Especificações dos fabricantes
- Dados provenientes de calibrações e outros certificados
- Incertezas atribuídas a dados de referência provenientes de manuais.

O uso apropriado da informação disponível para uma avaliação do tipo B da incerteza padrão de medição faz apelo a uma certa reflexão baseada na experiência e em conhecimentos gerais.Trata-se de facto de uma habilidade que pode ser desenvolvida com a prática.
A avaliação da incerteza padrão do tipo B, quando bem fundamentada pode ser tão credível quanto uma avaliação da incerteza padrão do tipo A, sobretudo na situação em que a avaliação do tipo A se baseia apenas num número comparativamente pequeno de observações estatisticamente independentes.

Assim:

a) Quando apenas se conhece um único valor da grandeza X_i , e.g., um único valor medido, um valor resultante de uma medição anterior, um valor de referência proveniente de livros, ou um valor de correcção, esse valor deve ser usado como sendo x_i . A incerteza padrão associada u_B (x_i) deve ser adoptada quando é dada. Caso contrário deve ser calculada a partir de dados da incerteza inequívocos. Se não estiverem disponíveis dados desta natureza, a incerteza deve ser estimada com base na experiência.

b) Quando se pode assumir uma distribuição de probabilidade para a grandeza X_i, baseada na teoria ou na experiência, então o valor esperado e a raíz quadrada da variância dessa distribuição devem ser tomados respectivamente como sendo a estimativa x_i e a incerteza padrão associada u_B (x_i).

c) Se apenas se puder estimar os limites superior e inferior a_+ e a_- para os valores da grandeza X_i (e.g. especificações do fabricante de um instrumento de medição, intervalo de temperatura, um erro de arredondamento ou truncatura resultante de uma redução automática dos dados), pode-se assumir que a grandeza de entrada X_i segue uma distribuição de probabilidade com uma densidade de probabilidade constante entre estes limites (distribuição uniforme ou rectangular) .
De acordo com b) o valor estimado é dado por:

$$x_i = \frac{1}{2}(a_+ + a_-) \qquad \textbf{(8)}$$

e o quadrado da incerteza padrão é dado por:

$$u_B^2(x_i) = \frac{1}{12}(a_+ - a_-)^2 \qquad \textbf{(9)}$$

Se a diferença entre os valores limites é designada por ***2a*** , a equação (9) fica:

$$u_B^2(x_i) = \frac{1}{3}a^2 \qquad \textbf{(10)}$$

A distribuição uniforme ou rectangular é um modelo razoável para se utilizar por defeito, na falta de outra informação.

No entanto, se se souber que alguns valores da grandeza em causa são mais passíveis de ocorrerem perto do centro do que perto dos limites, então a distribuição triangular ou a distribuição normal podem constituir um modelo mais adequado.
obter-se-iam assim respectivamente, em vez da equação (10):

$$u_B^2(x_i) = \frac{1}{6}a^2 \qquad \text{e} \qquad u_B^2(x_i) = \frac{1}{9}a^2$$

De notar que a magnitude destas três variâncias é relativamente semelhante se se tiver em conta a enorme diferença de quantidade de informação necessária para cada caso (quantidade crescente de informação).

Por outro lado, se ocorrem valores perto dos limites com mais frequência do que os valores perto do centro, uma distribuição em forma de U pode ser mais apropriada.

3.4 - Incerteza padrão combinada

Por uma questão de simplicidade e visto ser o mais comum na prática, apenas será tratado o caso em que todas as grandezas de entrada são independentes. Os casos em que duas ou mais grandezas estão correlacionadas pode ser visto no apêndice II-2.

3.4.1 - Conceito

A incerteza padrão combinada u_c (y) é um desvio padrão estimado e caracteriza a dispersão dos valores que podem razoavelmente ser atribuídos à mensuranda Y.

A incerteza padrão de y, sendo y a estimativa da mensuranda Y, é obtida pela combinação apropriada das incertezas padrão das estimativas de entrada x_1, x_2,.., x_N
Esta ***incerteza padrão combinada*** da estimativa y é denotada por $\mathbf{u_c(y)}$.

Para grandezas de entrada não correlacionadas, o quadrado da incerteza padrão da estimativa de saída y é então dado por:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^{N} u_i^2(y) \qquad \textbf{(11)}$$

A grandeza u_i (y) (i=1,2,..,N) é a contribuição para a incerteza padrão da estimativa de saída y resultante da incerteza padrão da estimativa de entrada x_i

$$u_i(y) = c_i\, u(x_i) \qquad \textbf{(12)}$$

onde c_i (i=1,2,..,N) é o ***coeficiente de sensibilidade*** associado à grandeza de entrada X_i e cada $u(x_i)$ é uma *incerteza padrão* obtida por uma avaliação do Tipo A ou Tipo B.

De acordo com a equação (12) a contribuição u_i (y) pode ser tanto positiva como negativa dependendo do sinal do coeficiente de sensibilidade c_i . O sinal de u_i(y) tem de ser tomado em consideração no caso de grandezas de entrada correlacionadas - ver equação 4 do apêndice II-2.

3.4.2 - Coeficientes de sensibilidade

O ***coeficiente de sensibilidade*** associado à grandeza de entrada X_i é a derivada parcial de f relativamente a X_i , avaliada em x_i :

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{\partial f}{\partial X_i}\bigg|_{X_i = x_i \; X_N = x_N} \qquad (13)$$

O coeficiente de sensibilidade c_i descreve até que ponto a estimativa de saída y é influenciada pelas variações da estimativa de entrada x_i .
Em vez de serem calculados a partir da função f , os coeficienes de sensibilidade são por vezes determinados experimentalmente: mede-se a variação em Y produzida por uma variação em X_i , enquanto se mantêm constantes as restantes grandezas de entrada.

3.4.3 - Lei da Propagação da incerteza

A equação (11) pode ser escrita da seguinte forma:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \qquad (14)$$

Tanto a equação (14) como a sua equivalente (eq.3 apêndice II-2) para grandezas de entrada correlacionadas, são baseadas numa aproximação de $Y=f(X_1,X_2,...,X_N)$ a séries de Taylor de 1ª ordem e exprimem a chamada ***Lei da Propagação da Incerteza.***
Ou seja, mostra como as incertezas das grandezas de entrada (tomadas como desvios padrão (s)) se combinam para dar a incerteza da grandeza de saída.

Esta equação também se aplica à propagação de múltiplos de desvios padrão. Assim, se cada desvio padrão (s_i) for substituído por um múltiplo ks_i , com o mesmo valor de k para cada s_i , o desvio padrão da estimativa de saída y é substituído por k s(y).

No entanto, não se pode aplicar a mesma equação na propagação de intervalos de confiança. Se em vez de u (x_i) se tiver um intervalo de confiança correspondente a um dado nível de confiança p , a grandeza resultante não define um intervalo de confiança correspondente ao mesmo valor de p a menos que as grandezas de entrada sejam descritas por distribuições normal.

Se a função modelo f for fortemente não-linear ou alguns dos coeficientes de sensibilidade forem nulos, terão de ser incluidos termos de ordem mais elevada na equação (14).

3.4.4 - Simplificações

a) Da expressão (11)

Se a função modelo f é uma soma ou diferença aritmética das grandezas de entrada X_i (i=1,2,..,N), os coeficientes de sensibilidade são iguais a ± 1 e a equação (11) converte-se em :

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^{N} u^2(x_i) \qquad \textbf{(15)}$$

Uma expressão análoga pode ser obtida a partir da equação (11) se for possível usar incertezas relativas $w(y) = u(y) / |y|$ e $w(x_i) = u(x_i) / |x_i|$ (i=1,2,..,N) e a função modelo f for um produto ou quociente das grandezas de entrada X_i (i=1,2,..,N)

$$w^2(y) = \sum_{i=1}^{N} w^2(x_i) \qquad \textbf{(16)}$$

b) Da covariância entre duas grandezas

Se as estimativas x_i e x_k de duas das grandezas de entrada estão correlacionadas em algum grau, i.e. se grandezas de entrada X_i e X_k são mutualmente dependentes num ou noutro sentido, a covariância das estimativas também tem de ser considerada como uma contribuição para a incerteza (ver o apêndice II-2). A capacidade para levar em conta o efeito das correlações depende do conhecimento do processo de medição e do julgamento das dependências mútuas das grandezas de entrada. De um modo geral deve ter-se em conta que o facto de se negligenciar correlações entre grandezas de entrada pode conduzir a uma estimação incorrecta da incerteza padrão da mensuranda.

A covariância associada às estimativas de duas grandezas de entrada X_i e X_k pode ser tomada como zero ou ser tratada como insignificante, se:

- As grandezas de entrada X_i e X_k são independentes, por exemplo por terem sido repetidamente mas não simultaneamente observadas em diferentes experiências independentes ou porque representam grandezas resultantes de diferentes avaliações que foram feitas independentemente.

- Alguma das grandezas de entrada X_i e X_k pode ser tratada como constante,

- Não existe informação suficiente para avaliar a covariância associada às estimativas das grandezas de entrada X_i e X_k.

Por vezes podem-se evitar correlações utilizando uma escolha apropriada do modelo. Por exemplo, se as grandezas de influência comuns são introduzidas como grandezas de entrada adicionais independentes.

3.4.5 - Forma de apresentação

A análise da incerteza de uma medição - por vezes chamada o "balanço" da incerteza da medição - deve incluir uma lista de todas as fontes de incerteza juntamente com as incertezas padrão de medição associadas e os métodos de as calcular ou estimar. No caso de medições repetidas o número n de observações deve também ser expresso. Por uma questão de clareza os dados relevantes para esta análise devem ser apresentados numa tabela. Nesta tabela todas as grandezas devem ser referenciadas por um símbolo físico X_i ou uma pequena identificação. Para cada uma delas devem ser especificadas pelo menos a estimativa x_i, a incerteza de medição associada $u(x_i)$, o coeficiente de sensibilidade c_i e as diferentes contribuições para a incerteza $u_i(y)$. Também se deve apresentar juntamente com os valores na tabela, a dimensão de cada uma das grandezas .

Grandeza $\mathbf{X_i}$	Estimativa $\mathbf{x_i}$	Incerteza $\mathbf{u(x_i)}$	Coeficiente de sensibilidade $\mathbf{c_i}$	Contribuição para a incerteza $\mathbf{u_i(y)}$
X_1	x_1	$u(x_1)$	c_1	$u_1(y)$
:	:	:	:	:
X_N	x_N	$u(x_N)$	c_N	$u_N(y)$
Y	y			u (y)

Tabela 1 -Na análise da incerteza de uma medição é usada uma ordenação esquemática das grandezas, estimativas, incertezas, coeficientes de sensibilidade e contribuições para a incerteza .

A tabela 1 é um exemplo formal de um esquema para o caso de grandezas de entrada não correlacionadas. A incerteza padrão da estimativa do resultado da medição u(y), no canto inferior direito da tabela, é a raíz quadrada da soma dos quadrados de todas as contribuições para a incerteza apresentadas na coluna da direita. A parte a cinzento não é preenchida.

3.5 - Incerteza expandida

3.5.1 - Conceito

Apesar da incerteza padrão combinada u_c (y) poder ser usada universalmente para exprimir quantitativamente a incerteza de um resultado de medição, em algumas aplicações comerciais, industriais, médicas ou de segurança, é necessário exprimir

uma medida da incerteza que defina um intervalo abranjendo uma larga proporção da distribuição dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos à mensuranda.

Essa medida da incerteza é denominada ***incerteza expandida de medição*** (U) e obtém-se multiplicando a incerteza padrão ***u(y)*** da estimativa de saída *y* por um factor de expansão ***k*** :

$$U = k\,u(y) \qquad (17)$$

O resultado de medição é assim convenientemente expresso por $\mathbf{Y = y \pm U}$, pretendendo significar que o intervalo [**y-U** , **y+U**] abrange uma larga proporção da distribuição de valores razoavelmente atribuídos a Y.

3.5.2.- Escolha de um factor de expansão (k)

O valor do factor de expansão **k** é escolhido com base no nível de confiança requerido para o intervalo [y-U , y+U].

Na maior parte dos casos não faz sentido distinguir entre um intervalo com um nível de confiança de 95% (1 hipótese em 20 do valor da mensuranda Y sair fora do intervalo) e outros com 94 ou 96% (uma hipótese em 17 ou 25 respectivamente).
Por outro lado dificilmente se consegue justificar a necessidade de recorrer a intervalos com um nível de confiança tão elevado como 99% .

O ideal seria que se soubesse para um dado k qual o nível de confiança que lhe corresponde e vice-versa.
No apêndice II-3, parte A, apresentam-se os valores $\mathbf{k_p}$ que correspondem a um determinado nível de confiança ***p***, assumindo diferentes tipos de distribuições para a variável Y.

Na prática, porém, o que se verifica é que os intervalos obtidos com os valores $\mathbf{k_p}$ apresentados no referido apêndice são apenas aproximações, já que pode faltar uma série de informação acerca da verdadeira distribuição da variável Y ou faltar credibilidade suficiente na estimativa das incertezas padrão.

a) Distribuição Normal e Teorema do Limite Central

Uma primeira aproximação razoável ao cálculo de U é o uso de um k estimado a partir de uma distribuição Normal.
No entanto, a assumpção de uma distribuição normal não pode ser facilmente confirmada experimentalmente.
Nos casos onde vários componentes da incerteza não-correlacionados provenientes de distribuições de probabilidade "bem comportadas" (e.g. distribuição normal, distribuição rectangular) contribuem equitativamente para a incerteza padrão da estimativa de saída, ou seja quando se reunem as condições do Teorema do Limite Central, pode-se assumir, com um elevado grau de aproximação, que a distribuição da estimativa de saída é normal.

b) Credibilidade da estimativa de saída

Para estimar o valor de um factor de expansão k correspondente a uma probabilidade expandida especificada, é necessário levar em consideração a credibilidade da incerteza padrão u(y) da estimativa de saída y. Isto significa levar em consideração até que ponto é que u(y) estima bem o desvio padrão associado ao resultado de medição.
Para uma estimativa do desvio padrão de uma distribuição Normal, os graus de liberdade desta estimativa, que dependem do tamanho da amostra na qual é baseada, são uma medida da credibilidade.
A incerteza padrão da estimativa de saída pode ser considerada de credibilidade suficiente nos casos em que nenhuma das suas contribuições para a incerteza é obtida a partir de uma *avaliação do tipo A* baseada num pequeno número de observações repetidas (e.g. em menos do que dez).
Para mais informações ver a evolução da incerteza relativa com o número de observações, no capítulo III, secção 1.2.

➔ **Nos casos em que se pode atribuir aos resultados de medição uma distribuição Normal (Gaussiana) e em que a incerteza padrão da estimativa de saída é suficientemente credível, deve então ser usado o factor de expansão padrão k=2.** A incerteza expandida associada corresponde a uma probabilidade expandida de aproximadamente 95%.
Se se tratar de uma aplicação crítica, pode-se adoptar k=3 obtendo-se uma incerteza expandida associada correspondente a uma probabilidade expandida de aproximadamente 99%.

➔ **Se uma das condições a) ou b) não é verificada, o factor de expansão k=2 pode originar uma incerteza expandida correspondente a uma probabilidade expandida menor do que 95%.**

Nestes casos devem ser seguidos outros procedimentos de modo a garantir que um valor da incerteza expandida seja cotado com a mesma probabilidade expandida correspondente ao caso da Normal.
É essencial o uso de um coeficiente de expansão aproximadamente igual quando se tem de comparar dois resultados de medição da mesma grandeza (e.g. quando se avaliam os resultados de uma comparação interlaboratorial ou se avalia a conformidade com uma especificação).

➔ **Mesmo se se puder assumir uma distribuição Normal, pode ainda acontecer que a incerteza padrão da estimativa de saída tenha uma credibilidade insuficiente**.
Se neste caso não for possível aumentar o número n de medições repetidas ou usar uma avaliação do tipo B em vez de uma avaliação do tipo A de pouca credibilidade, deve-se então **usar um método em que os coeficientes de expansão são determinados a partir de graus de liberdade**.
Este método fornece uma **medida ajustada da credibilidade** da incerteza padrão de uma estimativa de saída **dada pelos seus graus de liberdade efectivos** ν_{ef}.
As condições de aplicabilidade desse método são apresentadas no apêndice II-3 parte B. A metodologia de aplicação prática será apresentada no capítulo III, secção 1.3.

➔ **Para os restantes casos, i.e. todos os casos onde a assumpção de uma distribuição Normal não puder ser justificada,** deve-se usar a informação relativa à actual distribuição de probabilidade da estimativa de saída de modo a obter um valor para o coeficiente de expansão k que corresponde a uma probabilidade expandida de aproximadamente 95%.
Se faltar esta informação a análise tem de ser feita caso a caso.

4 - EXPRESSÃO DA INCERTEZA

4.1 - Em documentos auxiliares

Quando se exprimem resultados de calibração em certificados de calibração, não é viável descrever todos os pormenores e métodos utilizados na avaliação da incerteza, pelo que frequentemente, e bem, se referem os documentos utilizados.

Nesses documentos deve existir um conjunto de informações tal como:

- Descrição clara dos métodos usados para calcular o resultado de medição e a sua incerteza a partir das observações experimentais e dados de entrada.
- Lista de todos os componentes da incerteza e o modo como foram avaliados.
- Análise dos dados de tal forma que cada um dos passos mais importantes possa ser seguido e o cálculo do resultado expresso possa ser repetido independentemente.
- Todas as correcções e constantes usadas na análise e as suas fontes.

É de extrema importância que todos esses documentos sejam mantidos actualizados de modo a serem consistentes com o procedimento de medição actualmente em uso.

4.2 - Em certificados de calibração

Nos certificados de calibração o resultado completo da medição consiste na estimativa y da mensuranda e na incerteza expandida associada U e deve ser expresso na forma $(y \pm U)$.

O apêndice II-4 aborda mais detalhadamente os items: unidades S.I.; algarismos significativos; arredondamentos e sua aplicação na expressão da incerteza.

a) Unidades

- As unidades usadas para a incerteza devem ser **iguais** às unidades usadas no resultado.
  Exemplo: (3,971±0,0055) mm

Pode-se no entanto, usar incertezas relativas (%, ppm, etc.) desde que claramente identificadas e referentes ao resultado de medição.
Exemplo: incerteza expandida relativa do caso acima: $U / |y| = \pm 0{,}14\%$

b) Algarismos significativos

Não se devem exprimir os resultados quer de y, quer de U com um número excessivo de algarismos.

- O valor numérico da **incerteza** de medição deve ser apresentado **no máximo com dois algarismos significativos**.

- O **arredondamento** a efectuar na expressão de **U** deve ser feito preferencialmente **por excesso**, excepto nos casos onde pareça evidente que seja feito por defeito.
  Ex: Arredondar à décima do micron o valor 3,101μm . Perante este resultado faria mais sentido arredondar para 3,1 μm do que para 3,2 μm .

O valor numérico do resultado de medição deve ser consistente com o valor da sua incerteza associada.

- Neste sentido, **y** deve ser **arredondado** na sua expressão final **até ao algarismo menos significativo do valor da incerteza.**
  O arredondamento é feito segundo as regras gerais de arredondamentos.

c) Texto final

Nos certificados de calibração deverá ainda haver uma nota adicional com o seguinte conteúdo :
(admitindo que se pretende uma probabilidade expandida de 95%)

- Caso se verifiquem as condições a) e b) da secção 3.5.2 :

  "A incerteza expandida de medição apresentada corresponde à incerteza padrão de medição multiplicada pelo factor de expansão $k = 2$, calculado a partir da distribuição Normal para se obter uma probabilidade expandida de aproximadamente 95% . A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com o documento EALR2 (95). A estabilidade a longo prazo do objecto não foi tomada em consideração."

- Nos casos em que se seguiu o método do apêndice II-3 parte B :

"A incerteza expandida de medição apresentada corresponde à incerteza padrão de medição multiplicada pelo factor de expansão k = YY , calculado a partir da distribuição t com ν_{ef} graus de liberdade efectivos para se obter uma probabilidade expandida de aproximadamente 95%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com o documento EALR2(95). A estabilidade a longo prazo do objecto não foi tomada em consideração."

NOTA: Em **cálculos intermédios** não convém que se sigam rigorosamente as regras anteriormente referidas, sendo permitido trabalhar com um número de algarismos superior ao necessário. Evitam-se assim erros resultantes da acumulação de arredondamentos.

BIBLIOGRAFIA:

[1] *Guia para a expressão da incerteza na medição*, publicado em 1995 sob a autoria do BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP e OIML.

[2] Vocabulário Internacional de termos básicos e gerais em Metrologia (VIM) 2ª Edição, Maio de 1996.

[3] Barry S Cartman, Application of Measurment uncertainty in telecommunication regulatory testing, Eurolab Workshop on Uncertainty, Barcelona, December 1992.

[4] Christian Ranson, Introduction to the "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement", 2nd Eurolab Symposium, Florence, Italy, April 1994.

[5] Marc Priel, Measuring Instrument "Capability", 3rd Eurolab Symposium, Berlin, Germany, 5-7 June 1996.

[6] José António Sarsfield Cabral / Rui Campos Guimarães, Apontamentos de Estatística

[7] LAB / G06 - Guia para a aceitação de incertezas em laboratórios de calibração.

[8] Norma ISO 31-0:1992(F), Annexe B-Guide pour l'arrondissage des nombres.

Apêndices do Capítulo II

DEFINIÇÕES

A - Metrológicas

As definições que a seguir se apresentam foram retiradas do V.I.M. [2].
Foram consideradas apenas as mais relevantes para o presente estudo.

1 - GRANDEZA (MENSURÁVEL)

Atributo de um fenómeno, corpo ou substância susceptível de ser caracterizado qualitativamente e determinado quantitativamente.

Notas:

1. O termo "grandeza" pode referir-se a grandezas em sentido geral (ver exemplos a)). ou a uma grandeza particular (ver exemplos b))

Exemplos:

a) grandezas em sentido geral: comprimento, tempo, massa, temperatura, resistência eléctrica, concentração de quantidade de matéria ;

b) grandezas particulares :

- comprimento de uma barra.
- resistência eléctrica de uma dada amostra de cabo.
- concentração de quantidade de matéria de etanol numa amostra de vinho.

2. Grandezas que podem ser colocadas por ordem de magnitude relativa entre si são chamadas grandezas da mesma natureza.

3. Grandezas da mesma natureza mutuamente comparáveis podem agrupar-se em categorias de grandezas, por exemplo:

- trabalho, calor, energia
- espessura, perímetro, comprimento de onda

4. Os simbolos das grandezas são dados na Norma ISO 31

2 - VALOR (DE UMA GRANDEZA)

Magnitude de uma grandeza particular em geral expressa pelo produto da unidade de medida por um número.

Exemplos:

a) comprimento de uma barra:5,34 m ou 534cm;

b) massa de um corpo: 0,152 kg ou 152 g

c) quantidade de matéria de uma amostra de água (H_2O):0,012 mol ou 12 mmol.

Notas:

1. O valor da grandeza pode ser positivo, negativo ou nulo.

2. O valor da grandeza pode ser expresso por mais que uma forma.

3. O valor de grandezas adimensionais são geralmente expressos por números puros.

4. Uma grandeza que não possa ser expressa como uma unidade de medida multiplicada por um número, pode ser expressa por referência a uma escala de referência convencionada ou a um procedimento de medição ou a ambos.

3 - VALOR VERDADEIRO (DE UMA GRANDEZA)

Valor consistente com a definição de uma dada grandeza particular.

Notas:

1. É um valor que seria obtido numa medição perfeita.
2. Valores verdadeiros são indetermináveis por natureza.
3. O artigo indefinido "um", melhor do que o artigo definido "o", é usado em conjugação com "valor verdadeiro" porque pode haver muitos valores consistentes com a definição de uma grandeza particular.

4 - VALOR CONVENCIONALMENTE VERDADEIRO (DE UMA GRANDEZA)

Valor atribuído a uma grandeza particular e aceite, por vezes por convenção, como tendo uma incerteza apropriada a um determinado objectivo.

Exemplos:

a)num dado local, o valor atribuído à grandeza realizada por um padrão de referência pode ser tomado como o valor convencionalmente verdadeiro.

b) o CODATA(1986) recomendou para número de Avogrado o valor: $6{,}0221367 \times 10^{23} mol^{-1}$.

Notas:

1. O valor onvencionalmente verdadeiro é por vezes chamado "valor atribuído", "melhor estimativa" do valor, "valor convencional" ou "valor de referência". "Valor de referência" neste caso não deve ser confundir-se com "valor de referência" no sentido da nota ao 5.7 do V.I.M.
2. Frequentemente um número de resultados de medição de uma grandeza é usado para estabelecer um valor convencionalmente verdadeiro.

5 - MEDIÇÃO

Conjunto de operações que têm por objectivo determinar o valor de uma grandeza.

Nota: as operações podem ser realizadas automaticamente.

6 - METROLOGIA

Ciência da medição

Nota: A metrologia compreende todos os aspectos, tanto teóricos como práticos, relativos à medição, quaisquer que sejam a sua incerteza e o domínio da ciência e da tecnologia a que se referem.

7 - PRINCÍPIO DE MEDIÇÃO

Fundamento científico da medição.

Exemplos:

a) efeito termoelétrico utilizado para a medição da temperatura;
b) efeito Josephson utilizado para a medição da tensão elétrica;
c) efeito Doppler utilizado para a medição de velocidade;
d) efeito de Raman utilizado na medição do nº de onda de vibrações moleculares.

8 - MÉTODO DE MEDIÇÃO

Sequência lógica de operações descritas genericamente, utilizadas na execução de medições.

Nota: Os métodos de medição podem qualificar-se de várias formas, tais como
- método de substituição
- método diferencial
- método de zero.

9 - PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO

Conjunto das operações descritas pormenorizadamente, envolvidas na execução de uma medição particular, segundo um dado método.

Nota: Um procedimento de medição é usualmente registado num documento que por vezes se chama "procedimento de medição" (ou método de medição) e é habitualmente suficientemente detalhado para permitir ao operador desempenhar a medição sem informação adicional

10 - MENSURADA

Grandeza particular submetida à medição

Exemplo:
Pressão do vapor de uma dada amostra de água a 20° C

Nota:
A especificação de uma mensurada pode requerer informações acerca de grandezas como o tempo, temperatura e pressão

11 - GRANDEZA DE INFLUÊNCIA

Grandeza que não é a mensurada mas que influi no valor de medição.

Exemplos:
a) temperatura de um micrómetro usado na medição de comprimento;
b) frequência na medição da amplitude de uma diferença do potencial eléctrico alterna;
c) concentração de bilirrubina na medição de concentração de hemoglobina numa amostra de plasma sanguíneo humano

12 - RESULTADO DE UMA MEDIÇÃO

Valor atribuído a uma mensuranda, obtido na medição

Nota:

1. Quando um resultado é dado, e o termo "resultado da medição" é usado, deverá indicar-se claramente se se refere:
   - à indicação;
   - ao resultado bruto;
   - ao resultado corrigido

   e se envolve a média de uma série de medições.
2. Uma expressão completa do resultado da medição compreende informação sobre a incerteza de medição.

13 - RESULTADO BRUTO

Resultado da medição antes da correcção do erro sistemático

14 - RESULTADO CORRIGIDO

Resultado da medição depois da correcção do erro sistemático.

15 - EXACTIDÃO DE MEDIÇÃO

Aproximação entre o resultado da medição e o valor verdadeiro da mensuranda.

Notas:

1. Exactidão é um conceito qualitativo.
2. Deve ser evitado o termo **precisão** no lugar de **exactidão**

16 - REPETIBILIDADE DOS RESULTADOS (DE UMA MEDIÇÃO)

Aproximação entre os resultados de medições sucessivas da mesma mensuranda efectuadas nas mesmas condições de medição.

Notas:

1. Estas condições são chamadas condições de repetibilidade.
2. As condições de repetibilidade incluem:
   - mesmo procedimento de medição;
   - mesmo observador;
   - mesmo instrumento de medição, usado nas mesma condições;
   - mesmo local;
   - repetição num curto intervalo de tempo
3. A repetibilidade pode exprimir-se quantitativamente em termos das características da dispersão dos resultados.

17 - REPRODUTIBILIDADE DOS RESULTADOS (DE UMA MEDIÇÃO)

Aproximação entre os resultados das medições da mesma mensuranda efectuada com alteração das condições de medição:

Notas:

1. Uma informação válida de reprodutibilidade exige à especificação das condições alteradas.

2. As condições alteradas podem incluir:

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

3. A reprodutibilidade pode exprimir-se quantitativamente em termos das características da dispersão dos resultados.

4. Os resultados aqui são usualmente entendidos como resultados corrigidos.

18 - DESVIO-PADRÃO EXPERIMENTAL

Parâmetro s que caracteriza a dispersão dos resultados obtidos numa série de n medições da mesma mensuranda, dado pela fórmula:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

Notas:

1. Considerando a série de x medições como amostra de uma distribuição, $\bar{x}$ é um estimador não enviesado da média μ, e s^2 é um estimador da variância σ^2 dessa distribuição.

2. A expressão $s/\sqrt{n}$ é uma estimativa do desvio-padrão da distribuição de $\bar{x}$ e é designada por **desvio-padrão experimental da média**.

3. O "desvio-padrão exprimental da média" é por vezes incorrectamente chamado "**erro padrão da média**".

19 - ERRO DE MEDIÇÃO

Diferença algébrica entre o resultado da medição e o valor verdadeiro da mensuranda.

Notas:

1. Uma vez que o valor verdadeiro não pode ser determinado, na prática é usado um valor convencionalmente verdadeiro.

2. Quando é necessário distinguir "erro" de "erro relativo", o primeiro é por vezes chamado "erro absoluto de medição" . Este não deve confundir-se com valor absoluto do erro, que é o módulo do erro.

20 - ERRO RELATIVO

Quociente do erro da medição pelo valor verdadeiro da mensuranda.

Nota : Uma vez que um valor verdadeiro não pode ser determinado, na prática é usado um valor convencionalmente verdadeiro.

21 - ERRO ALEATÓRIO

Resultado da medição subtraído da média que resultaria de um número infinito de medições da mesma mensuranda em condições de repetibilidade.

Notas:

1. O erro aleatório é igual ao erro subtraído do erro sistemático.
2. Porque só pode ser efectuado um número finito de medições só é possível determinar uma estimativa do erro aleatório.

22 - ERRO SISTEMÁTICO

Média que resultaria de um número infinito de medições da mesma mensuranda em condições de repetibilidade subtraída do valor verdadeiro da mensuranda.

Notas:

1. O erro sistemático é o erro subtraído do erro aleatório.
2. Tal como o valor verdadeiro, o erro sistemático e as suas causas não podem ser conhecidas por completo.
3. Para um instrumento de medição, ver " erro sistemático de um instrumento de medição"

23 - CORRECÇÃO

Valor acrescentado algebricamente ao resultado bruto da medição para compensar o erro sistemático.

Notas:

1. A correcção é igual e de sinal contrário ao erro sistemático estimado.
2. Dado que o erro sistemático não pode ser conhecido perfeitamente, a compensação não é completa.

24 - FACTOR DE CORRECÇÃO

Factor numérico pelo qual se multiplica o resultado bruto da medição para compensar o erro sistemático.

Nota : Dado que o erro sistemático não pode ser conhecido perfeitamente, a compensação não é completa.

B - Estatísticas

As definições que a seguir se apresentam foram baseadas na Norma ISO 3534-1, e encontram-se simplificadas tendo em conta o fim a que se destinam.

1- Característica

Uma propriedade que ajuda a identificar ou diferenciar entre item de uma dada população.
Essa característica pode ser **quantitativa** - por variáveis, ou **qualitativa** - por atributos.

2- Variável aleatória

Uma variável que pode tomar qualquer um dos valores de um conjunto especificado de valores. A essa variável está associada uma ***distribuição de probabilidade*** (3).
Uma variável aleatória diz-se **discreta** quando toma apenas valores isolados e diz-se **contínua** quando pode tomar qualquer valor dentro de um intervalo finito ou infinito

3 - Distribuição de probabilidade

Uma função que dá a probabilidade de uma variável aleatória tomar um dado valor ou pertencer a um dado conjunto de valores.

4 - Função distribuição de probabilidade

Uma função que dá, para cada valor de x, a probabilidade de a variável aleatória X ser menor ou igual do que x.

5 - Função de probabilidade

Uma função que dá, para cada valor x_i de uma variável discreta X, a probabilidade de esta variável aleatória ser igual a x.

6- Média aritmética

Uma medida de localização.
É a soma dos valores observados a dividir pelo número das observações.

7 - Variância amostral

Uma medida de dispersão.

É a soma dos quadrados dos desvios das observações relativamente à sua média , a dividir pelo número das observações (n) menos um. Este valor do denominador resulta do facto de só existirem n-1 itens independentes no conjunto $\{z_i - \bar{z}\}$.

A variância da média das observações é a medida adequada da incerteza de um reultado de medição, ao contrário da variância das observações individuais.
A variância da média aritmética de uma série de n observações independentes é dada por $\sigma^2(\bar{z}) = \frac{\sigma^2(z_i)}{n}$ e é estimada pela variância experimental da média. $s^2(\bar{z}) = \frac{s^2(z_i)}{n}$

8 - Desvio padrão

A raíz quadrada da variância.

9 - Nível de confiança

O valor da probabilidade associada com um intervalo de confiança ou intervalo de cobertura estatístico.
Esse valor é normalmente designado por $(1-\alpha)$ e expresso frequentemente em percentagem.
Por exemplo: Nível de confiança a 90%

10 - Intervalo de cobertura estatístico.

Intervalo para o qual pode ser dito, com um dado nível de confiança, que este contém pelo menos uma porção especificada da população.

11 - Graus de liberdade

De uma maneira geral é o número de termos numa soma, menos o número de restrições nos termos da soma.

12 - Valor esperado

É determinado estatisticamente pela média de n observações independentes z_i da variável aleatória z.

13 - Covariância

A covariância de duas variáveis aleatórias y e z é a medida da sua dependência mútua.
É designada por cov(y, z) e pode ser estimada por s(y_i , z_i) que se obtém a partir de n pares independentes de observações simultâneas y_i e z_i .

$$s(y_i, z_i) = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})(z_i - \bar{z})$$

A covariância estimada das duas médias $\bar{y}$ e $\bar{z}$ é dada por $s(\bar{y},\bar{z}) = \frac{s(y_i, z_i)}{n}$

14 - Coeficiente de correlacção

Uma medida da dependência mútua relativa de duas variáveis.
É igual ao quociente entre as suas covariâncias e a raíz quadrada do produto das suas variâncias. Situa-se no intervalo [-1,1] e é mais utilizado do que as covariâncias.

15 - Independência

Duas variáveis aleatórias são estatisticamente independentes se a sua probabilidade conjunta é o produto das suas distribuições de probabilidade individuais.
Se duas variáveis aleatórias são independentes, a sua covariância bem como o seu coeficiente de correlação são zero. Porém o contrário não é necessariamente verdadeiro.

GRANDEZAS DE ENTRADA CORRELACIONADAS

Se duas grandezas de entrada X_i e X_k estão correlacionadas - i.e. se são dependentes uma da outra, num ou noutro sentido- a covariância estimada das duas estimativas x_i e x_k

$$u(x_i , x_k) = u(x_i)\, u(x_k)\, r(x_i , x_k) \qquad (i \neq k) \qquad (1)$$

tem de ser considerada como uma contribuição adicional para a incerteza. O grau de correlação é caracterizado pelo coeficiente de correlação $r(x_i , x_k)$
(onde $i \neq k$ e $-1 \leq r \leq 1$).

No caso de *n* pares independentes de observações repetidas simultaneamente , de duas grandezas P e Q, a covariância experimental de $\bar{p}$ e $\bar{q}$ é dada por :

$$s(\bar{p},\bar{q}) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{j=1}^{n} (p_j - \bar{p})(q_j - \bar{q}) \qquad (2)$$

e r pode ser calculado por substituição a partir da equação (1).

Para as grandezas de influência qualquer grau de correlação tem de ser baseado na experiência. Quando existe correlação, a equação 11 do capítulo 2 secção 3.4.1 tem de ser substituida por:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^{N} c_i^2 u^2(x_i) - 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{k=i+1}^{N} c_i c_k u(x_i , x_k) \qquad (3)$$

onde c_1 e c_k são os coeficientes de sensibilidade, ou por:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^{N} u_i^2(y) - 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{k=i+1}^{N} u_i(y) u_k(y) r(x_i , x_k) \qquad (4)$$

com as contribuições $u_i(y)$ para a incerteza padrão da estimativa de saída y resultante da incerteza padrão da estimativa de entrada x_i dada pela equação 12 capítulo 2 secção 3.4.1. Note-se que a segunda parcela na equação (3) ou (4) pode tornar-se de sinal negativo.

Na práctica, as grandezas de entrada estão muitas vezes correlacionadas porque são utilizados na avaliação dos seus valores o mesmo padrão físico, o mesmo instrumento de medição, os mesmos dados de referência, ou até o mesmo método de medição, tendo estes uma incerteza significativa.Sem perda de generalidade, supondo que duas

grandezas de entrada X_1 e X_2 estimadas por x_1 e x_2 dependem de um conjunto de variáveis independentes Q_l (l = 1,2,..,L)

$$X_1 = g_1 (Q_1 , Q_2 ,..,Q_L)$$
$$X_2 = g_2 (Q_1 , Q_2 ,..,Q_L) \qquad (5)$$

Apesar de algumas destas variáveis não terem necessariamente de aparecer em ambas as funções, as estimativas x_1 e x_2 das grandezas de entrada estarão correlacionadas em algum grau, mesmo que as estimativas q_l (l = 1,2,..,L) sejam não-correlacionadas. A covariância estimada $u(x_1 , x_2)$ associada com x_1 e x_2 é dada por

$$u(x_1, x_2) = \sum_{l=1}^{L} c_{1l}\, c_{2l}\, u^2 (q_l) \qquad (6)$$

onde c_{1l} e c_{2l} são os coeficientes de sensibilidade derivados das funções g_1 e g_2 em analogia com a equação (13) capítulo 2 secção 3.4.2. Uma vez que apenas contribuem para a soma os termos em que $\frac{\partial g_2}{\partial q_l} \neq 0$ e $\frac{\partial g_2}{\partial q_l} \neq 0$ para um dado l, então a covariância é zero se nenhuma variável for comum às funções g_1 e g_2 . O coeficiente de correlação estimado r (x_1 , x_2) associado às estimativas x_1 , x_2 é determinado a partir da equação (6) juntamente com a equação (1).

O exemplo seguinte demonstra a correlação que existe entre valores atribuidos a dois padrões que são calibrados com o mesmo padrão de referência.

Problema de medição:
Os dois padrões X_1 e X_2 são comparados com o padrão de referência Q_R através de um sistema de medição capaz de determinar a diferença de valores Δx com uma incerteza padrão associada u (q_R).

Modelo matemático:
As estimativas x_1e x_2 dependem do valor q_R do padrão de referência e das diferenças observadas Δx_1 e Δx_2 de acordo com as relações

$$x_1 = q_R - \Delta x_1$$
$$x_2 = q_R - \Delta x_2 \qquad (7)$$

Incertezas padrão e covariâncias
As estimativas Δx_1 , Δx_2 e q_R são supostas não estarem correlacionadas porque foram determinadas em diferentes medições. As incertezas padrão são calculadas a partir da equação 15 capítulo 2 secção 3.4.4 e a covariância associada às estimativas x_1 e x_2 é calculada a partir da equação (6) , assumindo que $u(\Delta x_1) = u(\Delta x_2) = u(\Delta x)$,

$$u^2 (x_1) = u^2 (q_R) + u^2 (\Delta x)$$
$$u^2 (x_2) = u^2 (q_R) + u^2 (\Delta x) \qquad (8)$$

$$u^2 (x_1, x_2) = u^2 (q_R)$$

O coeficiente de correlação deduzido destes resultados é:

$$r(x_1, x_2) = \frac{u^2 (q_R)}{u^2 (q_R) + u^2 (\Delta x)} \qquad (9)$$

Os seus valores de 0 até 1 dependem do rácio das incertezas padrão $u(q_R)$ e $u(\Delta x)$.

Parte A

Valores de k_p que correspondem ao nível de confiança *p* (%)

	Factor de expansão k		
Nível de confiança p	**Normal ***	**Rectângular ****	**t - Student *****
68,27	1	1,183	1
90	1,645	1,559	1,645
95	1,960	1,645	1,960
95,45	2	1.653	2
99	2,576	1,715	2,576
99,73	3	1,727	3

* Assumindo que uma variável Y é descrita por uma distribuição Normal com valor esperado μ_Y e desvio padrão σ .

Ex: Para obter um intervalo [y - k u , y + k u] com um nível de confiança p=68.27% .
é necessário que:

$P(\mu_Y - k\sigma \le Y \le \mu_Y + k\sigma) = p$
$F(\mu_Y + k\sigma) - F(\mu_Y - k\sigma) = 0{,}6827 \Rightarrow k=1$

** Assumindo que uma variável Y é descrita por uma distribuição Rectangular com valor esperado μ_Y e desvio padrão $\sigma = a/\sqrt{3}$, onde **a** é metade do intervalo [0 , 2a].

Ex: Para obter um intervalo [y - k u , y + k u]. com um nível de confiança p=68.27% .
é necessário que:

$P(\mu_Y - k\sigma \le Y \le \mu_Y + k\sigma) = p$

$F(\mu_Y + k\sigma) - F(\mu_Y - k\sigma) = p$ sendo $F(Y) = y / 2a$

$\Leftrightarrow F(a + ka/\sqrt{3}) - F(a - ka/\sqrt{3}) = p$

$$\Leftrightarrow \frac{a + ka/\sqrt{3}}{2a} - \frac{a - ka/\sqrt{3}}{2a} = p$$

$$\boxed{k = p \times \sqrt{3}}$$

As diferenças encontradas entre as duas distribuições (* e **) devem-se ao facto de a distribuição rectangular ser mais "estreita" que a normal, ou seja não possuir "caudas" e ter uma extensão finita e bem delimitada.

*** Assumindo que uma variável Y é descrita por uma distribuição t com ∞ graus de liberdade.
Verifica-se que à medida que os graus de liberdade $(\nu) \rightarrow \infty$, a distribuição t se aproxima da normal padronizada. Aliás o factor de expansão k para uma distribuição t pode ser obtido em função do k correspondente à distribuição normal, tendo em conta os graus de liberdade:

$$k_p^{***} = t_p(\nu) \approx (1 + 2/\nu)^{1/2} \; k_p^{*}$$

Parte B

Coeficientes de Expansão determinados a partir de Graus de Liberdade Efectivos

Supondo que a variável Y segue uma distribuição normal $Y \rightarrow N(\mu_Y , \sigma^2)$, então a variável $Z= (Y-\mu_Y)/\sigma$ segue também uma distribuição normal (padronizada) .

Porém, tudo o que se dispõe na prática são estimativas.

Assim, recorre-se à variável $(\overline{Y} - \mu_Y) / s(\overline{Y}) = (y - \mu_Y) / u(y)$, que segue aproximadamente uma distribuição t , com ν_{ef} graus de liberdade obtidos a partir da fórmula de Welch-Satterhwaite:

$$\nu_{ef} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^{N} \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}}$$

onde $u_i(y)$ são as contribuições para a incerteza padrão da estimativa de saída y e $_i$ são os graus efectivos de liberdade dessas componentes ($u_i(y)$) da incerteza padrão.

Para obter um intervalo [y - k u , y + k u] com um nível de confiança **p**, é necessário determinar o valor da distribuição t correspondente aos ν_{ef} calculados pela fórmula anterior. Isto pode ser feito recorrendo à tabela da página seguinte.
O valor $\mathbf{t(\nu_{ef})}$ obtido é então o factor de expansão **k** a utilizar.

Ou seja:

$$U_p = k_p\, u(y) = t_p\, (\nu_{ef})\, u(y)$$

A avaliação da incerteza expandida $\mathbf{U_p}$ a partir de **u(y)**, ν_{ef} e factor $\mathbf{t_p\ (\nu_{ef})}$ constitui uma aproximação e tem as suas limitações. Assim a variável $(y - \mu_Y) / u(y)$ segue a distribuição **t** apenas se :
- a variável Y segue uma distribuição Normal
- a estimativa y e a sua incerteza padrão combinada são independentes e
- a distribuição de $u^2(y)$ é uma qui-quadrado (χ^2)

Graus de liberdade (ν)	Probabilidade p (%)					
	68.27	90	95	95.45	99	99.73
1	1.84	6.31	12.71	13.97	63.66	235.77
2	1.32	2.92	4.30	4.53	9.92	19.21
3	1.20	2.35	3.18	3.31	5.84	9.22
4	1.14	2.13	2.78	2.87	4.60	6.62
5	1.11	2.02	2.57	2.65	4.03	5.51
6	1.09	1.94	2.45	2.52	3.71	4.90
7	1.08	1.89	2.36	2.43	3.50	4.53
8	1.07	1.86	2.31	2.37	3.36	4.28
9	1.06	1.83	2.26	2.32	3.25	4.09
10	1.05	1.81	2.23	2.28	3.17	3.96
11	1.05	1.80	2.20	2.25	3.11	3.85
12	1.04	1.78	2.18	2.23	3.05	3.76
13	1.04	1.77	2.16	2.21	3.01	3.69
14	1.04	1.76	2.14	2.20	2.98	3.64
15	1.03	1.75	2.13	2.18	2.95	3.59
16	1.03	1.75	2.12	2.17	2.92	3.54
17	1.03	1.74	2.11	2.16	2.90	3.51
18	1.03	1.73	2.10	2.15	2.88	3.48
19	1.03	1.73	2.09	2.14	2.86	3.45
20	1.03	1.72	2.09	2.13	2.85	3.42
21	1.02	1.72	2.08	2.13	2.83	3.40
22	1.02	1.72	2.07	2.12	2.82	3.38
23	1.02	1.71	2.07	2.11	2.81	3.36
24	1.02	1.71	2.06	2.11	2.80	3.34
25	1.02	1.71	2.06	2.11	2.79	3.33
26	1.02	1.71	2.06	2.10	2.78	3.32
27	1.02	1.70	2.05	2.10	2.77	3.30
28	1.02	1.70	2.05	2.09	2.76	3.29
29	1.02	1.70	2.05	2.09	2.76	3.28
30	1.02	1.70	2.04	2.09	2.75	3.27
31	1.02	1.70	2.04	2.08	2.74	3.26
32	1.02	1.69	2.04	2.08	2.74	3.25
33	1.02	1.69	2.03	2.08	2.73	3.24
34	1.01	1.69	2.03	2.08	2.73	3.24
35	1.01	1.69	2.03	2.07	2.72	3.23
45	1.01	1.68	2.01	2.06	2.69	3.18
50	1.01	1.68	2.01	2.05	2.68	3.16
100	1.01	1.66	1.98	2.03	2.63	3.08
∞	1	1.645	1.960	2.000	2.576	3.000

Tabela 2 -Valores de $t_p(\nu)$ da distribuição t com ν graus de liberdade.

I - UNIDADES

As unidades usadas para a incerteza devem ser iguais às unidades usadas no resultado.
Exemplo: (3,97±0,0055) mm

Pode-se no entanto, usar incertezas relativas (%,ppm,etc.) desde que claramente identificadas e referentes ao resultado de medição.
Exemplo: incerteza expandida relativa U / |y| = ±0,14%

Quando se referem as unidades, estas devem pertencer ao sistema S.I.,ou seja:

Grandeza	Unidade	
	Designação	Símbolo
Comprimento	metro	m
Massa	quilograma	kg
Tempo	segundo	s
Corrente eléctrica	ampere	A
Temperatura termodinâmica	kelvin	K
Quantidade de matéria	mole	mol
Intensidade luminosa	candela	cd

Tabela 3 - Unidades base do sistema internacional (S.I.)

Estas unidades podem no entanto ser utilizadas com os seus múltiplos e submúltiplos:

Ordem	10^{24}	10^{21}	10^{18}	10^{15}	10^{12}	10^{9}	10^{6}	10^{3}	10^{2}	10^{1}
Prefixo	Y	Z	E	P	T	G	M	k	h	da

Ordem	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}	10^{-15}	10^{-18}	10^{-21}	10^{-24}
Prefixo	d	c	m	μ	n	p	f	a	z	y

Tabela 4 - Múltiplos e submúltiplos das unidades S.I.

II - ALGARISMOS SIGNIFICATIVOS

O valor numérico da **incerteza** de medição deve ser apresentado **no máximo com dois algarismos significativos**.

São considerados algarismos significativos (a.s.) todos aqueles que constam na expressão de um número excepto os zeros que se encontram apenas à esquerda de outros algarismos.
Exemplo:

2,345 → 4a.s.
0,0003 → 1a.s.
640 → 3a.s.
0,070 → 2a.s.
$1{,}20 \times 10^2$ → 3a.s.

Assim sendo, os valores 1,1 μm e 0,03 g podem exprimir correctamente a incerteza já que apresentam 2 e 1 a.s. respectivamente.

O valor numérico do resultado de medição deve ser consistente com o valor da sua incerteza associada.

Neste sentido, y deve ser **arredondado** (ver III) na sua expressão final **até ao algarismo menos significativo do valor da incerteza.**

Entende-se como algarismo menos significativo (a.m.s.) aquele que se situa mais à direita.
Exemplo:

2,35 → a.m.s.: 5
0,070 → a.m.s.: 0

Assim , se se obteve y=54,8760 mm e U=3 μm, então o a.m.s. de U é 3 - correspondente ao micron. Logo, y não poderá apresentar nenhum algarismo de ordem inferior ao micron. Verifica-se então que terá de se retirar na expressão de y o zero à direita.
Obtém-se: (54,876±0,003) mm

III - ARREDONDAMENTOS

O arredondamento a efectuar na expressão de y deve seguir as regras gerais de arredondamentos.

Basicamente se se pretender arredondar um número para a ordem **n**, há que analisar o algarismo (x) de ordem **n+1** que pode estar numa das situações:
a) x<5 , manter.o algarismo de ordem n
b) x>5 , acrescentar uma unidade ao algarismo de ordem n
c) x=5 e não existe mais nenhum algarismo à sua direita (se existir segue a regra de b))

- se o algarismo de ordem n é par, manter o algarismo de ordem n
- se o algarismo de ordem n é ímpar, acrescentar uma unidade ao algarismo de ordem n.

Exemplo:

arredondar ao milímetro (ordem n) os seguintes números:

a) 65,10349 m
   Como x=4, fica 65,103 m
b) 65,10371 m
   Como x=7, fica 65,104 m
c) 65,10351 m
   Como x=5, mas existe ainda um algarismo à sua direita, fica 65,104 m
d) 65,1035 m
   Como x=5, mas o algarismo anterior é ímpar, fica 65,104 m
e) 65,1025 m
   Como x=5, mas o algarismo anterior é par, fica 65,102 m

O arredondamento a efectuar na expressão de **U** deve ser feito preferencialmente por excesso, excepto nos casos onde pareça evidente que seja feito por defeito.

Entende-se arredondar por excesso quando independentemente do caso se acrescenta uma unidade ao algarismo correspondente à ordem para a qual se pretendia arredondar.
Ex: arredondar à décima do micron o valor: 3,12 μm.
Segundo as regras normais obter-se-ia 3,1 μm. Por excesso obtém-se 3,2 μm.
Porém, perante um resultado de 3,101 μm parece evidente que o arredondamento seja feito por defeito, obtendo-se 3,1 μm.

NOTA: Em **cálculos intermédios** não convém que se sigam rigorosamente as regras anteriormente referidas, sendo permitido trabalhar com um número de algarismos superior ao necessário. Evitam-se assim erros resultantes da acumulação de arredondamentos.

III

Incertezas em C.M.G.Q.

O guia anterior (capítulo II) não entra em consideração com detalhes específicos de muitas das aplicações das medições. É por isso necessário adaptar e especificar tudo o que foi anteriormente referido, aos processos e circunstâncias particulares das calibrações realizadas no Laboratório de Metrologia e Calibração.

Neste capítulo pretende-se passar em revista os pontos essenciais ao cálculo das incertezas e então discutir e justificar todas as decisões tomadas em cada um deles.

Pretende-se também que este capítulo auxilie a pôr em práctica os procedimentos apresentados em anexo, que são a aplicação do cálculo da incerteza às calibrações deste laboratório.

1 - DECISÕES TOMADAS EM C.M.G.Q.

(NA AVALIAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DA INCERTEZA NAS CALIBRAÇÕES)

1.1 - Fontes de incerteza

De todas as fontes de incerteza vistas no cap.II secção 2.4, apenas serão consideradas aquelas para as quais se dispõe de informação suficiente ou se possuem aproximações minimamente credíveis.
Na elaboração de cada um dos procedimentos -a apresentar em anexo- foi feita uma pesquisa de quais os factores que poderiam contribuir para a incerteza, tendo em conta o processo de calibração e as circunstâncias em que decorria. Numa primeira abordagem efectuaram-se os cálculos de acordo com as fontes identificadas. Posteriormente analisaram-se os resultados obtidos para saber até que ponto se poderiam desprezar as contribuições de algumas dessas fontes, não esquecendo que se está a lidar com um laboratório secundário e não acreditado.

Serão apresentadas em seguida todas as fontes identificadas nos vários procedimentos e também o modo de calcular as suas contribuições. Acrescenta-se ainda, para eventual consulta, o nome de um procedimento onde cada uma tenha sido identificada.

Variação nas observações repetidas da mensuranda sob condições aparentemente idênticas.

É dada pelo desvio padrão experimental da média aritmética das leituras efectuadas.

$$u(\bar{q}) = s(\bar{q}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)}\sum_{j=1}^{n}(q_j - q)}$$

➢ Procedimento: *Qualquer um*

Nos instrumentos cuja calibração requer o teste da exactidão da escala, é necessário efectuar **n** observações em cada ponto dessa escala. Supondo que existem **m** pontos, obtêm-se m valores para $u(\bar{q})$. Por uma questão de segurança, desses m valores **apenas se considera o maior** como contribuição para a incerteza.
Ex: Procedimento *"Paquímetros"*

Padrões ou **equipamentos** utilizados.

A incerteza é obtida a partir da análise dos certificados de calibração onde consta a incerteza expandida desses padrões ou equipamentos.

- Se é afirmado que a incerteza expandida é expressa como um múltiplo de um desvio padrão, a incerteza padrão obtém-se dividindo o valor expresso pelo factor de expansão dado (k).

  Ex:
  Certificado de calibração:
  "Resultado da medição: 29 mm
  Incerteza expandida da calibração: ± 6,6 μm.
  Incerteza obtida pela multiplicação do desvio padrão pelo factor k=2."

  A incerteza padrão obtém-se de: (6,6 μm) / 2 = 3.3 μm
  A incerteza padrão relativa é: (3,3 μm) / (29 x 10^3 μm) = 1,14 x 10^{-4}

- Se for apresentado o nível de confiança do intervalo associado à incerteza expandida, assume-se que a distribuição é normal (caso nada seja dito em contrário) e consulta-se a tabela do apêndice II-3 parte A.
  A incerteza padrão obtém-se dividindo o valor da incerteza expandida pelo factor de expansão apresentado na tabela.

  Ex:
  Certificado de calibração:
  "Resultado da medição: 29 mm
  Incerteza expandida da calibração: ± 6,6 μm.
  A incerteza de 6,6 μm define um intervalo com um nível de confiança de 90%"

  A incerteza padrão obtém-se por: (6,6 μm) / 1,645 = 4,01 μm
  A incerteza padrão relativa é: (4,01 μm)/(29 x 10^3 μm) = 1,38 x 10^{-4}

➢ Procedimento: *Qualquer um*

Quando existem vários instrumentos calibradores utilizados separadamente durante a calibração, entra-se com a maior incerteza padrão encontrada.
Isto acontece frequentemente na situação descrita a propósito da fonte anterior, ou seja quando se testa a exactidão da escala.de um instrumento. As observações em cada ponto dessa escala nem sempre são realizadas com o mesmo instrumento calibrador. Por uma questão de segurança, de todas as incertezas padrão encontradas **apenas se considera a maior** como contribuição para a incerteza devida a esta fonte.
Ex: Procedimento *"Micrómetros"* em que nos vários pontos do fuso micrométrico se recorre a blocos padrão com diferentes incertezas.

Quando existem vários instrumentos calibradores utilizados em simultaneo na medição de uma grandeza, consideram-se todas as incertezas padrão desses instrumentos como contribuição para a incerteza devida a esta fonte.
Ex: Procedimento *"Calibres roscados exteriores"* em que na medição do diâmetro de flancos se recorre em simultâneo a um micrómetro exterior e a um conjunto de cavilhas.

Resolução do instrumento a calibrar

A resolução de um instrumento implica que exista um intervalo de sinais de entrada que, apesar de serem diferentes, originam todos a mesma indicação no dispositivo indicador do instrumento.
Por isso, mesmo que as observações repetidas fossem todas idênticas ($u(\bar{q})=0$), a incerteza da medição não era zero.
Se a resolução for dada por ∂x, o valor do estímulo que produz a indicação **x** encontra-se com igual probabilidade no intervalo $[x-\partial x/2 , x+\partial x/2]$.
Pode-se então assumir que esses estímulos são descritos por uma distribuição rectangular.
Logo, $u^2 = (\partial x)^2/12$

O V.I.M. [3] define "resolução" como sendo "a menor diferença entre indicações de um dispositivo indicador que se podem distinguir significativamente".
O valor a atribuir a ∂x pode então ser determinado das seguintes formas:

- No caso dos instrumentos digitais, e de acordo com a nota 1 da mesma definição, ∂x é dado pela diferença de indicação que corresponde à alteração de uma unidade do algarismo menos significativo do dispositivo indicador.
  Ex: se o dispositivo indicador mostra 30,5 μm , ∂x =0,1μm
  ➢ Procedimento: *Paquímetros (digitais)*

- No caso dos instrumentos analógicos, e tirando partido da nota 2 "o conceito aplicado a dispositivos analógicos pode corresponder a uma estimativa", distinguem-se duas situações:

  a) instrumentos nos quais não é perceptível qualquer espaço físico entre indicações. É o caso da calibração de paquímetros com nónio em que se faz a coincidência entre dois traços. Neste caso ∂x é a própria resolução indicada no aparelho.

  b) instrumentos nos quais é perceptível um espaço significativo entre indicações. Pode-se por isso subdividir esse espaço em tantas divisões quantas as que se consigam distinguir significativamente, de acordo com a definição de resolução. Passa-se a ter uma resolução estimada.

  Ex_1: Instrumentos com mostrador tipo relógio.
  Decidiu-se nestes casos que a resolução estimada é obtida a partir da espessura do ponteiro do mostrador.
  Se por exemplo um ponteiro tiver cerca de 0,2 μm de espessura e se o intervalo físico entre duas divisões for de 1.6 mm, a resolução estimada será de (0.2/1.6) x Resolução real do instrumento.
  ≥Procedimento: *Comparadores.*

  Ex_2: Instrumentos com escala tipo régua .
  Decidiu-se nestes casos que a resolução estimada é dada pela espessura do traço da escala.
  ≥Procedimento:*Réguas.*

Coeficiente de expansão linear

Tomou-se como constantes os coeficientes de expansão linear dos materiais com os quais são feitos os instrumentos. Praticamente todos os instrumentos deste laboratório são feitos de aço. Consultou-se por isso um manual [1] que atribui uma incerteza de $\pm 2 \times 10^{-6}$ °C ao coeficiente de expansão térmica do aço ($11{,}5 \times 10^{-6}$ °C). Assume-se que esse valor da incerteza representa os limites de uma distribuição rectangular e calcula-se a contribuição para a incerteza através da fórmula $u=(2 \times 10^{-6}\,°C^{-1})/\sqrt{3} = 1{,}2 \times 10^{-6}\,°C^{-1}$

≥ Procedimento: *Calibre tampão liso.*

Temperatura do laboratório

A temperatura de referência do laboratório é, tal como visto no cap.I-5.4.6.a), definida por (20±1)°C em que o desvio máximo (Δ =1°C) representa a

amplitude de uma variação aproximadamente cíclica da temperatura. Esta variação cíclica produz uma distribuição em forma de U, resultando uma incerteza padrão:

$$u(\Delta) = 1°C/\sqrt{2} = 0{,}707°C$$

➢ Procedimento:*Qualquer um.*

Termómetro utilizado no laboratório

A decisão de proceder ou não à calibração está dependente, tal como visto no cap.I - 5.4.6.a), do valor da temperatura lida no termómetro. A incerteza do termómetro dá uma ideia da credibilidade da leitura efectuada se encontrar efectivamente dentro do intervalo 20±1°C. O valor da temperatura não vai apenas determinar se se procede ou não à calibração, mas será também utilizado nos cálculos que envolvem correcções provocadas por dilatação ou contracção de materiais. Quando tal acontecer, o valor da temperatura deve ser acompanhado da sua incerteza considerando-se actualmente como tendo uma única componente: a incerteza do termómetro que a mediu.
O processo de obtenção desta incerteza é análogo ao dos padrões, ou seja faz-se a partir da análise do certificado de calibração do termómetro.

➢Procedimento:*Qualquer um.*

Histerese

Certos instrumentos sofrem de um fenómeno chamado histerese. Por este motivo as indicações dadas pelo instrumento, relativamente a um mesmo valor da grandeza a ser medida, diferem de um valor fixo consoante as sucessivas leituras foram efectuadas no sentido incremental ou decremental da escala.
Esse valor é determinado quando se faz a calibração dos instrumentos em causa e deve ser utilizado para uma correcção apropriada das leituras feitas.
Sabe-se que para um determinado valor da escala testado se podem obter valores que se distribuem (devido à histerese) com igual probabilidade no intervalo $[x-\partial x/2 , x+\partial x/2]$, sendo ∂x a maior diferença de valores encontrados nas sucessivas leituras quando efectuadas num sentido ou no sentido oposto.
Pode-se então assumir que esses valores são descritos por uma distribuição rectangular.
Logo, $u^2 = (\partial x)^2/12$

➢Procedimento: *Comparadores.*

As fontes apresentadas foram, na sua maioria, avaliadas segundo "Tipo B" (cap.II-3.3.2.2), embora a 1ª fonte tenha uma avaliação "tipo A". Neste último caso é imperativo definir o número de observações a realizar na prática, o que será feito em seguida.

1.2 - Número de observações

Das duas hipóteses consideradas aquando da avaliação da incerteza padrão do tipo A (capítulo II - 3.3.2.1), irá ser utilizada a que se baseia na variância experimental da média aritmética dos valores observados $s^2(q)$, uma vez que a estimativa combinada da variância (s_p^2) não é adoptável para o caso do nosso laboratório. Tal deve-se ao facto de o processo de calibração não estar sob control estatístico e o esforço necessário para que tal aconteça ultrapassa as possibilidades deste laboratório. Para além disso há que atender à vida limitada de cada instrumento, o que de certa maneira tornaria o esforço pouco recompensado e talvez pouco credível.

De qualquer forma é apresentado no apêndice III-1, uma aplicação prática do cálculo da incerteza a partir de 20 observações recorrendo ao conceito de (s_p^2).

Uma vez que se optou pela outra hipótese, é necessário definir o número de observações a efectuar em cada medição.

Como se sabe (cap.II 3.3.2.1.a)), o número de observações n deve ser suficientemente elevado para assegurar que $\bar{q}$ proporciona uma estimativa credível do valor esperado da variável aleatória **Q** e que $s^2(q)$ proporciona uma estimativa credível da variância de q. Por outro lado, à medida que o número de observações aumenta, os custos associados (mão-de-obra do operador, atrasos na obtenção dos resultados, ocupação do equipamento de calibração,...) tornam-se impraticáveis, sendo por isso necessário adoptar uma solução de compromisso.

Neste sentido **analisou-se a evolução da incerteza de $s^2(\bar{q})$ com o aumento do número de observações n**, admitindo-se que a distribuição de probabilidade de q é normal.

Com este pressuposto, a incerteza relativa de $s^2(\bar{q})$ é dada aproximadamente por $\left[\sqrt{2(n-1)}\right]^{-1}$, sendo a sua representação gráfica apresentada no apêndice III-2.

Verifica-se que a partir de 5 observações o decremento resultante é baixo e não varia consideravelmente. Este valor é ainda aceitável do ponto de vista económico, pelo que será adoptado.

↳ Nº de observações a efectuar nas calibrações de CMGQ : 5

Convém esclarecer que:

Nos instrumentos cuja calibração requer o teste da exactidão da escala, é necessário efectuar **n=5** observações **em cada ponto** dessa escala.

1.3 - Nível de confiança e Factor de expansão

Tal como visto no cap.II - 3.5.2, o valor do factor de expansão k é escolhido com base no nível de confiança requerido para o intervalo [y-U,y+U].

a) Nível de confiança

Apesar de se recomendar um nível de confiança de 95%, cada um pode aplicar o seu próprio nível de confiança. Obtém assim uma incerteza expandida que define um intervalo de confiança que satisfaz as suas necessidades específicas. No caso concreto do laboratório de metrologia e calibração de CMGQ, foi decidido trabalhar com um nível de confiança de 90%

↳ Nível de confiança utilizado em CMGQ : 90%

Admitindo este valor sabe-se à partida que há uma hipótese em 10 do valor da mensuranda Y se encontrar fora do intervalo pretendido.

b) Factor de expansão (k)

Tendo sido definido (em 1.2) que o número de observações a efectuar nas calibrações de CMGQ é de 5, passa-se a estar na situação descrita no cap.II-3.5.2, em que pelo menos uma das contribuições para a incerteza padrão da estimativa de saída é obtida a partir de uma avaliação do tipo A baseada em menos do que dez observações repetidas. Por este motivo e ainda de acordo com a mesma secção, u(y) tem uma credibilidade insuficiente, sendo necessário recorrer ao método baseado nos graus efectivos de liberdade para determinar o factor de expansão k.

De seguida será apresentada a metodologia de aplicação prática deste método.

c) Determinação de k a partir de graus de liberdade efectivos

1º- Determinar os graus de liberdade efectivos (ν_i) das componentes ($u_i(y)$).

➔ **Componentes que não dependem de outras componentes:**

a) Se forem calculadas a partir de séries de observações repetidas:

ν_i é obtido a partir do número (n) de observações repetidas e independentes, utilizadas para estimar a(s) grandeza(s) de entrada, tendo também em conta o número (m) de grandezas independentes determinadas a partir dessas observações. Então ν_i = n-m. No caso habitual em que só se determina uma grandeza de entrada , ν_i = n-1.

Ex:
O diâmetro de um calibre foi determinado recorrendo a 5 observações repetidas e independentes. Os graus de liberdade da componente $\bar{l}$ (média aritmética das leituras efectuadas) são dados por: $\nu_i = 5-1 = 4$.

b) Componentes da incerteza calculadas a partir de certificados, distribuições de probabilidade ou de outros dados disponíveis:

- Caso nada tenha sido dito no sentido de pôr em causa a credibilidade da incerteza padrão $u(x_i)$, assume-se como exactamente conhecida, ou seja que $\nu_i = \infty$.
  ν_i é também considerado ∞ nos casos em que nada é dito acerca dos graus de liberdade efectivos, nos certificados de calibração.

- No entanto, se em algum certificado for mencionada a credibilidade do valor de $u(x_i)$, ou se o conhecimento que se tem sobre $u(x_i)$ for tal que se considere necessário entrar com a sua credibilidade, então ν_i é estimado a partir de

$$\nu_i = \frac{1}{2}\left(\frac{\Delta\mu(x_i)}{\mu(x_i)}\right)^{-2}$$

em que $\dfrac{\Delta\mu(x_i)}{\mu(x_i)}$

é a incerteza relativa-medida da credibilidade do valor da incerteza

Ex:

Num certificado é dito que o valor da incerteza padrão ($u(x_i)$) de um componente tem uma credibilidade de 25%

Então, $\nu_i = \frac{1}{2}(0{,}25)^{-2} = 8$

- Caso ν_i esteja expresso no certificado de calibração, deve ser adoptado como tal.

➔ **Componentes obtidas a partir de outras componentes:**

O respectivo valor de ν_i é calculado de acordo com a fórmula apresentada no passo seguinte:

2º Estimar os graus de liberdade efectivos ν_{ef} da incerteza padrão u(y) da estimativa de saída y, a partir da fórmula de Welch-Satterhwaite:

$$\nu_{eff} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^{N} \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}}$$

onde $u_i(y)$ são as contribuições para a incerteza padrão da estimativa de saída y e ν_i são os graus efectivos de liberdade dessas componentes ($u_i(y)$) da incerteza padrão.

3º Se ν_{ef} não for um valor inteiro, deve-se truncá-lo para o inteiro mais próximo por defeito.

A partir desse valor obtém-se o factor de expansão **k** consultando a tabela apresentada em seguida. Esta tabela é baseada numa distribuição **t** , avaliada para um nível de confiança de **90%.**

G.lib. efect.	k	G.lib. efect.	k	G.lib. efect.	k	G.lib. efect.	k	G.lib. efect.	k
1	6,31	11	1,80	21	1,72	31	1,70	41	1,68
2	2,92	12	1,78	22	1,72	32	1,69	42	1,68
3	2,35	13	1,77	23	1,71	33	1,69	43	1,68
4	2,13	14	1,76	24	1,71	34	1,69	44	1,68
5	2,02	15	1,75	25	1,71	35	1,69	45	1,68
6	1,94	16	1,75	26	1,71	36	1,69	46	1,68
7	1,89	17	1,74	27	1,70	37	1,69	47	1,68
8	1,86	18	1,73	28	1,70	38	1,69	48	1,68
9	1,83	19	1,73	29	1,70	39	1,68	49	1,68
10	1,81	20	1,72	30	1,70	40	1,68	50	1,68

$50 < G.\ lib.efect. \leq 75 \Rightarrow k=1,67$
$75 < G.lib.efect. \leq 100 \Rightarrow k=1,66$
$G.lib.efect.>100 \Rightarrow k=1,645$

4º Para obter a incerteza expandida toma-se $\mathbf{k = t_{90}(\nu_{ef})}$ e calcula-se $\mathbf{U=k\ u_c(y)}$.

Nota: O método apresentado irá ser utilizado nas calibrações deste laboratório pelo menos numa primeira fase. Pode-se no entanto vir a provar com a prática e com o passar do tempo que os resultados obtidos para $t_{90}(\nu_{ef})$ nas diversas calibrações são muito idênticos. Se assim for, há a hipótese de reconsiderar esta metodologia e passar a utilizar um valor de k constante que reflita não só o nível de confiança exigido mas também o número de graus de liberdade que habitualmente se passou a encontrar.

1.4 - Declaração de Conformidade ou Não Conformidade

O problema de decidir se, após calibração, um instrumento deverá ser considerado "conforme" ou "não conforme" está intimamente ligado com a análise *Incerteza vs. Tolerância* abordada no cap.II-2.6.

Com base no que aí foi proposto ficou decidido que, depois de se obter a incerteza expandida, se seguem os seguintes passos:

❶ Análise da capacidade do processo de medição

Segue-se a metodologia proposta no cap.II- 2.6.2.
Caso se tenha obtido um valor para a "capacidade"≤0 procede-se de acordo com o que aí é sugerido.
Caso se tenha obtido um valor tal que 0< "capacidade"≤1 prossegue-se com o passo seguinte:

❷ Análise da conformidade do resultado com a sua especificação

Segue-se também a metodologia proposta no cap.II- 2.6.2.
O apêndice III-3 parte A ilustra esta análise e mostra também a representação gráfica do risco quando **y=L.I.+ k · u.**

Caso o resultado obtido na calibração (y) se encontre na:

Zona 1- Considera-se o instrumento não conforme

Zona 2- Considera-se o instrumento conforme.
Sabe-se que nesta situação se pode correr um risco máximo associado ao nível de confiança com que se obteve o valor de k. Como ficou assumido um nível de confiança de 90%, na pior hipótese corre-se um risco de 5% nos casos em que **y = L.I.+ k · u** ou **y = L.S. - k · u.**

Ou seja,

Nesta zona há 1 hipótese em 20 de se aceitar um instrumento que efectivamente não está conforme.

Zona 3- Analisa-se o risco de aceitar o instrumento.
Esta solução corresponde à 3ª solução proposta no cap.II- 2.6.2. onde se acrescenta ser necessário impôr um risco máximo admissível.
No caso concreto do laboratório de metrologia e calibração de CMGQ, foi decidido aceitar um risco máximo de 50%

↳ **Risco máximo aceite em CMGQ : 50%**

Ou seja:
Risco>50%- Considera-se o instrumento não conforme
Risco≤50%- Considera-se o instrumento conforme e exprime-se o valor do risco associado a esta decisão.
Uma vez que se assumiu que o resultado da medição segue uma distribuição normal -que é simétrica- corre-se um risco de 50% quando y coincide com L.I. ou com L.S. Consequentemente à esquerda de L.I.ou à direita de L.S. o risco é superior a 50%.

Caso se tenha obtido um valor de y tal que "risco≤50%" prossegue-se com o passo seguinte:

❸ Cálculo do valor do risco

Recorde-se que se assumiu que o resultado da medição segue uma distribuição normal $\mathbf{Y \rightarrow N(y,u(y))}$.
Fazendo $\mathbf{Z=(Y-y)/u(y)}$ obtém-se uma variável normal padronizada que segue a distribuição normal padronizada $\mathbf{Z \rightarrow N(0,1)}$.
Para efeitos de cálculo vai ser utilizada esta distribuição e ainda o valor de z':

$\mathbf{z'=(L.I.-y)/u(y)}$ se y se situa mais próximo de L.I. do que de L.S.
$\mathbf{z'=(L.S.-y)/u(y)}$ se y se situa mais próximo de L.S. do que de L.I.

O **risco** é dado pela **área** abaixo da cauda da representação da função densidade de probabilidade de Z, que fica à esquerda ou à direita de z' consoante y se situa mais próximo de L.I. ou de L.S., respectivamente.

Numericamente corresponde a:
$\mathbf{P(Z \leq z')=1-P(Z \geq z')}$ ou $\mathbf{P(Z \geq z')}$, respectivamente.

Os valores de $\mathbf{P(Z \geq z')}$ podem ser calculados a partir da tabela apresentada no apêndice III-4.

ATENÇÃO : Este método introduz uma certa discrepância entre o verdadeiro valor do risco (calculado a partir da distribuição t), e o valor obtido com a aproximação à distribuição Normal.
A discrepância é tanto maior quanto mais próximo das caudas se situar o resultado da medição. Tome-se em consideração o seguinte exemplo:

L.S.=20.030 mm
L.S.-U= 20.008 mm
u(y)=0.01019 mm

	Risco	
y	**Distribuição Normal**	**Distribuição t**
próximo da "cauda" Ex:20.009 mm	1.97%	5.4%
próximo do centro Ex:20.029 mm	46.1%	46.3%

Para tentar aproximar os dois valores aconselha-se a, sempre que y se situe próximo das caudas, arredondar por excesso o valor do risco para o múltiplo de 3 mais próximo.
Apesar das diferenças, julga-se ser actualmente a solução mais viável pois dificilmente se conseguiriam determinar os valores da distribuição t partir de tabelas.

Conclusão:

Localização de y	Risco	Decisão
< L.I. ou >L.S.	> 50%	Rejeitar
≥ L.I. e < L.I.+ U ou >L.S. -U e ≤ L.S.	> 5% e ≤ 50%	Aceitar exprimindo o risco
≥L.I.+ U e ≤L.S.-U	≤ 5%	Aceitar

O apêndice III-3 parte B ilustra graficamente o risco admitido em C.M.G.Q. em função da localização de y.

NOTAS:

✶ **Assumindo os mesmos valores para y, u(y) e nível de confiança e fazendo variar apenas o número de graus de liberdade com que é determinada u(y), conclui-se que:**

- O risco associado à decisão de "aceitar" y quando este se localiza nos pontos extremos y=L.I.+ k·u ou y=L.S.- k·u é sempre o mesmo. Daí a vantagem do método adoptado para a determinação de um factor k a partir de graus de liberdade efectivos. Uma vez definido um nível de confiança, o risco não depende do factor k mas sim do nível de confiança assumido já que k é ajustado em função dos graus de liberdade de y de modo a proporcionar sempre o mesmo nível de confiança.
- A capacidade do processo aumenta com o aumento do número de graus de liberdade. Quanto maior for o número de graus de liberdade, menor terá de ser o valor de k necessário para assegurar o nível de confiança imposto. Assim também será menor a amplitude da incerteza expandida e maior será a capacidade do processo já que é dada pelo quociente: **(T-2·U)/T**.

✶ **Nos instrumentos cuja calibração requer o teste da exactidão da escala, é impraticável fazer a análise da conformidade de cada ponto testado da escala com o critério de aceitação definido pela norma. Para além de impraticável é também desnecessário, já que não faz sentido possuir um instrumento que apenas esteja válido em alguns dos seus pontos.**

- Nos casos em que o critério de aceitação impõe um erro máximo admissível que se refere ao maior erro absoluto encontrado (caso dos paquímetros, réguas, etc.), opta-se por aplicar a análise anteriormente descrita apenas ao ponto que apresentou o maior erro absoluto em módulo.
- Nos casos em que o critério de aceitação impõe uma margem de desvio admissível que se refere ao módulo da maior diferença algébrica entre erros obtidos nos vários pontos independentemente dos seus erros absolutos (caso dos micrómetros), não se pode aplicar a análise anteriormente descrita apenas a um ponto mas sim a um intervalo

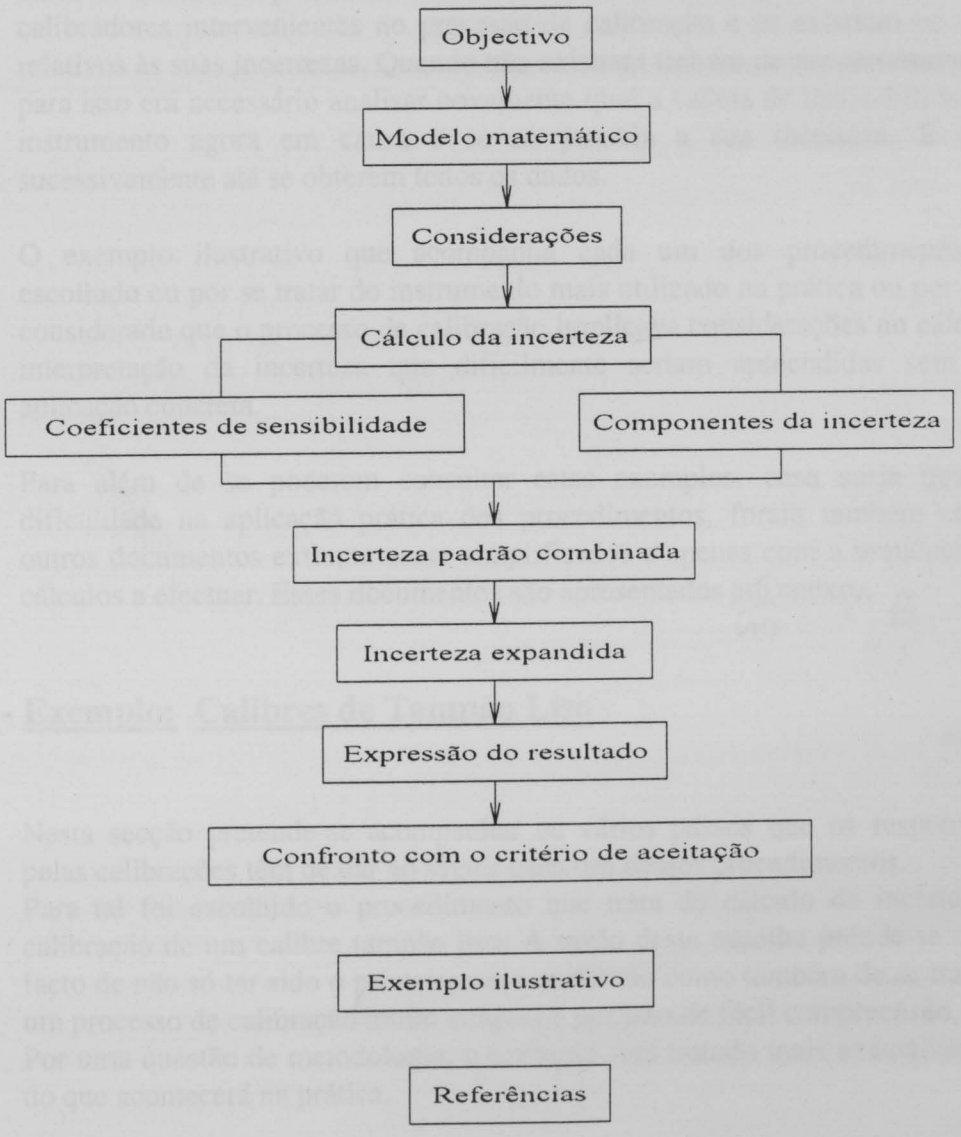
Estas abordagens são descritas mais pormenorizadamente no apêndice III-5.

2 - PROCEDIMENTOS DE CÁLCULO DA INCERTEZA

2.1 - Elaboração dos procedimentos

Depois de se terem tomado as decisões gerais e essenciais à avaliação prática da incerteza neste laboratório, foram criados procedimentos específicos de cálculo da incerteza na calibração dos diversos instrumentos.

Apesar de específicos os procedimentos têm em comum os pontos abordados:



Para diminuir o número de documentos e a duplicação de informação, agruparam-se sempre que possível vários instrumentos num mesmo procedimento.
Este agrupamento não seguiu nenhum critério rígido mas antes uma solução de compromisso que em cada caso reunisse instrumentos com um maior número de características comuns. Essas características podiam ser:

- os mesmos instrumentos calibradores
- a mesma mensuranda
- o mesmo processo de calibração
- as mesmas características físicas dos instrumentos a calibrar, etc.

Uma vez que cada procedimento incluía um exemplo de aplicação, a ordem de execução dos vários procedimentos não foi completamente aleatória, de modo a se respeitar a cadeia de rastreabilidade dos resultados das medições. Ou seja, antes de iniciar um procedimento foi necessário analisar quais os instrumentos calibradores intervenientes no processo de calibração e se existiam os dados relativos às suas incertezas. Quando não existiam tinham de ser determinadas e para isso era necessário analisar novamente qual a cadeia de rastreabilidade do instrumento agora em causa e se se possuia a sua incerteza. E assim sucessivamente até se obterem todos os dados.

O exemplo ilustrativo que acompanha cada um dos procedimentos foi escolhido ou por se tratar do instrumento mais utilizado na prática ou por se ter considerado que o processo de calibração implicava considerações no cálculo e interpretação da incerteza que dificilmente seriam apreendidas sem uma aplicação concreta.

Para além de se poderem consultar estes exemplos, caso surja qualquer dificuldade na aplicação prática dos procedimentos, foram também criados outros documentos extremamente simplificados e apenas com a sequência dos cálculos a efectuar. Esses documentos são apresentados em anexo.

2.2 - Exemplo: Calibres de Tampão Liso

Nesta secção pretende-se acompanhar os vários passos que os responsáveis pelas calibrações têm de dar ao seguir cada um desses procedimentos.
Para tal foi escolhido o procedimento que trata do cálculo da incerteza na calibração de um calibre tampão liso. A razão desta escolha prende-se com o facto de não só ter sido o primeiro caso analisado como também de se tratar de um processo de calibração muito simples e por isso de fácil compreensão.
Por uma questão de metodologia, o exemplo será tratado mais exaustivamente do que acontecerá na prática.

CALIBRES DE TAMPÃO LISO

1 - Objectivo:

Determinar o diâmetro do lado passa e do lado não passa do calibre e as suas incertezas associadas.
Submeter os valores obtidos aos critérios de aceitação.

2 - Modelo matemático:

$y = \ell\,(1+\alpha\theta)$ ou seja: $y = f(\ell,\alpha,\theta)$

ℓ : diâmetro do calibre, medido com micrómetro.
α : coeficiente de expansão térmica do calibre
θ : desvio da temperatura do calibre relativamente à temperatura de referência (20°C)

3 - Considerações:

- O modelo matemático proposto supõe que a dilatação dos contactos de medição do micrómetro é irrelevante, não havendo por isso necessidade de considerar a sua temperatura nem o seu coeficiente de expansão linear. É por isso **desprezável a incerteza da diferença dos coeficientes de expansão linear dos dois materiais em causa** (carboneto de tungsténio e aço) .

- Os instrumentos a calibrar bem como os instrumentos auxiliares de calibração estiveram a estabilizar no laboratório o tempo suficiente (24h tal como previsto no procedimento de calibração) de modo que a sua temperatura se pode assumir como sendo a mesma do laboratório na altura da calibração. É por isso **desprezável a incerteza da diferença das temperaturas entre os instrumentos** referidos.

- **A calibração só é efectuada quando a temperatura se situar entre 20±1°C.** Se não for esse o caso, procede-se à correcção da temperatura através do aparelho de ar condicionado.

- Actualmente a temperatura considerada na calibração é resultado de uma única observação. Existem duas razões para que tal aconteça:
  1ª A resolução do termómetro é de apenas 1°C, o que na prática significa que as leituras a efectuar seriam practicamente iguais.
  2ª O tempo gasto nas leituras bem como a necessidade de calcular a sua média aritmética implicariam custos superiores.

  Assim sendo, **não faz sentido considerar a repetibilidade da medição da temperatura como componente da incerteza.**

- Por outro lado, já que a decisão de proceder ou não à calibração está dependente do valor da temperatura lido no termómetro, julga-se de maior importância **entrar com a incerteza do próprio termómetro** dando uma ideia da credibilidade da leitura efectuada se encontrar efectivamente dentro do intervalo de 20±1°C .

- Não existem correlações entre ℓ, α e θ .

- ℓ é estimado por $\overline{\ell}$ que é a média aritmética de n=5 observações repetidas e independentes.

4 - Cálculo da incerteza:

4.1- Coeficientes de sensibilidade:

$$c_\ell = \frac{\partial f}{\partial \ell} = 1 + \alpha\theta = 1 + 11{,}5 \times 10^{-6} \circ C^{-1} \times \theta \approx 1$$

Como se pode assumir que a temperatura do calibre é a mesma que a temperatura ambiente, θ = desvio da temperatura ambiente relativamente à temperatura de referência e nunca poderá ser superior a 1°C.

$$c_\alpha = \frac{\partial f}{\partial \alpha} = \ell\theta$$

$$c_\theta = \frac{\partial f}{\partial \theta} = \ell\alpha = 11{,}5 \times 10^{-6} \times \ell$$

4.2- Componentes da incerteza:

a) Incerteza da medição do diâmetro u(ℓ)

- A incerteza expandida do micrómetro bem como o factor de expansão utilizado vêm expressos no seu certificado de calibração (ver [1]).A partir destes valores calcula-se a incerteza padrão associada: $\mathbf{u(\ell_m)}$.

- A incerteza padrão u($\overline{\ell}$) da estimativa de entrada $\overline{\ell}$ é o desvio padrão experimental da média aritmética das leituras efectuadas.

$$u(\overline{\ell}) = s(\overline{\ell}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{j=1}^{n} (\ell_j - \overline{\ell})}$$

Assim:

$$u(\ell) = \sqrt{u^2(\ell_m) + u^2(\bar{\ell})}$$

b) <u>Incerteza do coeficiente de expansão linear</u> u(α)

O coeficiente de expansão térmica do calibre é considerado como sendo o do aço ($11{,}5 \times 10^{-6}\ °C^{-1}$), com uma incerteza representada por uma distribuição rectangular com limites $\pm 2 \times 10^{-6}\ °C^{-1}$.
A incerteza padrão é dada por $u(\alpha) = (2 \times 10^{-6}\ °C^{-1})/\sqrt{3} = 1{,}2 \times 10^{-6}\ °C^{-1}$

c) <u>Incerteza do desvio de temperatura do calibre</u> u(θ)

- A temperatura de referência do laboratório é definida como (20±1)°C, em que o desvio máximo (Δ =1°C) representa a amplitude de uma variação aproximadamente cíclica da temperatura. Esta variação cíclica produz uma distribuição em forma de U, resultando uma incerteza padrão:

$$u(\Delta) = 1°C/\sqrt{2} = 0{,}707°C$$

- Há ainda a considerar a incerteza da medição da temperatura do calibre(=temperatura ambiente) relativamente à temperatura de referência. Considera-se que esta incerteza $\mathbf{u}(\bar{\theta})$ é a própria incerteza do termómetro utilizado, pelo que será necessário consultar o respectivo certificado de calibração (ver [1]).

Assim $u(\theta) = \sqrt{u^2(\Delta) + u^2(\bar{\theta})}$

4.3 - Incerteza padrão combinada: u (y)

$$\mathbf{u}^2(y) = c^2_{\ell}\, u^2(\ell) + c^2_{\alpha} u^2(\alpha) + c^2_{\theta}\, u^2(\theta) = u_1^{\,2}(y) + u_2^{\,2}(y) + u_3^{\,2}(y)$$

4.4 - Incerteza expandida de medição: U

A incerteza expandida será calculada de tal forma que assegure um intervalo com um nível de confiança de 90 %. A determinação de um factor de expansão k que produza esse intervalo é feita com base nos graus efectivos de liberdade. (ver [2]).

$U = k\,u(y)$

4.5 - Expressão do resultado

Deverão ser apresentados dois resultados, um para o lado passa e outro para o lado não passa, sob a seguinte forma:

(média das 5 observações ($\overline{\ell}$) ± incerteza expandida (U))
onde $\overline{\ell}$ e U estão expressos em mm.

É ainda necessário acrescentar o texto descrito em [3]

5 - Confronto com o critério de aceitação

Dever-se-á confrontar o intervalo definido por $\overline{\ell}$ ± U com o intervalo de valores que a norma respeitante a estes calibres sugere. (ver [4]).

6 - Exemplo ilustrativo:

Aplicado a um calibre (com uso) de diâmetro 16H8.

O procedimento que se segue diz respeito apenas ao lado passa do calibre, sendo igualmente aplicável ao lado não-passa.

Dados recolhidos:

-temperatura ambiente: 21°C

-5 medições efectuadas com micrómetro (mm):

16,003
16,003
16,003
16,003
16,002

-incerteza expandida do termómetro : 1°C com k=2.

-incerteza expandida do micrómetro: 1,3 µm com k=2.

Dados calculados:

-θ = 20°C -21°C = -1 °C

-incert.padrão do termómetro: 0,5°C

-incerteza padrão do micrómetro: 0,65 µm

-média das observações = 16002,8 µm

-desvio padrão = 0,447 µm

desvio padrão/$\sqrt{5}$ = 0,2 µm

Tabela resumo:

Componentes $u(x_i)$	Fonte de incerteza	$c_i = \partial f / \partial x_i$	Incerteza padrão $u(x_i)$	$u_i(y)= \lvert c_i \rvert u(x_i)$ (μm)	Contribuição de cada $u_i(y)$ %	Graus de liberdade efectivos
$\mathbf{u(\ell)}$	4.2.a)	1	0,68	0,68	94,722	535
$\mathbf{u(\ell_m)}$			0,650		91	∞
$\mathbf{u(\bar{\ell})}$			0,200		9	4
$\mathbf{u(\alpha)}$	4.2.b)	-16002,8	$1,2 \times 10^{-6}$	0,019	0,076	∞
$\mathbf{u(\theta)}$	4.2.c)	0,184	0,866	0,159	5,202	∞
$\mathbf{u(\Delta)}$			0,707		67	∞
$\mathbf{u(\bar{\theta})}$			0,500		33	∞

Incerteza padrão

$$u^2(y) = c^2_\ell u^2(\ell) + c^2\alpha u^2(\alpha) + c^2\theta u^2(\theta) = u_1{}^2(y) + u_2{}^2(y) + u_3{}^2(y) =$$
$$= (0,68)^2 + (0,019)^2 + (0,159)^2 = 0,488\mu m$$

$$u(y) = \sqrt{0,488} = 0,699\ \mu m$$

Graus de liberdade efectivos

$$\nu_{ef}(\ell) = \frac{u^4(\ell)}{\frac{u^4(\ell_m)}{\nu(\ell_m)} + \frac{u^4(\bar{\ell})}{\nu(\bar{\ell})}} = \frac{(0,680)^4}{\frac{(0,65)^4}{\infty} + \frac{(0,2)^4}{4}} = 534,5$$

$$\nu_{ef}(y) = \frac{u^4(y)}{\frac{u^4(\ell)}{\nu(\ell)} + \frac{u^4(\alpha)}{\nu(\alpha)} + \frac{u^4(\theta)}{\nu(\theta)}} = \frac{(0,699)^4}{\frac{(0,680)^4}{42,45} + \frac{(0,019)^4}{\infty} + \frac{(0,159)^4}{\infty}} = 596,02$$

$$\Rightarrow \nu_{ef} = 596$$

Pela tabela do capítulo III secção 1.3 c): $t_{90}(596) = 1,645$

Logo,

$$U_{90}(596) = t_{90}(596)\, u_C(\ell) = 1,645 \times 0,699\mu m = 1,15\mu m$$
$$\Rightarrow 1,2\ \mu m$$

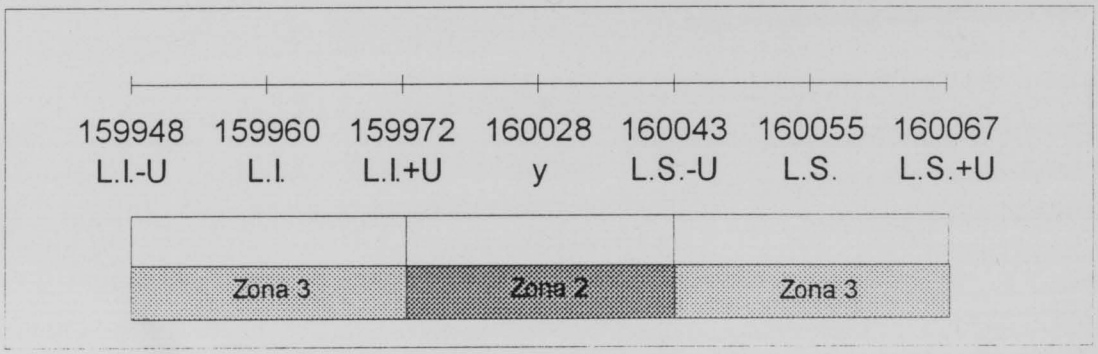
Resultado:

(16,0028 ± 0,0012) mm

A incerteza expandida de medição apresentada corresponde à incerteza padrão de medição multiplicada pelo factor de expansão k = 1,645 , calculado a partir da distribuição t com 596 graus de liberdade efectivos para se obter um nível de confiança de aproximadamente 90% . A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com o documento EAL-R2. A estabilidade de longo prazo do objecto não foi tomada em consideração.

Critério de aceitação

No caso do calibre em causa, de diâmetro 16H8, e segundo a respectiva norma, a tolerância é definida pelo intervalo [15,9960 ; 16,0055] mm .
(uma vez que não é um calibre novo.)



Conclusão:

❶ Análise da capacidade do processo de medição

Capacidade = (T-2xU)/T = (0,0095-2x0,0012)/0,0095 = 0,75

❷ Análise da conformidade do resultado com a sua especificação

O resultado obtido na calibração encontra-se na zona 2. Por isso o lado passa do calibre é dado como conforme.

Nota: Apesar de neste exemplo se ter incluído a componente u(α) tal não será feito na prática nem nos restantes procedimentos, uma vez que a sua contribuição percentual para u_c é insignificante.
Assim sendo, não será necessário entrar com a medição da temperatura ambiente nos cálculos efectuados. Porém, este valor continuará a ser registado.

Referências

[1] Capítulo III-1.1 "Como obter a incerteza padrão a partir de certificados"
[2] Capítulo III-1.3 c) "Como determinar k a partir de graus de liberdade efectivos"
[3] Capítulo II-4.2 e apêndice II-4 "Expressão da incerteza"
[4] Capítulo III-1.4 "Declaração de Conformidade ou Não-Conformidade"

BIBLIOGRAFIA:

[1] *Guia para a expressão da incerteza na medição*, publicado em 1995 sob a autoria do BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP e OIML.

[2] LAB / G06 - Guia para a aceitação de incertezas em laboratórios de calibração.

[3] Vocabulário Internacional de termos básicos e gerais em Metrologia (VIM) 2ª Edição, Maio de 1996.

[4] José António Sarsfield Cabral / Rui Campos Guimarães, Apontamentos de Estatística.

[5] Maria Teresa Restivo / Fernando Gomes Almeida, Apontamentos da disciplina de Instrumentação e Medida, capítulo "As medições e os Erros".

[6] Apontamentos do curso básico de metrologia dimensional, CATIM, Novembro de 1986.

[7] Instruções Operacionais internas sobre calibração dos vários instrumentos.

Apêndices do Capítulo III

Apêndices do Capítulo III

CÁLCULO DA INCERTEZA RECORRENDO AO CONCEITO DE VARIÂNCIA *POOLED* (S_P^2)

Chama-se à atenção que esta aplicação constitui apenas uma aproximação grosseira ao que poderia ser a realidade se se fizesse um controle estatístico do processo de calibração. Assim sabe-se à partida que o número de séries recolhido (N=4) não é o suficiente e que deveria ter abrangido um tempo tal que permitisse a ocorrência de causas assinaláveis de variação, o que também não aconteceu.
Pretende-se acima de tudo mostrar como aplicar na práctica este conceito de variância.

O processo de cálculo bem como as componentes da incerteza consideradas neste exemplo encontram-se justificadas no procedimento relativo aos calibres tampão liso (secção 2 do capítulo III). As medições referem-se ao diâmetro do lado passa do calibre.

Dados recolhidos:

temp.ambiente: 21°C

observações efectuadas em 4 amostras de 5 elementos cada (mm):

	16,002	16,003	16,003	16,002
	16,003	16,003	16,002	16,003
	16,002	16,003	16,003	16,003
	16,002	16,004	16,002	16,003
	16,003	16,002	16,003	16,003
Média	16,0024	16,003	16,0026	16,0028
Desvio padrão (mm)	0,000548	0,0007071	0,0005477	0,000447
G.Liberd.componentes	4	4	4	4

sp (µm)	0,57
sp/ $\sqrt{5}$ (µm)	0,255
G.Liberdade	16

incerteza global do termómetro: 1°C com k=2.

incerteza global do micrómetro: 1,3 µm com k=2.

Dados calculados:

incerteza padrão do termómetro: 0,5°C

incerteza padrão do micrómetro: 0,65 µm

Tabela resumo:

Componentes $u(x_i)$	$c_i = \partial f / \partial x_i$	Incerteza padrão $u(x_i)$	$u_i(l)=\|c_i\|u(x_i)$ (μm)	Contribuição de cada $u_i(l)$ %	Graus de liberdade
$u(\ell)$	1	0,394	0,394	0,857	90,94 **
$u(\ell_m)$		0,300		0,58	∞
$u(\overline{\ell})$		0,255		0,42	**16***
$u(\alpha)$	-16002,8	0,0000012	0,019	0,002	∞
$u(\theta)$	0,184	0,866	0,159	0,141	∞
$u(\Delta)$		0,707		0,67	
$u(\overline{\theta})$		0,500		0,33	

$u^2_c(\ell_c) = c^2_\ell u^2(\ell) + c^2_\alpha u^2(\alpha) + c^2_\theta u^2(\theta) = (0,394)^2 + (0,019)^2 + (0,159)^2 = 0,181\ \mu m$

$u_c = \sqrt{0,181} = 0,425\ \mu m$

* Ver capítulo II-3.3.2.1 b)

** Calculados da seguinte forma:

$$\nu_{eff}(\ell) = \frac{(u^2(\ell_1) + u^2(\overline{\ell}))^2}{\frac{u^4(\ell_1)}{\nu(\ell_1)} + \frac{u^4(\overline{\ell})}{\nu(\overline{\ell})}} = \frac{((0,3)^2 + (0,255)^2)^2}{\frac{(0,3)^4}{\infty} + \frac{(0,2)^4}{16}} = 90,94$$

Graus efectivos de liberdade da incerteza padrão da estimativa de saída:

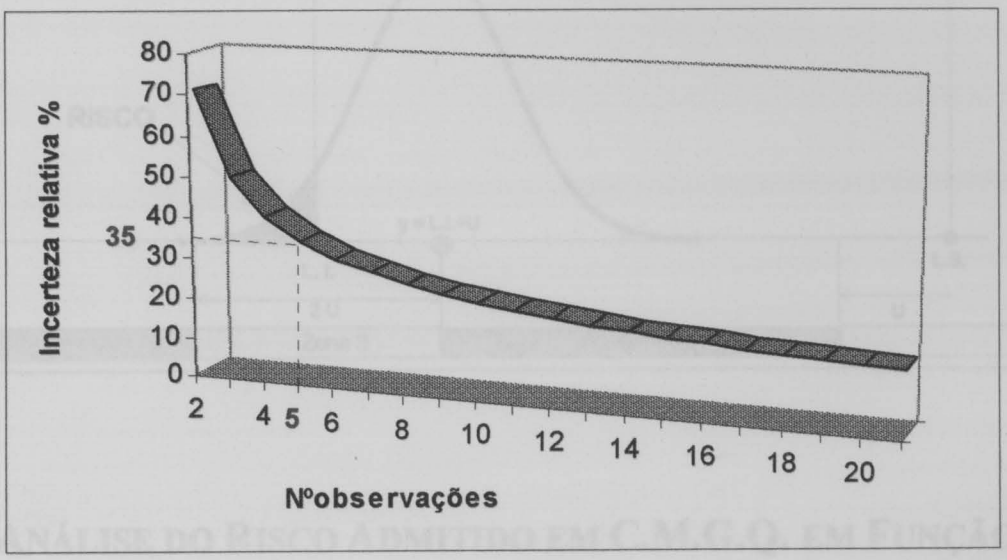
$$\nu_{eff} = \frac{(u^2(\ell) + u^2(\alpha) + u^2(\theta))^2}{\frac{u^4(\ell)}{\nu(\ell)} + \frac{u^4(\alpha)}{\nu(\alpha)} + \frac{u^4(\theta)}{\nu(\theta)}} = \frac{((0,857)^2 + (0,02)^2 + (0,163)^2)^2}{\frac{(0,857)^4}{90,94} + \frac{(0,02)^4}{\infty} + \frac{(0,163)^4}{\infty}} = 97,74$$

$$\Rightarrow \nu_{ef} = 97$$

Pela tabela do capítulo III secção 1.3 c): $t_{90}(97) = 1,66$

Logo, $U_{90}(97) = t_{90}(97)\, u_c(\ell) = 1,66 \times 0,425\mu m = 0,71\ \mu m$

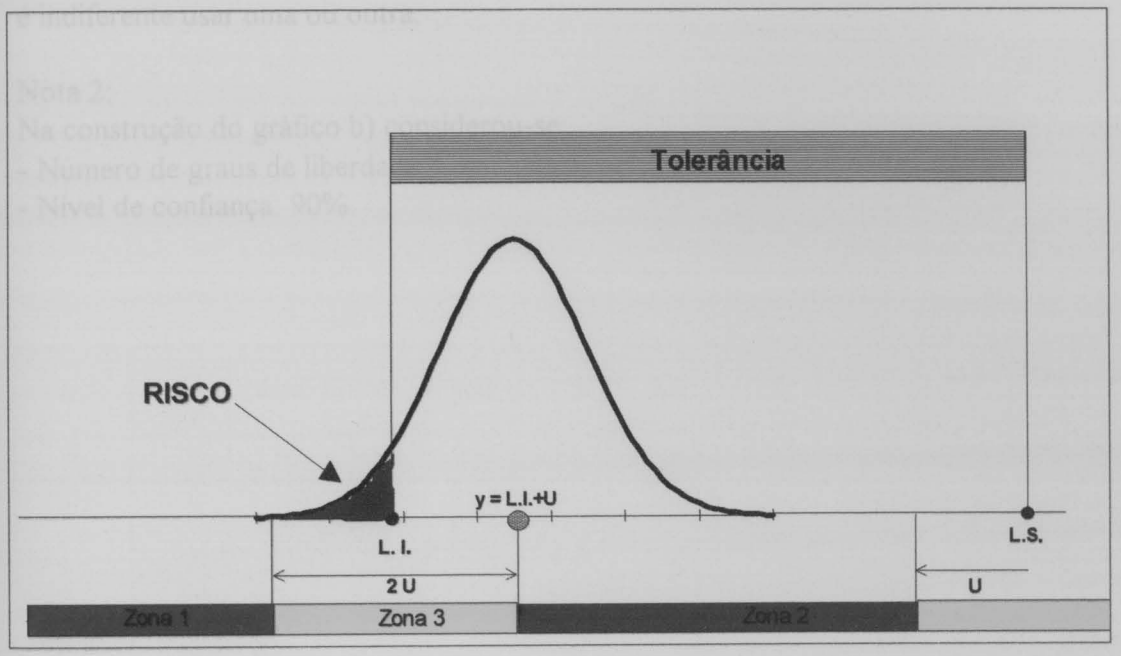
EVOLUÇÃO DA INCERTEZA RELATIVA DE $s^2(\bar{q})$ COM O NÚMERO DE OBSERVAÇÕES



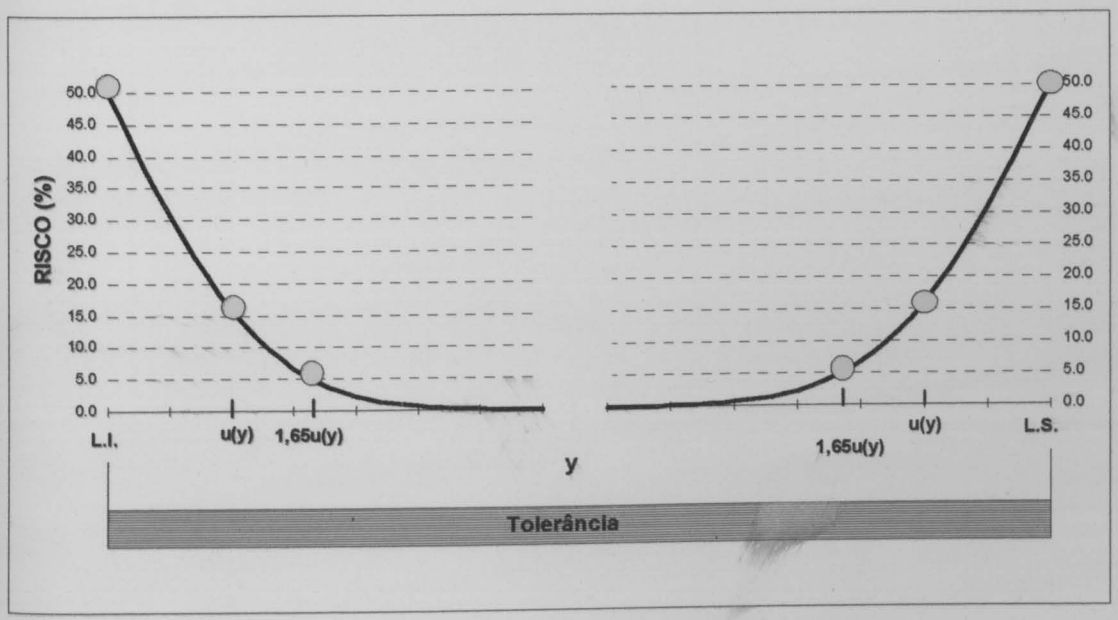
Nº observações (n)	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Incerteza relativa %	71	50	41	35	32	29	27	25	24
Decremento	20,7	9,12	5,5	3,7	2,8	2,1	1,7	1,4	

a) Análise da Conformidade do Resultado com a sua Especificação

Ilustração para o caso em que y se situa no ponto extremo de aceitação imediata.



b) Análise do Risco Admitido em C.M.G.Q. em Função da Localização de y.



Nota 1:
Para a construção dos gráficos recorreu-se à distribuição Normal Padronizada tal como já havia sido dito.
Apesar da forma da função densidade de probabilidade de Z ser diferente da de Y, a área abaixo de cada função é exactamente igual. Por isso em termos de análise de risco é indiferente usar uma ou outra.

Nota 2:
Na construção do gráfico b) considerou-se:
- Número de graus de liberdade = ∞
- Nível de confiança: 90%

TABELA DE PROBABILIDADES ASSOCIADAS ÀS CAUDAS DA DISTRIBUIÇÃO NORMAL PADRONIZADA

Na tabela podem ser consultados os valores de $\mathbf{P(Z \geq z')}$

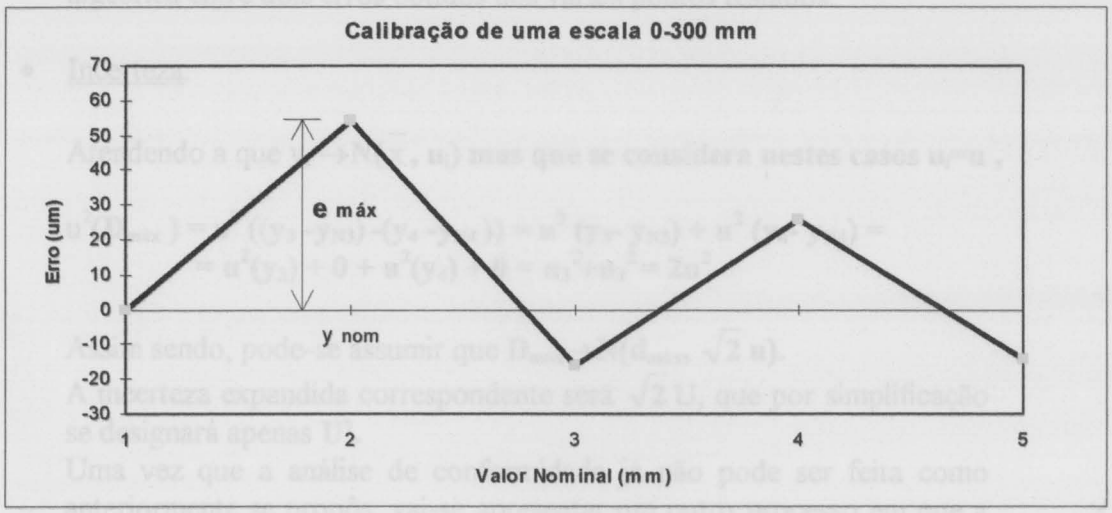
Exemplo: P(Z≥0,92)=0,1788 ,correspondendo a um risco de 17,88% ≈ 18%

z'	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0	0.5000	0.4960	0.4920	0.4880	0.4840	0.4801	0.4761	0.4721	0.4681	0.4641
0.1	0.4602	0.4562	0.4522	0.4483	0.4443	0.4404	0.4364	0.4325	0.4286	0.4247
0.2	0.4207	0.4168	0.4129	0.4090	0.4052	0.4013	0.3974	0.3936	0.3897	0.3859
0.3	0.3821	0.3783	0.3745	0.3707	0.3669	0.3632	0.3594	0.3557	0.3520	0.3483
0.4	0.3446	0.3409	0.3372	0.3336	0.3300	0.3264	0.3228	0.3192	0.3156	0.3121
0.5	0.3085	0.3050	0.3015	0.2981	0.2946	0.2912	0.2877	0.2843	0.2810	0.2776
0.6	0.2743	0.2709	0.2676	0.2643	0.2611	0.2578	0.2546	0.2514	0.2483	0.2451
0.7	0.2420	0.2389	0.2358	0.2327	0.2296	0.2266	0.2236	0.2206	0.2177	0.2148
0.8	0.2119	0.2090	0.2061	0.2033	0.2005	0.1977	0.1949	0.1922	0.1894	0.1867
0.9	0.1841	0.1814	0.1788	0.1762	0.1736	0.1711	0.1685	0.1660	0.1635	0.1611
1	0.1587	0.1562	0.1539	0.1515	0.1492	0.1469	0.1446	0.1423	0.1401	0.1379
1.1	0.1357	0.1335	0.1314	0.1292	0.1271	0.1251	0.1230	0.1210	0.1190	0.1170
1.2	0.1151	0.1131	0.1112	0.1093	0.1075	0.1056	0.1038	0.1020	0.1003	0.0985
1.3	0.0968	0.0951	0.0934	0.0918	0.0901	0.0885	0.0869	0.0853	0.0838	0.0823
1.4	0.0808	0.0793	0.0778	0.0764	0.0749	0.0735	0.0721	0.0708	0.0694	0.0681
1.5	0.0668	0.0655	0.0643	0.0630	0.0618	0.0606	0.0594	0.0582	0.0571	0.0559
1.6	0.0548	0.0537	0.0526	0.0516	0.0505	0.0495	0.0485	0.0475	0.0465	0.0455
1.7	0.0446	0.0436	0.0427	0.0418	0.0409	0.0401	0.0392	0.0384	0.0375	0.0367
1.8	0.0359	0.0351	0.0344	0.0336	0.0329	0.0322	0.0314	0.0307	0.0301	0.0294
1.9	0.0287	0.0281	0.0274	0.0268	0.0262	0.0256	0.0250	0.0244	0.0239	0.0233
2	0.0228	0.0222	0.0217	0.0212	0.0207	0.0202	0.0197	0.0192	0.0188	0.0183
2.1	0.0179	0.0174	0.0170	0.0166	0.0162	0.0158	0.0154	0.0150	0.0146	0.0143
2.2	0.0139	0.0136	0.0132	0.0129	0.0125	0.0122	0.0119	0.0116	0.0113	0.0110
2.3	0.0107	0.0104	0.0102	0.0099	0.0096	0.0094	0.0091	0.0089	0.0087	0.0084
2.4	0.0082	0.0080	0.0078	0.0075	0.0073	0.0071	0.0069	0.0068	0.0066	0.0064
2.5	0.0062	0.0060	0.0059	0.0057	0.0055	0.0054	0.0052	0.0051	0.0049	0.0048
2.6	0.0047	0.0045	0.0044	0.0043	0.0041	0.0040	0.0039	0.0038	0.0037	0.0036
2.7	0.0035	0.0034	0.0033	0.0032	0.0031	0.0030	0.0029	0.0028	0.0027	0.0026
2.8	0.0026	0.0025	0.0024	0.0023	0.0023	0.0022	0.0021	0.0021	0.0020	0.0019
2.9	0.0019	0.0018	0.0018	0.0017	0.0016	0.0016	0.0015	0.0015	0.0014	0.0014
3	0.0013	0.0013	0.0013	0.0012	0.0012	0.0011	0.0011	0.0011	0.0010	0.0010

ANÁLISE DA CONFORMIDADE DE INSTRUMENTOS NOS QUAIS SE TESTA A EXACTIDÃO DA ESCALA

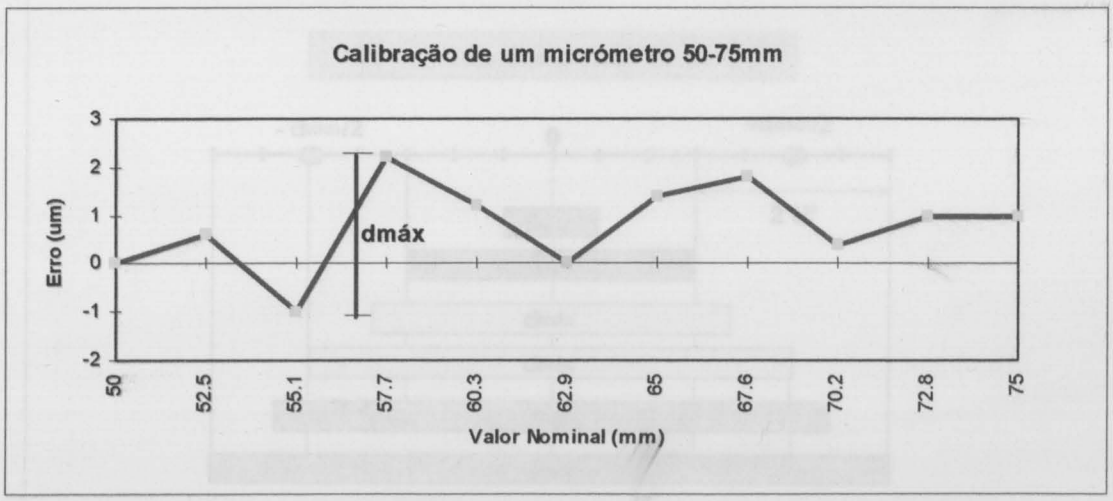
Para se ilustrarem as situações da nota final do capítulo III-1.4, vai-se recorrer a um exemplo.

1) Critério de aceitação que impõe um valor máximo ao erro absoluto encontrado(e_{max}):



Designando por y_{max} o valor lido no paquímetro correspondente ao maior erro obtido, e por y_{nom} o valor nominal correspondente a y_{max}, dever-se-á confrontar o intervalo definido por $y_{max} \pm U$ com $y_{nom} \pm$ erro admissível de

2) Critério de aceitação que impõe uma margem de desvio máxima.(d_{max})



Vai-se caracterizar a variável $D_{máx}$, de modo a se justificar a análise de conformidade destes instrumentos.

- Valor Esperado:

  Considere-se y_{Ni} como o valor nominal correspondente a y_i, em que **i** é o número de ordem do ponto testado. Como no presente caso $d_{máx}$ ocorreu entre o 3º e o 4º ponto,

  $D_{máx} = |e_3 - e_4|$

  $E(D_{máx}) = |E(e_3) - E(e_4)| = |(y_3 - y_{N3}) - (y_4 - y_{N4})|$

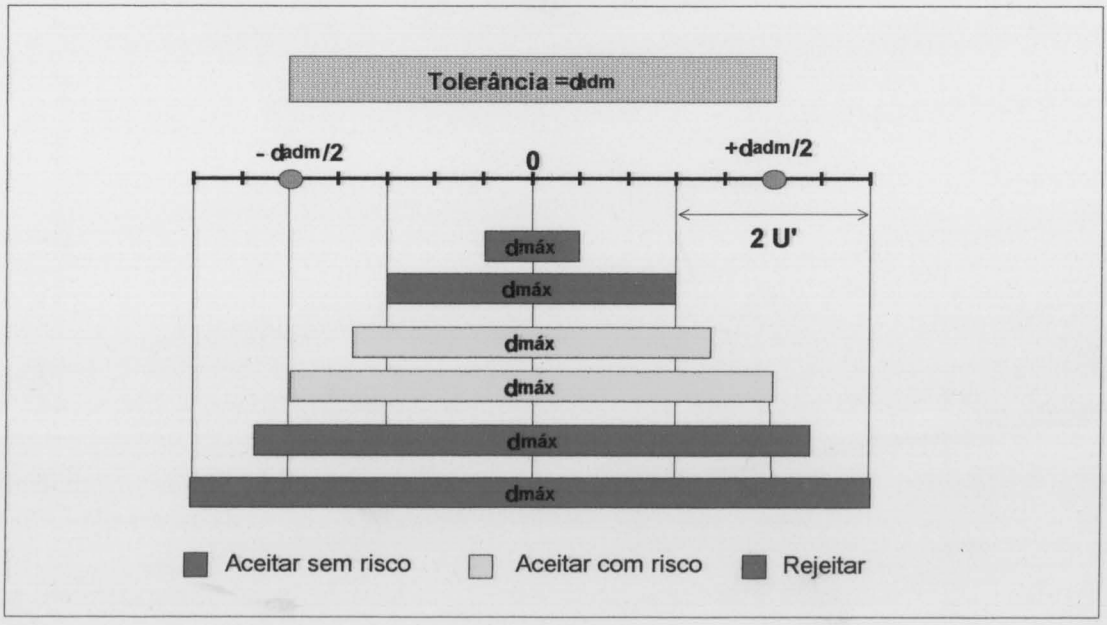
  A margem de desvio máxima é dada pelo módulo da maior diferença algébrica entre dois erros obtidos nos vários pontos testados.

- Incerteza:

  Atendendo a que $y_i \rightarrow N(\bar{x}, u_i)$ **mas que se considera nestes casos** $u_i = u$ **,**

  $$u^2(D_{máx}) = u^2((y_3 - y_{N3}) - (y_4 - y_{N4})) = u^2(y_3 - y_{N3}) + u^2(y_4 - y_{N4}) =$$
  $$= u^2(y_3) + 0 + u^2(y_4) + 0 = u_3^2 + u_4^2 = 2u^2$$

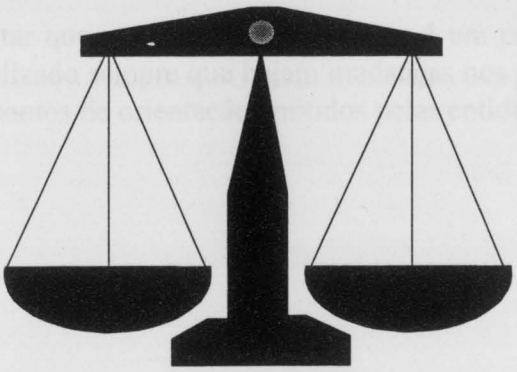
  Assim sendo, pode-se assumir que $D_{máx} \rightarrow N(d_{máx}, \sqrt{2}\,u)$.
  A incerteza expandida correspondente será $\sqrt{2}\,U$, que por simplificação se designará apenas **U'.**
  Uma vez que a análise de conformidade já não pode ser feita como anteriormente se propôs, vai-se apresentar um outro processo em que a decisão de aceitar ou não o instrumento é também função da localização do resultado obtido, mas que neste caso se refere a $d_{máx}$.
  Designando por d_{adm} a maior diferença admissível dada pela norma, dever-se-á confrontar o intervalo definido por $d_{max} \pm U'$ com d_{adm}.
  Vão-se considerar d_{max} e d_{adm} centrados em zero.



Quando $\mathbf{d_{max}}$ se encontrar na posição ilustrada a amarelo é necessário exprimir o risco. O processo a utilizar é semelhante ao descrito no capítulo III-1.4.
Considera-se igualmente um z` que é dado por:

$\mathbf{z'=(d_{adm}-d_{max}) / \sqrt{2}\ u(y)}$

O valor do risco calcula-se também por $\mathbf{P(Z \geq z')}$.



Balanço e Conclusão

Apesar de até à data de conclusão deste trabalho ainda não terem sido implementados na prática os procedimentos sugeridos ou outros baseados neste guia, podem-se desde já referir algumas situações positivas e negativas que foram surgindo.

Dos aspectos positivos visíveis a curto prazo destaca-se a oportunidade que houve em rever e reestruturar os próprios processos de calibração já que estes foram minuciosamente estudados para que se adaptasse o cálculo das incertezas a cada caso particular.

Ainda a curto prazo este trabalho veio responder às exigências das normas NP EN ISO 9001, contribuindo para o sucesso do processo de certificação em curso.

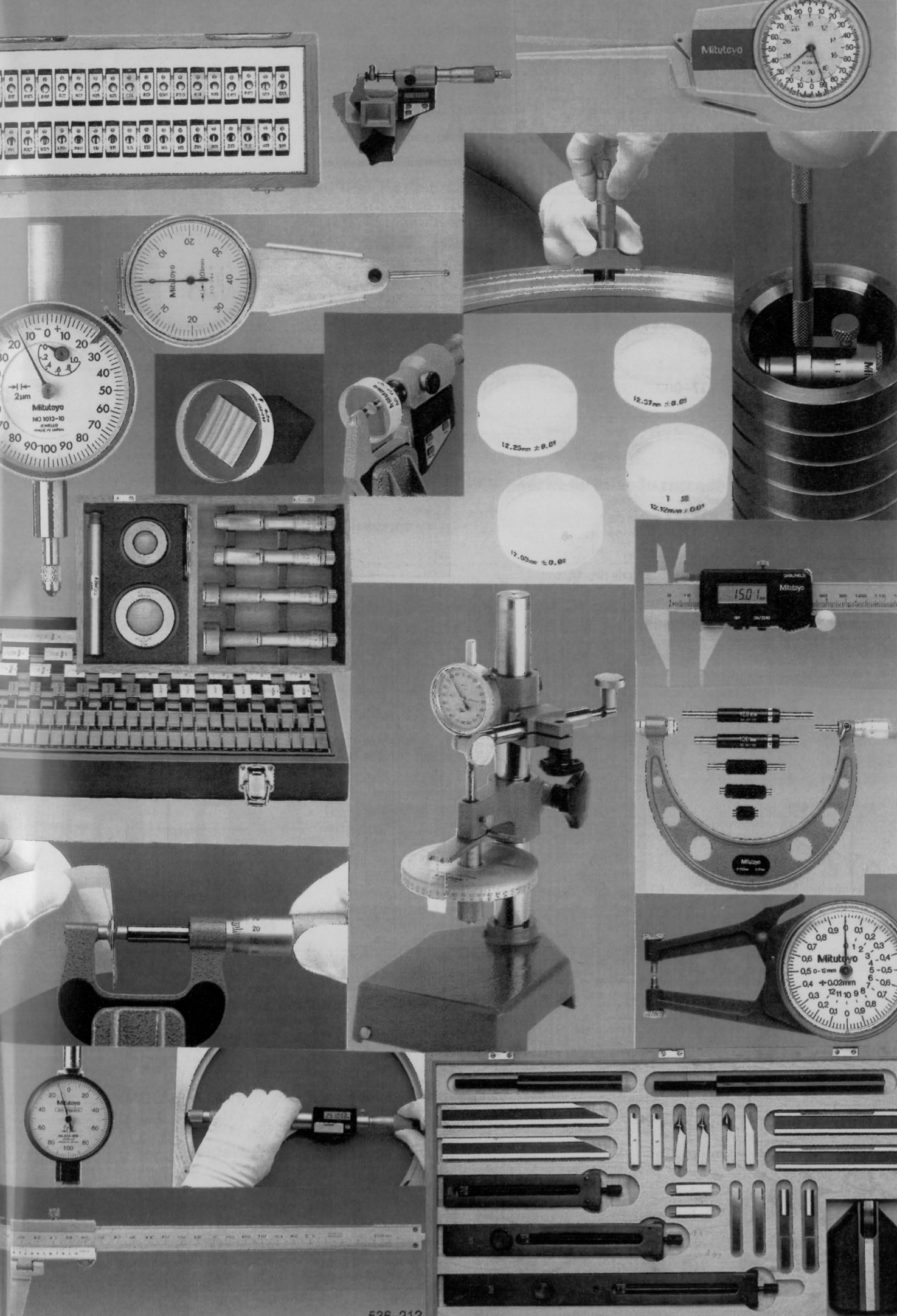
Dado que mais cedo ou mais tarde a incerteza nas calibrações teria de ser expressa, o facto de neste momento ser possível fazê-lo internamente sem recorrer a entidades calibradoras

externas vem permitir uma poupança na ordem dos milhares de contos /ano, atendendo à elevada actividade deste laboratório.

A longo prazo, a expressão da incerteza nas calibrações e futuramente nas medições constitui sem dúvida uma vantagem competitiva já que assegura a credibilidade dos resultados obtidos, aumentando assim a confiança de clientes e a boa imagem da empresa.

Mas nem tudo são vantagens. Reconhece-se que para fazer a aplicação imediata deste estudo têm de se reunir duas condições essenciais: tempo e motivação. A primeira é contornável se e quando se desenvolver uma aplicação informática para efectuar os cálculos envolvidos. A segunda passa pela formação e sensibilização das pessoas envolvidas. Chama-se à atenção da importância da interpretação dos resultados obtidos por forma a que não se caia na situação de exprimir a incerteza associada a um resultado e depois ignorar a sua influência na tomada de decisão final.

Convém ainda salientar que o cálculo das incertezas é um processo dinâmico que deve ser acompanhado e actualizado sempre que hajam mudanças nos processos de calibração e ainda à luz de novos documentos de orientação emitidos pelas entidades competentes.


Mitutoyo
2µm
NO 1013-10
12.37mm ±0.05
12.25mm ±0.05
12.12mm ±0.05
12.00mm ±0.05
15.01
0,5 0-12mm
+0.02mm

ANEXO A

Procedimentos para o cálculo da incerteza nas calibrações.

Cavilhas para medir roscas



Calibres de tampão liso (incluído no capítulo III)

Calibres de tampão roscado e Calibres padrão de tampão roscado

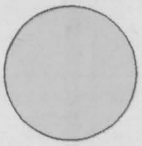
Calibres de roscado interior



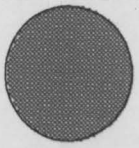
Réguas, Escalas e Fitas métricas



Medidores de Interiores e de Espessuras



Paquímetros



Micrómetros



Comparadores e Comparadores de alavanca

Cavilhas

CAVILHAS PARA MEDIR ROSCAS EXTERIORES (PIGES)

Será tomado como referência o procedimento relativo aos calibres de tampão liso, visto tratar-se igualmente de uma medição de um diâmetro realizada igualmente com um micrómetro. Por este motivo o procedimento seguinte encontra-se resumido devendo consultar-se o dos calibres para eventuais esclarecimentos.(Onde se lê "*calibre*" poderá ler-se "*cavilha*").

1- Objectivo:

Determinar o diâmetro de cada uma das cavilhas bem como as incertezas associadas.
Submeter cada valor obtido ao critério de aceitação.

2- Modelo matemático:

(ver [1])

$$y = \ell\,(1+\alpha\theta) \qquad \text{ou seja: } y = f(\ell,\alpha,\theta)$$

3- Considerações:

(ver [1])

4- Cálculo da incerteza:

(ver [1])

⇒ Tal como mencionado na nota final do procedimento referente ao calibre de tampão liso, não será incluida a componente $u(\alpha)$.

4.1- Coeficientes de sensibilidade:

$c_\ell = 1$

$c_\theta = 11{,}5 \times 10^{-6} \times \ell$

4.2- Componentes da incerteza:

a) Incerteza da medição do diâmetro $u(\ell)$

- Incerteza padrão do micrómetro utilizado $u(\ell_m)$
- Incerteza padrão da estimativa de entrada

$$s(\bar{\ell}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{j=1}^{n} (\ell_j - \bar{\ell})}$$

Assim: $u(\ell) = \sqrt{u^2(\ell_m) + u^2(\bar{\ell})}$

b) <u>Incerteza do desvio de temperatura do calibre</u> u (θ)

- Incerteza devida à variação cíclica da temperatura:

  $u(\Delta) = 1°C/\sqrt{2} = 0{,}707°C$

- Incerteza padrão do termómetro utilizado $u(\bar{\theta})$

Assim $u(\theta) = \sqrt{u^2(\Delta) + u^2(\bar{\theta})}$

4.3 - Incerteza padrão combinada:

$u^2(y) = u_1^2(y) + u_2^2(y)$

4.4 - Incerteza expandida de medição:

A incerteza expandida será calculada de tal forma que assegure um intervalo com um nível de confiança de aproximadamente 90 %. A determinação de um factor de expansão k que produza esse intervalo é feita com base nos graus efectivos de liberdade .(ver [2])

4.5 - Expressão do resultado

Deverão ser apresentados 3 resultados, um para cada cavilha e sob a seguinte forma: (ver [3])

(média das 5 observações ($\bar{\ell}$) ± incerteza expandida (U))

onde $\bar{\ell}$ e U estão expressos em mm.

5 - <u>Confronto com o critério de aceitação</u>

Para <u>cada</u> cavilha dever-se-à confrontar o intervalo definido por $\bar{\ell}$ ± U com o intervalo de valores que a respectiva instrução operacional sugere.(ver [4])
Deste modo, o facto de apenas uma ou duas cavilhas se encontrarem fora do critério de aceitação não implica que se rejeite todo o conjunto das três. Dever-se-à neste caso proceder à sua substituição individual.

6 - Exemplo ilustrativo:

Dados recolhidos:

temperatura.ambiente: 21°C
5 medições efectuadas com micrómetro (mm):

Cavilha 1	Cavilha 2	Cavilha 3
2,049	2,049	2,049
2,048	2,049	2,049
2,048	2,048	2,049
2,048	2,049	2,048
2,049	2,048	2,048

incerteza expandida do termómetro : 1°C com k=2.
incerteza expandida do micrómetro: 1,3 μm com k=2.

Dados calculados:

incerteza padrão do termómetro: 0,5°C
incerteza padrão do micrómetro: 0,65 μm

	Cavilha 1	Cavilha 2	Cavilha 3
média (μm)	2048,4	2048,6	2048,6
d.padrão (μm)	0,548	0,548	0,548
d.padrão/√5 (μm)	0,245	0,2445	0,2445

Tabela resumo:

(neste caso a tabela é igual para as três cavilhas, uma vez que o arredondamento feito nos valores do desvio padrão tornaram-no igual. Não se pode no entanto generalizar esta situação.)

Componentes $u(x_i)$	Fonte de incerteza	$c_i = \partial f / \partial x_i$	Incerteza padrão $u(x_i)$	$u_i(y)=\lvert c_i \rvert u(x_i)$ (μm)	Contribuição de cada $u_i(y)$ %	Graus efect. de liberdade
$u(\ell)$	4.2.a)	1	0,695	0,695	95	259
$u(\ell_m)$			0,650		88	∞
$u(\overline{\ell})$			0,245		12	4
$u(\theta)$	4.2.b)	0,024	0,866	0,159	5	∞
$u(\Delta)$			0,707		67	∞
$u(\overline{\theta})$			0,500		33	∞

Incerteza padrão:

$$u^2(y) = c^2_{\ell}\, u^2(\ell) + c^2_{\theta}\, u^2(\theta) = u_1{}^2(y) + u_2{}^2(y) =$$
$$= (0{,}695)^2 + (0{,}159)^2 = 0{,}508\ \mu m$$
$$u(y) = \sqrt{0{,}508} = 0{,}713\ \mu m$$

Graus efectivos de liberdade:

$$\nu_{ef}(\ell) = \frac{u^4(\ell)}{\frac{u^4(\ell_m)}{\nu(\ell_m)} + \frac{u^4(\bar{\ell})}{\nu(\bar{\ell})}} = \frac{(0{,}695)^4}{\frac{(0{,}650)^4}{\infty} + \frac{(0{,}245)^4}{4}} = 259$$

$$\nu_{ef}(y) = \frac{u^4(y)}{\frac{u^4(\ell)}{\nu(\ell)} + \frac{u^4(\theta)}{\nu(\theta)}} = \frac{(0{,}713)^4}{\frac{(0{,}695)^4}{259} + \frac{(0{,}159)^4}{\infty}} = 286{,}9$$

$$\Rightarrow \nu_{ef} = 286$$

Pela tabela dada em [2] : $t_{90}(286) = 1{,}645$

Logo,

$$U_{90}(286) = t_{90}(286)\, u(y) = 1{,}645 \times 0{,}713\ \mu m = 1{,}17\ \mu m$$
$$\Rightarrow 1{,}2\ \mu m$$

Resultado:

Cavilha 1
(2.0484 ± 0,0012) mm

Cavilha 2
(2.0486 ± 0,0012) mm

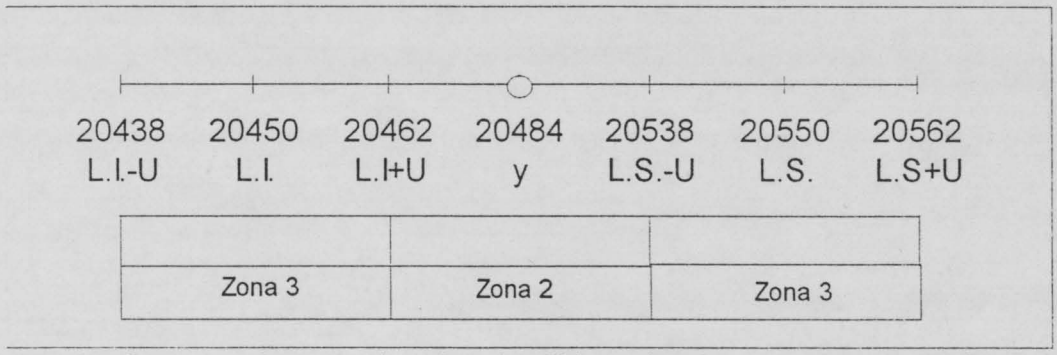
Cavilha 3
(2.0486 ± 0,0012) mm

A incerteza expandida de medição apresentada corresponde à incerteza padrão de medição multiplicada pelo factor de expansão $k = 1{,}645$, calculado a partir da distribuição t com 286 graus de liberdade efectivos para se obter um nível de confiança de aproximadamente 90% . A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com o documento EAL-R2. A estabilidade de longo prazo do objecto não foi tomada em consideração.

Critério de aceitação

No caso das piges em causa, de diâmetro 2,050 mm, e segundo a respectiva instrução operacional, o critério de aceitação é definido pelo intervalo [2,045 ; 2,055] mm .

Cavilha 1



Atenção: Como os valores são da ordem dos décimos de micron, resolveu-se não fazer a representação proporcionalmente. Por este motivo os valores estão igualmente espaçados. Na realidade as zonas 3 são iguais já que correspondem à amplitude da incerteza expandida.

Conclusão:

❶ Análise da capacidade do processo de medição

Capacidade = (T-2xU)/T = (0,01-2x0,0012)/0,01 = 0,76

❷ Análise da conformidade do resultado com a sua especificação

O resultado obtido na calibração encontra-se na zona 2. Por isso a cavilha1 é dada como conforme.
A conclusão para as cavilhas 2 e 3 é idêntica, como se pode ver pela análise da figura.

Referências

[1] Capítulo III-2 "Calibres de tampão lisos"
[2] Capítulo III-1.3 c) "Como determinar k a partir de graus de liberdade efectivos"
[3] Capítulo II-4.2 e apêndice II-4 "Expressão da incerteza"
[4] Capítulo III-1.4 "Declaração de Conformidade ou Não-Conformidade"

Calibres

CALIBRES DE TAMPÃO ROSCADO
e
CALIBRES PADRÃO DE TAMPÃO ROSCADO
(SISTEMA MÉTRICO-WHITWORTH-GAS-OUTROS)

Será tomado como referência o procedimento relativo aos calibres de tampão liso, visto tratar-se igualmente de uma medição de um diâmetro realizada igualmente com um micrómetro. Por este motivo o procedimento seguinte encontra-se resumido devendo consultar-se o dos calibres de tampão liso para eventuais esclarecimentos.

1- Objectivo:

Determinar o diâmetro de flancos e o diâmetro exterior dos lados passa e não passa do calibre. Exprimir a incerteza associada a cada valor.
Submeter cada valor obtido ao critério de aceitação.

2- Modelo matemático:

→ Diâmetro exterior:
medição do diâmetro recorrendo a um micrómetro exterior
(ver [1])

$$y_{ext} = \ell\,(1+\alpha\theta) \qquad \text{ou seja: } y = f_1(\ell,\alpha,\theta)$$

ℓ : diâmetro exterior do calibre, medido com micrómetro exterior.
α : coeficiente de expansão térmica do calibre
θ : desvio da temperatura do calibre relativamente à temperatura de referência (20°C)

→ Diâmetro de flancos:

Processo 1 : (Não aplicável aos calibres padrão de tampão roscado)
medição do diâmetro recorrendo a um micrómetro exterior onde se instala um conjunto de cavilhas.

$$y_{flancos} = \ell\,(1+\alpha\theta) \qquad \text{ou seja: } y_{flancos} = f_2(\ell,\alpha,\theta)$$

Processo 2 : medição do diâmetro recorrendo a um micrómetro exterior onde se instala um conjunto de cavilhas. Obtém-se assim l_{lido}. Substitui-se na expressão abaixo e determina-se $y_{flancos}$.

$$y_{flancos} = \ell_{lido} - 2c + P/2\ cotg(Z) - (cosec(Z) - 1) \times c$$

ou seja: $y_{flancos} = f_3(\ell_{lido}, c)$

onde Z = 30° para roscas com ângulo de 60°
Z = 27°30' para roscas com ângulo de 55°

e,

$$\ell_{lido} = \ell\ (1+\alpha\theta)$$

ou seja: $\ell_{lido} = f_4(\ell, \alpha, \theta)$

3- Considerações:

3.1- relativas a y_{ext} , ℓ_{lido} e $y_{flancos}$ (processo 1) :

as mesmas previstas em [1]

3.2- relativas a $y_{flancos}$ (processo 1 e 2) :

- O número de algarismos significativos utilizados para representar o valor da cotangente e da cosecante serão todos os disponíveis na máquina de calcular ou no computador utilizado e não deverá ser inferior a 5.

- O valor de **c** (diâmetro das cavilhas) é o que consta no certificado mais recente da calibração das mesmas e não o seu diâmetro nominal. Dado existirem 3 valores para c (um para cada cavilha) e uma vez que todas elas entram no processo de calibração, irá ser utilizado o seu valor médio. No entanto reconhece-se que um procedimento mais indicado (mas também mais moroso) seria o descrito na nota 1.

- O valor do passo (P) refere-se ao seu valor nominal. É considerado como constante e sem incerteza associada.

4- Cálculo da incerteza:

⇒ Tal como mencionado na nota final do procedimento referente aos calibres de tampão liso, não será incluida a componente $u(\alpha)$.

4.1- Coeficientes de sensibilidade:

➔Diâmetro exterior:

$$c_\ell = \frac{\partial f_1}{\partial \ell} = 1$$

$$c_\theta = \frac{\partial f_1}{\partial \theta} = \ell\alpha = 11{,}5\times 10^{-6} \times \ell$$

➔Diâmetro de flancos:

Processo 1 :

$$c_\ell = \frac{\partial f_2}{\partial \ell} = 1$$

$$c_\theta = \frac{\partial f_2}{\partial \theta} = \ell\alpha = 11{,}5\times 10^{-6} \times \ell$$

Processo 2 :

$$c_{\ell\,\text{lido}} = \frac{\partial f_3}{\partial \ell_{\,\text{lido}}} = 1$$

$$c_C = \frac{\partial f_3}{\partial_C} = -2-(\cos\text{ec}\,Z-1) = -1-\cos\text{ec}\,Z$$

$$c_\ell = \frac{\partial f_4}{\partial \ell} = 1$$

$$c_\theta = \frac{\partial f_4}{\partial \theta} = \ell\alpha = 11{,}5\times 10^{-6} \times \ell$$

4.2- Componentes da incerteza:

4.2.1➔Diâmetro exterior:

a) **Incerteza da medição do diâmetro** u(ℓ)

- Incerteza padrão do micrómetro utilizado $u(\ell_m)$ (ver [2])

- Incerteza padrão da estimativa de entrada

$$u(\bar{\ell}) = s(\bar{\ell}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{j=1}^{n} (\ell_j - \bar{\ell})}$$

Assim:

$$u(\ell) = \sqrt{u^2(\ell_m) + u^2(\bar{\ell})}$$

b) <u>Incerteza do desvio de temperatura do calibre</u> u (θ)

- Incerteza devida à variação cíclica da temperatura:

$u(\Delta) = 1°C/\sqrt{2} = 0{,}707°C$

- Incerteza padrão do termómetro utilizado $u(\bar{\theta})$ (ver [2])

Assim $u(\theta) = \sqrt{u^2(\Delta) + u^2(\bar{\theta})}$

4.2.2→<u>Diâmetro de flancos</u>:

4.2.2.1 *<u>Processo 1</u>* :

a) <u>Incerteza da medição do diâmetro</u> u(ℓ) - ver nota 2

- Incerteza padrão do micrómetro utilizado $u(\ell_m)$ (ver [2])

- Incerteza padrão das cavilhas utilizadas $u(\ell_{cav})$ (ver [2])
  Tendo em conta o processo de calibração e considerando a pior hipótese:
  $u^2(\ell_{cav}) = 2\,u^2(c)$
  em que u(c) é a maior incerteza padrão das piges. (ver nota 3)

- Incerteza padrão da estimativa de entrada

$$u(\bar{\ell}) = s(\bar{\ell}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{j=1}^{n} (\ell_j - \bar{\ell})}$$

Assim:

$$u(\ell) = \sqrt{u^2(\ell_m) + u^2(\ell_{cav}) + u^2(\bar{\ell})}$$

b) <u>Incerteza do desvio de temperatura do calibre</u> u(θ)
(ver "diâmetro exterior")

Assim $u(\theta) = \sqrt{u^2(\Delta) + u^2(\bar{\theta})}$

4.2.2.2 *<u>Processo 2</u>* :

a) <u>Incerteza da medição do diâmetro</u> $u(\ell_{lido})$

As componentes desta incerteza são as mesmas que as apresentadas anteriormente para o caso do diâmetro de flancos obtido através do processo 1 ($y_{flancos}$).

$$u(\ell) = \sqrt{u^2(\ell_m) + u^2(\ell_{cav}) + u^2(\bar{\ell}) + u^2(\Delta) - u^2(\bar{\theta})}$$

b) <u>Incerteza do diâmetro das cavilhas</u> u(c)

A incerteza expandida de cada uma das cavilhas bem como o factor de expansão utilizado vêm expressos no seu certificado de calibração.
Deverá ser utilizada a incerteza padrão correspondente à maior incerteza expandida das três cavilhas.(ver [2])

4.3 - Incerteza padrão combinada:

→<u>Diâmetro exterior</u>:

$$u^2(y_{ext}) = u_1^2(y_{ext}) + u_2^2(y_{ext})$$

→<u>Diâmetro de flancos</u>:

$$u^2(y_{flancos}) = u_1^2(y_{flancos}) + u_2^2(y_{flancos})$$

$$u(\bar{\ell}) = s(\bar{\ell}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{j=1}^{n} (\ell_j - \bar{\ell})}$$

Assim:

$$u(\ell) = \sqrt{u^2(\ell_m) + u^2(\ell_{cav}) + u^2(\bar{\ell})}$$

b) <u>Incerteza do desvio de temperatura do calibre</u> u(θ)
(ver "diâmetro exterior")

Assim $u(\theta) = \sqrt{u^2(\Delta) + u^2(\bar{\theta})}$

4.2.2.2 *<u>Processo 2</u>* :

a) <u>Incerteza da medição do diâmetro</u> $u(\ell_{lido})$

As componentes desta incerteza são as mesmas que as apresentadas anteriormente para o caso do diâmetro de flancos obtido através do processo 1 ($y_{flancos}$).

$$u(\ell) = \sqrt{u^2(\ell_m) + u^2(\ell_{cav}) + u^2(\bar{\ell}) + u^2(\Delta) - u^2(\bar{\theta})}$$

b) <u>Incerteza do diâmetro das cavilhas</u> u(c)

A incerteza expandida de cada uma das cavilhas bem como o factor de expansão utilizado vêm expressos no seu certificado de calibração.
Deverá ser utilizada a incerteza padrão correspondente à maior incerteza expandida das três cavilhas.(ver [2])

4.3 - Incerteza padrão combinada:

→<u>Diâmetro exterior</u>:

$$u^2(y_{ext}) = u_1^2(y_{ext}) + u_2^2(y_{ext})$$

→<u>Diâmetro de flancos</u>:

$$u^2(y_{flancos}) = u_1^2(y_{flancos}) + u_2^2(y_{flancos})$$

4.4 - Incerteza expandida de medição (U):

A incerteza expandida será calculada de tal forma que assegure um intervalo com um nível de confiança de aproximadamente 90 %. A determinação de um factor de expansão k que produza esse intervalo é feita com base nos graus efectivos de liberdade .(ver [3])

4.5 - Expressão do resultado

Deverão ser apresentados 2 resultados quer para o lado passa quer para o não passa: um referente ao diâmetro exterior e outro referente ao diâmetro de flancos, sob a seguinte forma:
(ver [4])

→Diâmetro exterior:

$$y_{ext} \pm U$$

→Diâmetro de flancos

$$y_{flancos} \pm U$$

onde y_{ext} e $y_{flancos}$ e U estão expressos em mm.

5 - Confronto com o critério de aceitação

Para cada diâmetro (exterior e de flancos) dever-se-á confrontar o intervalo definido por $\overline{\ell} \pm U$ com o intervalo de valores que a respectiva norma sugere.(ver [5]).
No caso do diâmetro de flancos ter sido obtido através do processo 1, esse intervalo de valores tem como base M (valor (em mm) obtido através da expressão seguinte):

$$M = D_2 + 2\,c - 0{,}5\,P \times \mathrm{cotg}Z + c\,(1/\,\mathrm{sen}Z - 1) + \delta$$

onde

D_2 = diâmetro de flancos calculado(mm), visto no documento "folha de cálculos".
c = diâmetro das cavilhas(mm) - (ver"considerações")
Z = 30° para roscas com ângulo de 60°
Z = 27°30' para roscas com ângulo de 55°
δ = factor de correcção visto em tabela própria (mm)

Para que um calibre seja aceite como válido é necessário que tanto o diâmetro exterior como o de flancos estejam dentro dos critérios definidos.

Caso tal não se verifique poder-se-á utilizar o lado válido desde que se tomem as devidas precauções (por ex. colocação de uma etiqueta no aparelho que esclareça a situação).

Nota: Neste processo não se entrou com a contribuição da incerteza associada ao diâmetro das cavilhas, que seria dada por:

$$\frac{\partial M}{\partial c} \times u_c = [2 + (1/\mathrm{sen}Z - 1)] \times u_c$$

Ao proceder desta forma está-se a trabalhar com uma situação mais pessimista já que o valor obtido iria ser somado ao intervalo de tolerância, permitindo um critério de aceitação mais favorável. Considerou-se porém não ser práctico estar a alterar o critério de aceitação de cada vez que se calculava uma incerteza.

6 - Exemplo ilustrativo:

Aplicado a um calibre M24x3, rosca de 60°

Nota: Apesar de terem sido recolhidos dados para os diâmetros exterior e de flancos sobre cavilhas, apenas será determinada a incerteza associada a este último já que o procedimento para o primeiro é em tudo semelhante ao do diâmetro dos calibres de tampão liso. Para além disso o procedimento que se segue refere-se ao lado passa do calibre, sendo igualmente aplicável ao lado não-passa.

Dados recolhidos:

temperaturaambiente: 21°C
D_2=22,067mm
P=3mm
Z=30°
δ = 2,2 µm
medições (mm)

Diâmetro exterior	Diâmetro de flancos c/ cavilhas
24,029	25,624
24,030	25,623
24,031	25,626
24,030	25,627
24,032	25,622

cavilhas utilizadas:

	Cavilha 1	Cavilha 2	Cavilha 3
Diâmetro (mm)	2,0484	2,0486	2,0486
Incerteza expandida(μm) com k=1,645	1,7	1,7	1,7
Graus efectivos de liberdade	286	286	286

micrómetros utilizados:

	no diâmetro exterior	no diâmetro de flancos
Incerteza expandida (μm)	1,3	1,8
k	2	2
Graus efectivos de liberdade	∞	∞

incerteza expandida do termómetro : 1°C com k=2.

Dados calculados:

diâmetro médio das cavilhas: 2048,5 μm
incerteza padrão das cavilhas (μm):

Cavilha 1	Cavilha 2	Cavilha 3
1,037	1,037	1,037

incerteza padrão dos micrómetros (μm):

do diâmetro exterior	do diâmetro de flancos
0,65	0,9

incerteza padrão do termómetro: 0,5°C

	Diâmetro exterior	Diâmetro de flancos c/cavilhas
média (μm)	24030,4	25624,4
d.padrão (μm)	1,14	2,07
d.padrão/√5 (μm)	0,501	0,927

M (processo 1) =
=22,067 +2x2,0485 -0,5x3xcotg30° +2,0485x(1/sen30°-1) +0,0022
=25,617 mm

$y_{flancos}$ (processo 2) =
= 25,6244 - 2x2,0485 + 3/2 x cotg30° - (cosec30°-1)x2,0485
= 22,077mm

PROCESSO 1

Tabela resumo:

Componentes $u(x_i)$	Fonte de incerteza	$c_i = \partial f / \partial x_i$	Incerteza padrão $u(x_i)$	$u_i(y)=\|c_i\|u(x_i)$ (μm)	Contribuição de cada $u_i(y)$ %	Graus efect. de liberdade
$u(\ell)$	4.2.2.1a)	1	1,949	1,949	98,3	72
$u(\ell_m)$			0,900		21	∞
$u(\ell_{cav})$			1,459		56	286
$u(\overline{\ell})$			0,927		23	4
$u(\theta)$	4.2.2.1b)	0,295	0,866	0,255	1,7	∞
$u(\Delta)$			0,707		67	∞
$u(\overline{\theta})$			0,500		33	∞

Incerteza padrão:

$$u^2(y) = c^2_{\ell}\, u^2(\ell) + c^2\theta\, u^2(\theta) = u_1{}^2(y) + u_2{}^2(y) =$$
$$= (1,949)^2 + (0,255)^2 = 3,864\ \mu m$$
$$u(y) = \sqrt{3,864} = 1,966\ \mu m$$

Graus efectivos de liberdade:

No momento em que foi feita esta calibração não se dispunham de dados relativos aos graus de liberdade efectivos do micrómetro nem do termómetro. No entanto mesmo que existisse este último dado, não se entraria com ele visto a sua contribuição ser extremamente pequena.

$$\nu_{eff}(\ell) = \frac{u^4(\ell)}{\frac{u^4(\ell_m)}{\nu(\ell_m)} + \frac{u^4(\ell_{cav})}{\nu(\ell_{cav})} - \frac{u^4(\overline{\ell})}{\nu(\overline{\ell})}} = \frac{(1,949)^4}{\frac{(0,9)^4}{\infty} - \frac{(1,459)^4}{286} + \frac{(0,927)^4}{4}} = 71,88$$

$$\nu_{eff}(y) = \frac{u^4(y)}{\frac{u^4(\ell)}{\nu(\ell)} + \frac{u^4(\theta)}{\nu(\theta)}} = \frac{(1,966)^4}{\frac{(1,949)^4}{71,88} + \frac{(0,255)^4}{\infty}} = 74,37$$

$$\Rightarrow \nu_{ef} = 74$$

Pela tabela dada em [3] : $t_{90}(74) = 1{,}67$

Logo,

$$U_{90}(74) = t_{90}(74)\, u(y) = 1{,}67 \times 1{,}966\ \mu m = 3{,}28\ \mu m$$
$$\Rightarrow 3{,}3\ \mu m$$

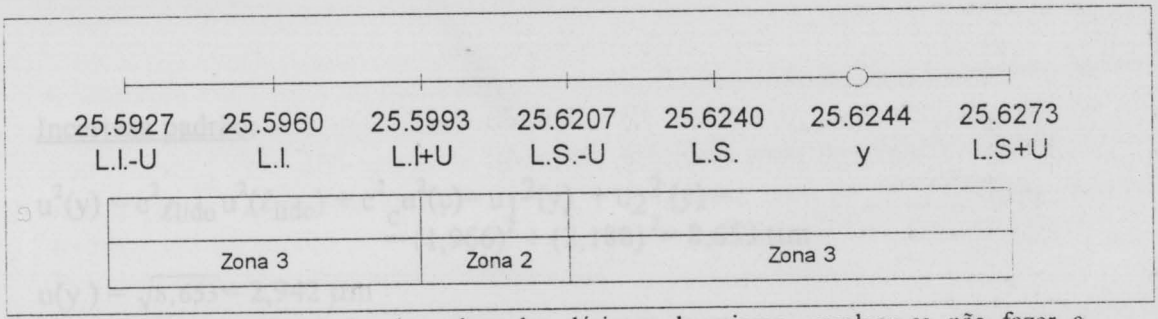
Resultado:

$(25{,}6244 \pm 0{,}0033)$ mm

A incerteza expandida de medição apresentada corresponde à incerteza padrão de medição multiplicada pelo factor de expansão k = 1,67, calculado a partir da distribuição t com 74 graus de liberdade efectivos para se obter um nível de confiança de aproximadamente 90%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com o documento EAL-R2. A estabilidade de longo prazo do objecto não foi tomada em consideração.

Critério de aceitação

No caso do processo em causa, o critério de aceitação é definido pelo intervalo: [25,596 ; 25,624] mm ,
onde 25,596 é o valor mínimo permitido pela norma por se tratar de um calibre com uso [25,596 =*22,046* +2x2,0485 -0,5x3(1/tg30°) +2,0485x(1/sen30°-1) +0,0022]
e 25,624 é o valor máximo resultante de : M+0,007 =25,617+0,007



Atenção: Como os valores são da ordem dos décimos de micron, resolveu-se não fazer a representação proporcionalmente. Por este motivo os valores estão igualmente espaçados. Na realidade as zonas 3 são iguais já que correspondem à amplitude da incerteza expandida.

Conclusão:

❶ Análise da capacidade do processo de medição

Capacidade = (T-2xU)/T = (0,028-2x0,0033)/0,028 = 0,76

❷ Análise da conformidade do resultado com a sua especificação

O resultado obtido na calibração encontra-se na zona 3 e à direita de L.S. Consequentemente o risco é superior a 50% , rejeitando-se o calibre.

PROCESSO 2

Tabela resumo:

Componentes $u(x_i)$	Fonte de incerteza	$c_i = \partial f / \partial x_i$	Incerteza padrão $u(x_i)$	$u_i(y)=\|c_i\|u(x_i)$ (μm)	Contribuição de cada $u_i(y)$ %	Graus efect. de liberdade
$u(\ell_{lido})$	4.2.2.2a)	1	1,966	1,966	45	74,4
$u(\ell)$		1	1,949	1,949	98,3	71,88
$u(\ell_m)$			0,900		21	∞
$u(\ell_{cav})$			1,459		56	286
$u(\overline{\ell})$			0,927		23	4
$u(\theta)$		0,295	0,866	0,255	1,7	∞
$u(\Delta)$			0,707		67	∞
$u(\overline{\theta})$			0,500		33	∞
u(c)	4.2.2.2b)	-3	0,729	2,188	55	286

Incerteza padrão:

$$u^2(y) = c^2_{\ell lido}\, u^2(\ell_{lido}) + c^2_c u^2(c) = u_1^2(y) + u_2^2(y) =$$
$$= (1{,}966)^2 + (2{,}188)^2 = 8{,}653\ \mu m$$

$$u(y) = \sqrt{8{,}653} = 2{,}942\ \mu m$$

Graus efectivos de liberdade:

No momento em que foi feita esta calibração não se dispunham de dados relativos aos graus de liberdade efectivos do micrómetro nem do termómetro. No entanto mesmo que existisse este último dado, não se entraria com ele visto a sua contribuição ser extremamente pequena.

$$\nu_{eff}(\ell) = \frac{u^4(\ell)}{\frac{u^4(\ell_m)}{\nu(\ell_m)} + \frac{u^4(\ell_{cav})}{\nu(\ell_{cav})} + \frac{u^4(\bar{\ell})}{\nu(\bar{\ell})}} = \frac{(1,949)^4}{\frac{(0,9)^4}{\infty} + \frac{(1,459)^4}{286} + \frac{(0,927)^4}{4}} = 71,88$$

$$\nu_{eff}(\ell_{lido}) = \frac{u^4(\ell_{lido})}{\frac{u^4(\ell)}{\nu(\ell)} + \frac{u^4(\theta)}{\nu(\theta)}} = \frac{(1,966)^4}{\frac{(1,949)^4}{71,88} + \frac{(0,255)^4}{\infty}} = 74,37$$

$$\nu_{eff}(y) = \frac{u^4(y)}{\frac{u^4(\ell_{lido})}{\nu(\ell_{lido})} + \frac{u^4(c)}{\nu(c)}} = \frac{(2,942)^4}{\frac{(1,966)^4}{74,4} + \frac{(2,188)^4}{286}} = 266,6$$

$$\Rightarrow \nu_{ef} = 266$$

Pela tabela dada em [3] : $t_{90}(266) = 1,645$

Logo,

$$U_{90}(266) = t_{90}(266)\, u(y) = 1,645 \times 2,942\ \mu m = 4,84\ \mu m$$

$$\Rightarrow 4,9\ \mu m$$

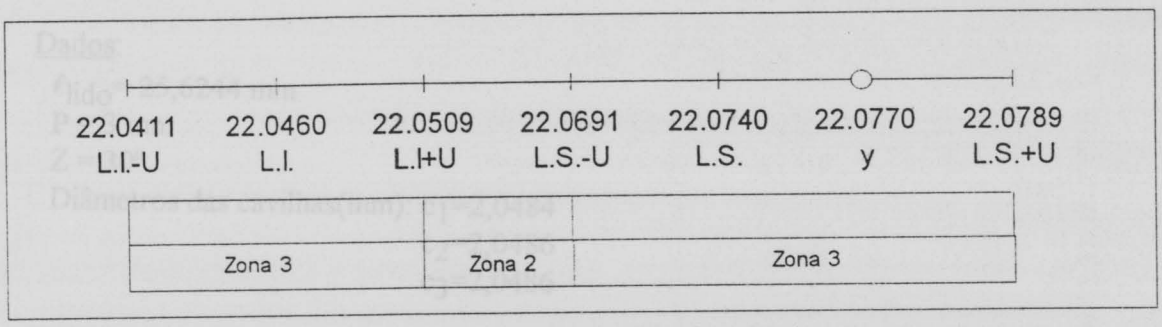
Resultado:

(22,077 ± 0,0049) mm.

A incerteza expandida de medição apresentada corresponde à incerteza padrão de medição multiplicada pelo factor de expansão k = 1,645, calculado a partir da distribuição t com 266 graus de liberdade efectivos para se obter um nível de confiança de aproximadamente 90%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com o documento EAL-R2. A estabilidade de longo prazo do objecto não foi tomada em consideração.

Critério de aceitação

No caso do processo em causa, o critério de aceitação é definido pelo intervalo: [22,046;22,074] mm .
onde 22,046 é o valor mínimo permitido pela norma por se tratar de um calibre com uso
e 22,074 é o valor máximo resultante de: D_2 + 0,007 =22,067+0,007



Atenção: Como os valores são da ordem dos décimos de micron, resolveu-se não fazer a representação proporcionalmente. Por este motivo os valores estão igualmente espaçados. Na realidade as zonas 3 são iguais já que correspondem à amplitude da incerteza expandida.

Conclusão:

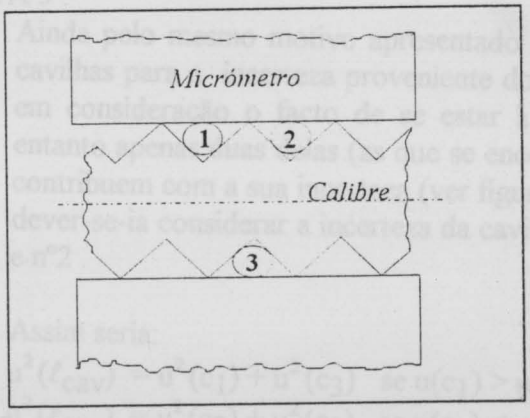
❶ Análise da capacidade do processo de medição

Capacidade = (T-2xU)/T = (0,028-2x0,0049)/0,028 = 0,65

❷ Análise da conformidade do resultado com a sua especificação

O resultado obtido na calibração encontra-se na zona 3 e à direita de L.S. Consequentemente o risco é superior a 50% , rejeitando-se o calibre.

NOTA 1 :



Tendo em conta o processo de medição dever-se-ia entrar com:
- metade do diâmetro da cavilha nº3
- metade do diâmetro da maior cavilha considerando apenas a nº1 e a nº2

Assim seria:

$c_{ponderado} = 0,5(c_1+c_3)$ se $c_1 > c_2$

$c_{ponderado} = 0,5(c_2+c_3)$ se $c_1 < c_2$

Para provar que o resultado obtido com esta aproximação é practicamente igual ao real, consideram-se as três situações seguintes aplicadas aos mesmos dados de entrada, mas fazendo variar o modo de obtenção de c :

Dados:

ℓ_{lido}= 25,6244 mm
P = 3 mm
Z = 30°
Diâmetros das cavilhas(mm): c_1=2,0484
c_2=2,0486
c_3=2,0486

	$y_{flancos}$(processo 1) (mm)
C(médio)	22,067 +2x2,0485 -0,5x3xcotg30° +2,0485x(1/sen30°-1) +0,0022=25,617
C(nominal)	22,067 +2x2,05 -0,5x3xcotg30° +2,05x(1/sen30°-1) +0,0022=25,621
C(ponderado)	22,067 +2x2,0486 -0,5x3xcotg30° +2,0486x(1/sen30°-1) +0,0022=25,617

Ou seja: a diferença entre C(médio) e C(nominal) é de 4 μm enquanto que entre C(médio) e C(ponderado) é neste caso nula.

NOTA 2 :

O que habitualmente se faz quando existem vários instrumentos calibradores utilizados separadamente durante a calibração, é entrar com a maior incerteza deles. Porém, na calibração destes calibres de tampão roscado está-se a utilizar simultaneamente dois instrumentos: um micrómetro e um conjunto de cavilhas contribuindo a incerteza de cada um deles para a incerteza proveniente dos instrumentos calibradores.

NOTA 3 :

Ainda pelo mesmo motivo apresentado na nota 2, a contribuição da incerteza das cavilhas para a incerteza proveniente dos instrumentos de calibração tem de tomar em consideração o facto de se estar a utilizar em simultaneo três cavilhas. No entanto apenas duas delas (as que se encontram em faces diferentes do micrómetro) contribuem com a sua incerteza (ver figura da nota 1). Assim, e tal como na nota 1, dever-se-ia considerar a incerteza da cavilha nº3 e a maior incerteza das cavilhas nº1 e nº2 .

Assim seria:

$u^2(\ell_{cav}) = u^2(c_1) + u^2(c_3)$ se $u(c_1) > u(c_2)$
$u^2(\ell_{cav}) = u^2(c_2) + u^2(c_3)$ se $u(c_1) < u(c_2)$

Por uma questão de simplificação irá ser considerado apenas o dobro do quadrado da maior incerteza - o que corresponde a uma solução pessimista mas segura.

O resultado da incerteza obtida nos dois processos analisados serviu de base para a reformulação do próprio processo de calibração.
Abandonou-se assim o processo nº 2 que originava um valor da incerteza expandida superior em aproximadamente 50% e uma capacidade do processo inferior em aproximadamente 17% (para o exemplo analisado).

Referências

[1] Capítulo III-2 "Calibres de tampão lisos"
[2] Capítulo III-1.1 "Como obter a incerteza padrão a partir de certificados"
[3] Capítulo III-1.3 c) "Como determinar k a partir de graus de liberdade efectivos"
[4] Capítulo II-4.2 e apêndice II-4 "Expressão da incerteza"
[5] Capítulo III-1.4 "Declaração de Conformidade ou Não-Conformidade"

CALIBRES de ROSCADO INTERIOR
(SISTEMA MÉTRICO-WHITWORTH-GAS)

Padrões utilizados na calibração dos dois tipos de calibres, em função do tipo de diâmetro a medir

		Diâmetro interior	Diâmetro de flancos
Anel	processo A	Micrómetro interior	Calibre padrão tampão roscado (P/NP)
	processo B	Micrómetro interior	Banco de calibração e medida
Ferradura	processo C	-	Calibre padrão tampão roscado (P/NP)
	processo D	-	Blocos padrão + cavilhas

Nota: Sempre hajam meios é preferivel a utilização dos métodos A ou C *vs* B ou D por uma questão de facilidade e tempo.

A maneira de lidar com a calibração do diâmetro interior é idêntica à utilizada nos diâmetros dos calibres de tampão liso, excepto que em vez de se recorrer a um micrómetro exterior, se usa logicamente um interior.
*Por este motivo, o procedimento que se segue **trata apenas da calibração do diâmetro de flancos.***

1- Objectivo:

Determinar para os lados passa e não passa dos calibres (quando existam) :

Processos A,C,D

Para a dimensão mínima dos padrões:
- se o calibre padrão tampão roscado (em A e C) ou o conjunto de blocos padrão (em D) conseguiram passar respectivamente pelo diâmetro de flancos do calibre ou pelas cavilhas.

Para a dimensão máxima dos padrões:
- idem, verificando se não passou.

Processo B

O valor resultante da medição do afastamento das faces de medição do banco de calibração e medida no interior do anel.
Exprimir a incerteza associada a esse valor.

Submeter cada caso aos critérios de aceitação.

2- Modelo matemático:

(aplicado apenas para o processo B)

$y_{flancos} = \ell\,(1+\alpha\theta)$ ou seja: $y_{flancos} = f(\ell,\alpha,\theta)$

ℓ : afastamento das faces de medição do banco de calibração e medida.
α : coeficiente de expansão térmica do calibre.
θ : desvio da temperatura do calibre relativamente à temperatura de referência (20°C)

3 - Considerações:

➔ *Processsos A,C e D:*

Como se trata de uma medição por atributos não faz sentido exprimir a incerteza associada ao facto de "passou" ou "não passou".
Porém, se se atender a que "padrão passou" ou "padrão não passou" significa que o diâmetro de flancos se encontra respectivamente acima/abaixo de determinadas medidas de referência, então pode-se e deve-se indicar até que ponto existe certeza de se tratarem *dessas* medidas.
Justifica-se assim a inclusão de componentes da incerteza que dêm informações nesse sentido.

➔ *Processo D:*

- O valor do conjunto de blocos padrão a utilizar (CB) é determinado através da fórmula:

$$CB = D_2 - 2\,c + 0{,}5\,P \times \mathrm{cotg}Z - c\,(\mathrm{cosec}Z - 1) - \delta$$

onde

D_2 = diâmetro de flancos visto no documento interno e auxiliar "folha de cálculos".
c = diâmetro das cavilhas (mm)
Z = 30° para roscas com ângulo de 60°
Z = 27°30' para roscas com ângulo de 55°
δ = factor de correcção visto em tabela própria (mm)

- D_2 tem uma dada tolerância. Para determinar o valor do conjunto de blocos que tem de passar por entre as cavilhas faz-se :

  CB_{passa} = CB - limite inferior da tolerância

  Igualmente para determinar o valor do conjunto de blocos que não pode passar por entre as cavilhas tem de se fazer:

  $CB_{não\text{-}passa}$ = CB + limite superior da tolerância.

- O número de algarismos significativos utilizados para representar o valor da cotangente e da cosecante serão todos os disponíveis na máquina de calcular ou no computador utilizado e não deverá ser inferior a 5.

- O valor do diâmetro das cavilhas (**c**) é o que consta no certificado mais recente da calibração das mesmas e não o seu diâmetro nominal . Dado existirem 3 valores para c (um para cada cavilha) e uma vez que todas elas entram no processo de calibração, irá ser utilizado o seu valor médio. No entanto reconhece-se que um procedimento mais indicado (mas também mais moroso) seria o descrito na nota 1 de [1] .

- O valor do passo (**P**) refere-se ao seu valor nominal. É considerado como constante e sem incerteza associada.

4- Cálculo da incerteza:

⇒ Tal como mencionado na nota final do procedimento referente aos calibres de tampão liso, não será incluida a componente $u(\alpha)$.

4.1- Coeficientes de sensibilidade:

$$c_\ell = \frac{\partial f_1}{\partial \ell} = 1$$

$$c_\theta = \frac{\partial f_1}{\partial \theta} = \ell\alpha = 11{,}5 \times 10^{-6} \times \ell$$

Apesar de não ter sido considerado um modelo matemático para os processos A,C e D quando necessário recorre-se aos coeficientes acima indicados.

4.2- Componentes da incerteza:

Processo B:

(ver as componentes com maior detalhe em [1])

a) Incerteza da medição do diâmetro $u(\ell)$

- Incerteza padrão do banco de calibração e medida $u(\ell_p)$ (ver [2])
- Incerteza padrão da estimativa de entrada

$$u(\bar{\ell}) = s(\bar{\ell}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{j=1}^{n} (\ell_j - \bar{\ell})}$$

Assim:

$$u(\ell) = \sqrt{u^2(\ell_m) + u^2(\bar{\ell})}$$

b) Incerteza do desvio de temperatura do calibre $u(\theta)$

- Incerteza devida à variação cíclica da temperatura:
  $u(\Delta) = 1°C/\sqrt{2} = 0{,}707°C$
- Incerteza padrão do termómetro utilizado $u(\bar{\theta})$ (ver [2])

Assim $u(\theta) = \sqrt{u^2(\Delta) + u^2(\bar{\theta})}$

Processos A e C:

a) Incerteza padrão do padrão tampão roscado $u(\ell_p)$
Considera-se a maior incerteza de todos os padrões utilizados.

b) Incerteza do desvio de temperatura do calibre $u(\theta)$
(igual à considerada para o processo B)

Processo D:

Pela análise da expressão utilizada para calcular CB (ver ponto 3-"considerações") pode-se concluir que **o valor de referência CB vem afectado de uma determinada incerteza provocada pela incerteza do diâmetro das cavilhas.**
O seu valor é dado por:

$$u_{VR} = \frac{\partial_{CB}}{\partial_c} \times u_c = \left[-2 - (\mathrm{cosec} Z - 1)\right] \times u_c$$

em que u_C é a maior incerteza padrão das cavilhas (ver nota 3 de [3]).

Para não estar a alterar o intervalo de tolerância efectivo, continuar-se-á a tomar como referência o valor de CB calculado directamente da expressão.
Ao proceder desta forma está-se a trabalhar com uma situação mais pessimista já que o valor obtido (u_{VR}) iria ser somado ao intervalo da tolerância, permitindo um critério de aceitação mais favorável.

Para alcançar fisicamente esse valor de CB calculado, recorre-se a um conjunto de blocos padrão sobrepostos. **Como os blocos têm uma incerteza dada nos seus certificados, pode-se não estar a fazer passar CB $_{passa}$ mas apenas CB $_{passa}$ - u $_{bp}$ ou CB $_{passa}$ + u $_{bp}$** em que u $_{bp}$ é a incerteza padrão do conjunto de blocos padrão calculada a partir dos certificados de calibração, sendo actualmente dada por:

$$u^2_{bp} = \sum_{i=1}^{n} (0{,}02 + 0{,}3 \cdot L_i)^2$$

$$u_{bp} = \sqrt{u^2_{bp}}$$

com i = bloco I sobreposto para obter L e
L_i = comprimento do padrão i (em metros).

À semelhança dos processos anteriores consideram-se então as componentes:

a) Incerteza padrão dos blocos padrão $\mathbf{u(\lambda_p)} = u_{bp}$

b) Incerteza do desvio de temperatura do calibre $\mathbf{u(\theta)}$
(igual à considerada para o processo B)

4.3 - Incerteza padrão combinada:

$$u^2(y) = u_1^2(y) + u_2^2(y)$$

4.4 - Incerteza expandida de medição (U):

Só faz sentido falar desta incerteza para o processo B .
Será calculada de tal forma que assegure um intervalo com um nível de confiança de aproximadamente 90 %. A determinação de um factor de expansão k que produza esse intervalo é feita com base nos graus efectivos de liberdade.(ver [4])

4.5 - Expressão do resultado

Deverão ser apresentados (sempre que possível) 2 resultados quer para o lado passa quer para o não passa: um referente ao diâmetro interior e outro referente ao diâmetro de flancos, sob a seguinte forma: (ver [5])

➔Diâmetro interior:

$y_{int} \pm U$ em que U foi determinado de acordo com [1] tal como referido.
onde y_{int} e $y_{flancos}$ e U estão expressos em mm.

➔Diâmetro de flancos

Processo B

$y_{flancos} \pm U$
onde y_{int} e $y_{flancos}$ e U estão expressos em mm.

Processos A,C e D

Deverá ser dada uma conclusão do género:
"O padrão correspondente ao limite inferior da tolerância **passou / não passou** .
O padrão correspondente ao limite superior da tolerância **passou / não passou** .

O processo ocorreu com as seguintes componentes de incerteza:
(substituir pelos valores)
a) Incerteza padrão do padrão = $\mathbf{u}(\ell_p)$
b) Incerteza do desvio de temperatura do calibre = $\mathbf{u}(\theta)$"

No caso do processo D deverá ainda acrescentar-se:
"Incerteza associada à determinação do valor de referência = $\mathbf{u}_{VR}$"
(substituir pelo valor)

5 - Confronto com o critério de aceitação

Processo B

Para cada diâmetro (interior e de flancos) dever-se-á confrontar o intervalo definido por $\overline{\ell} \pm U$ com o intervalo de valores que a respectiva norma sugere.(ver [6]).

Processos A,C e D

O diâmetro interior é tratado tal como no processo B.
O diâmetro de flancos é considerado conforme se
-O padrão correspondente ao limite inferior da tolerância **passou.**
e -O padrão correspondente ao limite superior da tolerância **não passou.**

6 - Exemplo ilustrativo:

Aplicado a um calibre roscado interior tipo ferradura M27x3, rosca de 60°

Nota: Só será tratado o diâmetro de flancos e para o lado passa do calibre. Não é possível medir por este processo o lado não passa visto possuir roletes com apenas 1 e 2 filetes de rosca.

Será utilizado o processo designado por D (blocos padrão + cavilhas)

Dados recolhidos:

Temperatura ambiente: 20°C
D_2= 24,995mm
Tolerância superior de D_2 = 21 µm
Tolerância inferior de D_2 = 9 µm
P= 3mm
Z= 30°
δ = 1,6 µm
blocos padrão utilizados:

Incerteza expandida (µm)	0,04+0,6 x L
k	2
Graus efectivos de liberdade	∞

sendo L expresso em metros

cavilhas utilizadas:

	Cavilha 1	Cavilha 2	Cavilha 3
Diâmetro (mm)	2,0484	2,0486	2,0486
Incerteza expandida(µm) (k = 1,645)	1,2	1,2	1,2
Graus efectivos de liberdade	286	286	286

incerteza expandida do termómetro : 1°C com k=2.

Dados calculados:

diâmetro médio das cavilhas: 2048,5 μm
incerteza padrão das cavilhas (μm):

Cavilha 1	Cavilha 2	Cavilha 3
0,73	0,73	0,73

incerteza padrão do termómetro: 0,5°C

CB =24,995 - 2x2,0485 + 0,5x3xcotg30° - 2,0485x(cosec30°-1) -0,0016
=21,446 mm

CB_{passa} = 21,446-0,009 = 21,437 mm
N° blocos padrão sobrepostos:5

$CB_{não\text{-}passa}$ = 21,446+0,021 = 21,467 mm
N° blocos padrão sobrepostos:6

Incerteza padrão:

a) Incerteza padrão dos blocos padrão

$$\mathbf{u(\ell_p) = \sqrt{u^2_{bp}} \quad e \quad u^2_{bp} = \sum_{i=1}^{n} (0{,}02 + 0{,}3 \cdot L_i)^2 \ \mu m}$$

com i = bloco i sobreposto para obter L e
L_i = comprimento do padrão i (em metros).

b) Incerteza do desvio de temperatura do calibre **u(θ)**

$$u(\theta) = \sqrt{u^2(\Delta) + u^2(\bar{\theta})} = \sqrt{0{,}707^2 + 0{,}500^2} = 0{,}866 \ \mu m$$

Incerteza associada à determinação do valor de referência
u_{VR} = (-2-(cosec30°-1)) x 0,73 = 1,46 μm

Graus efectivos de liberdade:

Uma vez que não será calculada uma incerteza expandida (tal como foi dito em 4.4) não tem interesse calcular graus efectivos de liberdade.

Resultado:

O padrão correspondente ao limite inferior da tolerância **passou**.

O padrão correspondente ao limite superior da tolerância **não passou**.

O processo ocorreu com os seguintes componentes de incerteza:

a) Incerteza padrão do padrão = 0,253 μm

b) Incerteza do desvio de temperatura do calibre = 0,866 μm

Incerteza associada à determinação do valor de referência = 1,46 μm

Critério de aceitação e Conclusão:

O diâmetro de flancos é considerado conforme porque

-A combinação de blocos padrão correspondente ao limite inferior da tolerância **passou.**

e -A combinação de blocos padrão correspondente ao limite superior da tolerância **não passou.**

Referências

[1] Capítulo III-2 "Calibres de tampão lisos"
[2] Capítulo III-1.1 "Como obter a incerteza padrão a partir de certificados"
[3] Anexo "Calibres de roscado exterior"
[4] Capítulo III-1.3 c) "Como determinar k a partir de graus de liberdade efectivos"
[5] Capítulo II-4.2 e apêndice II-4 "Expressão da incerteza"
[6] Capítulo III-1.4 "Declaração de Conformidade ou Não-Conformidade"

III

Réguas
Escalas
Fitas métricas

RÉGUAS, ESCALAS E FITAS MÉTRICAS

1- Objectivo:

Testar a exactidão da escala das réguas, das escalas e das fitas métricas.Para isso é necessário determinar os valores resultantes da medição do afastamento das faces de medição do banco de calibração e medida, ao longo da capacidade dos instrumentos.
Exprimir a maior incerteza associada a estas leituras.
Submeter os resultados obtidos ao critério de aceitação.

2- Modelo matemático:

(Aplicado a cada ponto testado)

$$y = \ell\,(1+\alpha\theta) \qquad \text{ou seja: } y = f(\ell,\alpha,\theta)$$

ℓ : afastamento das faces de medição do banco de calibração e medida
α : coeficiente de expansão térmica das faces de medição do banco de calibração e medida
θ : desvio da temperatura relativamente à temperatura de referência (20°C)

3- Considerações:

as mesmas previstas em [1]

4- Cálculo da incerteza:

⇒ Tal como mencionado na nota final do procedimento referente ao calibre de tampão liso, **não será incluida a componente u(α)**.

4.1- Coeficientes de sensibilidade:

$$c_\ell = \frac{\partial f}{\partial \ell} = 1$$

$$c_\theta = \frac{\partial f}{\partial \theta} = \ell\alpha = 11{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot \ell$$

Para o cálculo deste último coeficiente, **entrar-se-á apenas com o maior valor nominal testado.**

4.2- Componentes da incerteza:

a) Incerteza da medição $u(\ell)$

- Incerteza padrão do padrão utilizado $u(\ell_p)$
  (ver [2])

  Consultar o certificado de calibração do banco de calibração e medida

- Incerteza padrão da estimativa de entrada $u(\bar{\ell})$

$$s(\bar{\ell}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{j=1}^{n} (\ell_j - \bar{\ell})}$$

Esta fórmula será aplicada a cada valor testado das réguas, escalas ou fitas métricas.
Em cada instrumento, após se ter calculado todos os valores de $s(\ell)$ **escolhe-se o maior, que representará** $u(\bar{\ell})$ **.**

- Incerteza devida à resolução do instrumento a ser calibrado $u(\ell_R)$

  Existe um intervalo de sinais de entrada que apesar de serem diferentes originam todos a mesma indicação.
  Se a resolução é ∂x, o valor do estímulo que produz a indicação x encontra-se com igual probabilidade no intervalo $[x-\partial x/2 , x+\partial x/2]$ - distribuição rectangular.

  Logo, $u^2(\ell_R) = (\partial x)^2/12$

  Para todos estes instrumentos recorre-se ao conceito de resolução estimada. Considera-se que a resolução coincide com a própria espessura dos traços da escala já que, com a lupa auxiliar montada no banco de calibração e medida, se consegue subdividir o espaço entre dois traços em divisões com a largura desse traço. Para os instrumentos utilizados neste laboratório em média pode-se assumir que os traços têm cerca de 100μm de espessura.

Assim:

$$u(\ell) = \sqrt{u^2(\ell_p) + u^2(\bar{\ell}) + u^2(\ell_R)}$$

Da conjugação do coeficiente c_θ e da incerteza $u(\bar{\ell})$, obtida pelo processo indicado, resulta a situação mais desfavorável possível. Isto é, está-se a admitir que na medição do valor da escala em que ocorreu o maior desvio padrão experimental corresponde o maior valor nominal testado. - o que a acontecer seria uma grande coincidência.

b) Incerteza do desvio de temperatura $u(\theta)$

- Incerteza devida à variação cíclica da temperatura:

$$u(\Delta) = 1°C/\sqrt{2} = 0{,}707°C$$

- Incerteza padrão do termómetro utilizado $u(\bar{\theta})$ (ver [2])

Assim $u(\theta) = \sqrt{u^2(\Delta) + u^2(\bar{\theta})}$

4.3 - Incerteza padrão combinada: u(y)

$$u^2(y) = c^2_\ell u^2(\ell) + c^2_\theta u^2(\theta) = u_1{}^2(y) + u_2{}^2(y)$$

4.4 - Incerteza expandida de medição: U

A incerteza expandida será calculada de tal forma que assegure um intervalo com um nível de confiança de aproximadamente 90 %. A determinação de um factor de expansão k que produza esse intervalo é feita com base nos graus de liberdade efectivos. (ver [3])

$$U = k \cdot u(y)$$

4.5 - Expressão do resultado

Deverão ser apresentados os valores lidos, bem como o erro associado a cada um:

Valor nominal (mm)	Valor lido no instrumento(mm)	Erro(mm)

Uma vez que o número de pontos analisados é elevado opta-se por exprimir a incerteza encontrada da seguinte forma:

"

Valor lido na régua/escala/fita métrica ± **U**

onde *Valor lido na régua/escala/fita métrica* e U estão expressos em mm e *Valor lido na régua/escala/fita métrica* representa qualquer ponto desses instrumentos"

É ainda necessário acrescentar-se o texto descrito em [4]

5 - Confronto com o critério de aceitação

(ver [5])

Para cada valor da escala analisa-se o erro observado e confronta-se com o maior erro admissível em qualquer ponto da escala desse instrumento (visto na norma). Se for menor, esse ponto é os considerado conforme nesta primeira análise. O mesmo processo se aplica a todos outros pontos.

Caso exista algum ponto não-conforme o instrumento é rejeitado globalmente. Mesmo que todos os erros observados sejam inferiores ou iguais aos respectivos erros admissíveis é ainda necessário confirmar se são aceites à luz da incerteza calculada.

Designando por $\mathbf{y_{max}}$ o valor lido no instrumento **correspondente ao maior erro obtido**, e por $\mathbf{y_{nom}}$ o valor nominal correspondente a y_{max}, dever-se-á confrontar o intervalo definido por $\mathbf{y_{max}} \pm \mathbf{U}$ com $\mathbf{y_{nom}}$ ± **erro admissível** de modo a confrontar o maior erro encontrado com o erro admissível (visto na norma).

Note-se que o valor mais afastado (e que apresenta por isso o maior erro) **não tem de ter necessariamente a maior incerteza** (U anteriormente definida).

A situação considerada corresponde por isso ao pior caso possível quer em termos de amplitude da incerteza (como já foi visto em 4.2 alínea a)), **quer em termos de posicionamento do intervalo da incerteza face ao intervalo da tolerância, já que se considera U associada a y_{max} .**

6 - Exemplo ilustrativo:

Aplicado a uma escala graduada de capacidade 0-300 mm

Dados recolhidos:

temperatura ambiente: 20°C

medições (mm)

V.nominal	30.5	101	150	300
1°leitura	30.57	100.96	149.99	299.99
2°leitura	30.56	100.98	149.99	299.98
3°leitura	30.56	100.99	150.06	300.01
4°leitura	30.52	101.02	150.04	299.96
5°leitura	30.56	100.97	150.05	299.99

incerteza expandida do banco de calibração: *Não se conhece actualmente*

incerteza expandida do termómetro : 1°C com k=2.

resolução da escala na capacidade 0-100 mm: 500 µm
resolução da escala na capacidade 1000-300 mm: 100 µm

Dados calculados:

incerteza padrão do banco de calibração -*Não se conhece actualmente. Para que se possa prosseguir com este exemplo vai-se atribuir um valor. Por ex:* 1µm

incerteza padrão do termómetro: 0,5°C

V.nominal (µm)	30500	101000	150000	300000
Média (µm)	30554	100984	150026	299986
D.Padrão (µm)	19,50	23,02	33,62	18,17
Erro (µm)	54	-16	26	-14

máximo desvio padrão: 33,62 µm
máximo erro: 54 µm
máximo valor nominal testado: 300000 µm

resolução estimada da escala: 100 µm

Tabela resumo:

Componentes $u(x_i)$	Fonte de incerteza	$c_i = \partial f / \partial x_i$	Incerteza padrão $u(x_i)$	$u_i(y)=\|c_i\|u(x_i)$ (μm)	Contribuição de cada $u_i(y)$ %	Graus liberdade efectivos
$u(\ell)$	4.2.a)	1	32,563	32,563	99,2	88
$u(\ell_p)$			1,000		0,09	∞
$u(\bar{\ell})$			15,033		21,31	4
$u(\ell_r)$			28,868		78,59	∞
$u(\theta)$	4.2.b)	3,450	0,866	2,988	0,8	∞
$u(\Delta)$			0,707		67	∞
$u(\bar{\theta})$			0,500		33	∞

Incerteza padrão:

$$u^2(y) = c^2_{\ell}\, u^2(\ell) + c^2_{\theta}\, u^2(\theta) = u_1{}^2(y) + u_2{}^2(y) =$$
$$= (32,563)^2 + (2,988)^2 = 1069,26\ \mu m$$
$$u(y) = \sqrt{1069,26} = 32,70\ \mu m$$

Graus de liberdade efectivos:

No momento em que foi feita esta calibração não se dispunham de dados relativos aos graus de liberdade efectivos do termómetro. No entanto mesmo que existisse dado não se entraria com ele visto a sua contribuição ser pequena.

$$\nu_{ef}(\ell) = \frac{u^4(\ell)}{\frac{u^4(\ell_p)}{\nu(\ell_p)} + \frac{u^4(\bar{\ell})}{\nu(\bar{\ell})} + \frac{u^4(\ell_r)}{\nu(\ell_r)}} = \frac{(32,563)^4}{\frac{(1,0)^4}{\infty} + \frac{(15,033)^4}{4} + \frac{(28,868)^4}{\infty}} = 88,05$$

$$\nu_{ef}(y) = \frac{u^4(y)}{\frac{u^4(\ell)}{\nu(\ell)} + \frac{u^4(\theta)}{\nu(\theta)}} = \frac{(32,70)^4}{\frac{(32,563)^4}{88,05} + \frac{(2,988)^4}{\infty}} = 89,54 \Rightarrow \nu_{ef} = 89$$

Pela tabela dada em [3] : $t_{90}(89) = 1,66$

Logo,

$$U_{90}(89) = t_{90}(89)\, u(y) = 1,66 \times 32,70\ \mu m = 54,35 \mu m$$
$$\Rightarrow 55\ \mu m$$

Resultado:

Valor nominal (mm)	Valor lido na escala (média) (mm)	Erro (mm)
30,5	30,554	0,054
101	100,984	-0,016
150	150,026	0,026
300	299,986	-0,014

Valor lido na escala± 0,055

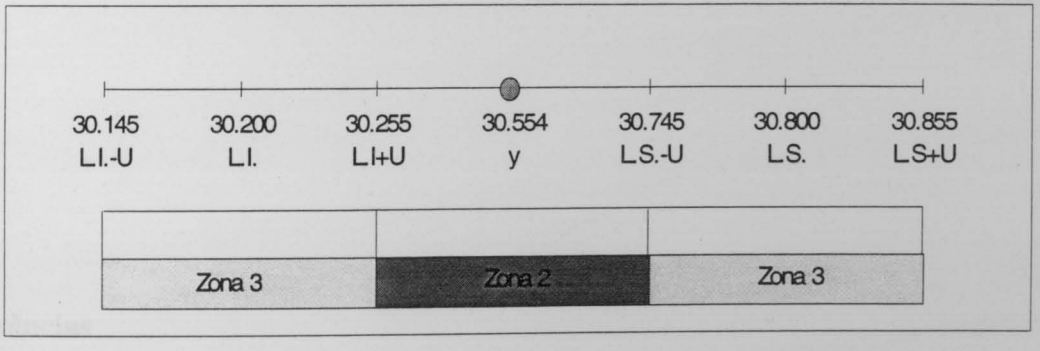
onde *Valor lido na escala* e U estão expressos em mm e *Valor lido na escala* representa qualquer ponto da escala"

A incerteza expandida de medição apresentada corresponde à incerteza padrão de medição multiplicada pelo factor de expansão $k = 1,66$, calculado a partir da distribuição t com 89 graus de liberdade efectivos para se obter um nível de confiança de aproximadamente 90%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com o documento EAL-R2. A estabilidade de longo prazo do objecto não foi tomada em consideração.

Critério de aceitação

Dever-se-á confrontar $\mathbf{y_{max} \pm U}$ com $\mathbf{y_{nom}}$ **±erro admissível**

Nas escalas de capacidade 0-300 mm, o erro admitido é de ±0,30 mm.
Ou seja, neste caso dever-se-á confrontar 30,554 ± 0,055 com 30,500 ± 0,30



Atenção: Como os valores são da ordem dos micron, resolveu-se não fazer a representação proporcionalmente. Por este motivo os valores estão igualmente espaçados.
Na realidade as zonas 3 são iguais já que correspondem à amplitude da incerteza expandida.

Conclusão:

❶ Análise da capacidade do processo de medição

Capacidade = (T-2xU)/T = (0,6-2x0,055)/0,6 = 0,82

❷ Análise da conformidade do resultado com a sua especificação

O resultado obtido na calibração encontra-se na zona 2. Por isso a escala é dada como conforme.

Referências

[1] Capítulo III-2 "Calibres de tampão lisos"
[2] Capítulo III-1.1 "Como obter a incerteza padrão a partir de certificados"
[3] Capítulo III-1.3 c) "Como determinar k a partir de graus de liberdade efectivos"
[4] Capítulo II-4.2 e apêndice II-4 "Expressão da incerteza"
[5] Capítulo III-1.4 "Declaração de Conformidade ou Não-Conformidade"

Medidores de Interiores e de Espessuras

MEDIDORES DE INTERIORES E DE ESPESSURAS

1- Objectivo:

Testar a exactidão da escala dos:

I - Medidores de espessuras: determinar os valores resultantes da medição dos blocos padrão ao longo da capacidade do medidor.

II -Medidores de interiores: determinar os valores resultantes da medição do afastamento das faces de medição do banco de calibração e medida, ao longo da capacidade do medidor.

Exprimir a maior incerteza associada a estas leituras.

Submeter os resultados obtidos ao critério de aceitação.

2- Modelo matemático:

(Aplicado a cada ponto testado)

$\mathbf{y = \ell\,(1+\alpha\theta)}$ ou seja: $y = f(\ell,\alpha,\theta)$

ℓ : -comprimento do bloco padrão (em I)
-afastamento das faces de medição do banco de calibração e medida (em II)

α : coeficiente de expansão térmica do bloco(I)/ faces de medição do banco de calibração e medida(II)

θ : desvio da temperatura relativamente à temperatura de referência (20°C)

3- Considerações:

as mesmas previstas em [1]

4- Cálculo da incerteza:

⇒ Tal como mencionado na nota final do procedimento referente ao calibre de tampão liso, **não será incluida a componente u(α)**.

4.1- Coeficientes de sensibilidade:

$$c_\ell = \frac{\partial f}{\partial \ell} = 1$$

$$c_\theta = \frac{\partial f}{\partial \theta} = \ell\alpha = 11{,}5\text{x}10^{-6}\text{ x }\ell$$

Para o cálculo deste último coeficiente, **entrar-se-á apenas com o maior valor nominal testado.**

4.2- Componentes da incerteza:

a) Incerteza da medição $u(\ell)$

- Incerteza padrão do padrão utilizado $u(\ell_p)$
  (ver [2])

  I - A incerteza devida ao padrão será calculada para cada valor testado da escala.
  Se se recorrer à sobreposição de vários blocos padrão, somam-se os quadrados das incertezas padrão dos blocos intervenientes na medição desse ponto da escala.
  Após se ter calculado o valor desse componente para todos os pontos, escolhe-se o maior cuja raíz quadrada representará $u(\ell_p)$

  Na prática e actualmente, a entidade calibradora dos blocos padrão garante que a incerteza dos mesmos é dada pela fórmula 0,02+0,3xL, em que L representa o comprimento do bloco padrão, expresso em metros.

  $u(\ell_p)$ vem então da expressão:

  $$u(\ell_p) = \sqrt{u^2_{bp}} \quad \text{e} \quad u^2bp = \sum_{i=1}^{n} (0{,}02 + 0{,}3 \cdot L_i)^2 \ \mu m$$

  em que n = nº blocos sobrepostos para obter L (maior valor nominal testado, em metros).
  i = bloco i sobreposto para obter L
  L_i = comprimento do padrão i (em metros).

  II- Consultar o certificado de calibração do banco de calibração e medida

- Incerteza padrão da estimativa de entrada $u(\bar{\ell})$

$$s(\bar{\ell}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{j=1}^{n} (\ell_j - \bar{\ell})}$$

Esta fórmula será aplicada a cada valor testado da escala.
Após se ter calculado todos os valores de $s(\bar{\ell})$ escolhe-se o maior, que representará $u(\bar{\ell})$.

- Incerteza devida à resolução do medidor $\mathbf{u(\ell_R)}$

  Existe um intervalo de sinais de entrada que apesar de serem diferentes originam todos a mesma indicação.
  Se a resolução é ∂x, o valor do estímulo que produz a indicação x encontra-se com igual probabilidade no intervalo $[x-\partial x/2 \ , \ x+\partial x/2]$ - distribuição rectangular.

  Logo, $u^2(\ell_R) = (\partial x)^2/12$

  Nestes instrumentos com mostrador tipo relógio, relaciona-se a espessura do ponteiro com o espaço físico entre duas indicações .Obtém-se assim uma resolução estimada e calcula-se ∂x através da expressão:
  [Espessura do ponteiro / Espaço físico entre duas indicações(medição directa sobre o mostrador)] x Resolução real do medidor.

Assim:

$$u(\ell) = \sqrt{u^2(\ell_p) + u^2(\bar{\ell}) + u^2(\ell_R)}$$

NOTA:

Da conjugação do coeficiente c_θ e das incertezas $u(\ell_p)$ e $u(\bar{\ell})$, obtidas pelo processo indicado, resulta a situação mais desfavorável possível. Isto é, está-se a admitir, que na medição do valor da escala em que ocorreu o maior desvio padrão experimental foi utilizado o padrão com maior incerteza - o que a acontecer seria uma grande coincidência.
Para evitar este tipo de situações penalizantes, poderia recorrer-se ao processo indicado na nota 1 de [3]. Tal não será feito por uma questão de tempo e de simplicidade do procedimento.

b) Incerteza do desvio de temperatura $\mathbf{u(\theta)}$

- Incerteza devida à variação cíclica da temperatura:

  $$\mathbf{u(\Delta)} = 1°C/\sqrt{2} = 0{,}707°C$$

- Incerteza padrão do termómetro utilizado $\mathbf{u(\bar{\theta})}$
  (ver [2])

Assim $u(\theta) = \sqrt{u^2(\Delta) + u^2(\bar{\theta})}$

4.3 - Incerteza padrão combinada: u(y)

$$u^2(y) = c^2_{\ell}\, u^2(\ell) + c^2\theta\, u^2(\theta) = u_1{}^2(y) + u_2{}^2(y)$$

4.4 - Incerteza expandida de medição: U

A incerteza expandida será calculada de tal forma que assegure um intervalo com um nível de confiança de aproximadamente 90 %. A determinação de um factor de expansão k que produza esse intervalo é feita com base nos graus de liberdade efectivos. (ver [4])

$$U = k \cdot u(y)$$

4.5 - Expressão do resultado

Deverão ser apresentados, para cada medidor, todos os valores lidos bem como o erro associado a cada um:

Valor nominal (mm)	Valor lido no medidor (mm)	Erro(mm)

Dado não se tratar de um único ponto analisado, é preferível exprimir a incerteza encontrada da seguinte forma:

"

Valor lido no medidor de interiores / espessuras ± **U**

onde *Valor lido no medidor de interiores / espessuras* e U estão expressos em mm e *Valor lido no medidor de interiores / espessuras* representa qualquer ponto desses medidores"

É ainda necessário acrescentar-se o texto descrito em [5]

5 - Confronto com o critério de aceitação

(ver [6])

Para cada valor da escala analisa-se o erro observado e confronta-se com o maior erro admissível em qualquer ponto da escala desses instrumentos(visto na norma). Se for menor, esse ponto é considerado conforme nesta primeira análise. O mesmo processo se aplica a todos os outros pontos.

Caso exista algum ponto não-conforme o medidor é rejeitado globalmente.

Mesmo que todos os erros observados sejam inferiores ou iguais aos respectivos erros admissíveis é ainda necessário confirmar se são aceites à luz da incerteza calculada.
Designando por y_{max} o valor lido no medidor **correspondente ao maior erro obtido**, e por y_{nom} o valor nominal correspondente a y_{max}, dever-se-á confrontar o intervalo definido por $y_{max} \pm U$ com y_{nom} **± erro admissível** de modo a confrontar o maior erro encontrado com o erro admissível (visto na norma).

Note-se que o valor mais afastado (e que apresenta por isso o maior erro) **não tem de ter necessariamente a maior incerteza** (U anteriormente definida).
A situação considerada corresponde por isso ao pior caso possível quer em termos de amplitude da incerteza (como já foi visto em 4.2 alínea a)), **quer em termos de posicionamento do intervalo da incerteza face ao intervalo da tolerância, já que se considera U associada a y_{max} .**

6 - Exemplo ilustrativo:

Aplicado a um medidor de interiores MITUTOYO de capacidade 10-30 mm

Dados recolhidos:

temp.ambiente: 19°C

medições (mm)

V.nominal	10	20	30
1°leitura	10,000	20,005	30,000
2°leitura	10,000	20,010	30,050
3°leitura	10,000	20,010	30,005
4°leitura	10,000	20,015	30,000
5°leitura	10,000	20,020	29,995

incerteza expandida do banco de calibração: *Não se conhece actualmente*
incerteza expandida do termómetro : 1°C com k=2.

resolução do medidor de interiores: 10 µm
espessura do ponteiro (aprox.): 0,2 mm

espaço físico entre duas indicações: 1 mm

Dados calculados:

incerteza padrão do banco de calibração -*Não se conhece actualmente. Para que se possa prosseguir com este exemplo vai-se atribuir um valor. Por ex:* 1µm

incerteza padrão do termómetro: 0,5°C

V.nominal (µm)	10000	20000	30000
Média (µm)	10000	20012	30010
D.Padrão (µm)	0	5,70	22,64
Erro (µm)	0	12	10

máximo desvio padrão: 22,64 µm
máximo erro: 12 µm
máximo valor nominal testado: 300000 µm

resolução estimada do medidor de interiores: 0,2/1x10 =2µm

Tabela resumo:

Componentes $u(x_i)$	Fonte de incerteza	$c_i = \partial f / \partial x_i$	Incerteza padrão $u(x_i)$	$u_i(y)=\lvert c_i \rvert u(x_i)$ (µm)	Contribuição de cada $u_i(y)$ %	Graus liberdade efectivos
$u(\ell)$	4.2.a)	1	10,190	10,190	99,9	4
$u(\ell_p)$			1,000		1	∞
$u(\ell')$			10,124		98,7	4
$u(\ell_r)$			0,577		0,3	∞
$u(\theta)$	4.2.b)	0,345	0,866	0,299	0,1	∞
$u(\Delta)$			0,707		67	∞
$u(\bar{\theta})$			0,500		33	∞

Incerteza padrão:

$$u^2(y) = c^2_{\ell}\, u^2(\ell) + c^2_{\theta}\, u^2(\theta) = u_1{}^2(y) + u_2{}^2(y) =$$
$$= (10{,}190)^2 + (0{,}299)^2 = 103{,}923\ \mu m$$

$$u(y) = \sqrt{103{,}923} = 10{,}19\ \mu m$$

Graus de liberdade efectivos:

No momento em que foi feita esta calibração não se dispunham de dados relativos aos graus de liberdade efectivos do termómetro. No entanto mesmo que existisse dado não se entraria com ele visto a sua contribuição ser pequena.

$$\nu_{ef}(\ell) = \frac{u^4(\ell)}{\frac{u^4(\ell_p)}{\nu(\ell_p)} + \frac{u^4(\bar{\ell})}{\nu(\bar{\ell})} + \frac{u^4(\ell_r)}{\nu(\ell_r)}} = \frac{(10{,}190)^4}{\frac{(1{,}0)^4}{\infty} + \frac{(10{,}124)^4}{4} + \frac{(0{,}577)^4}{\infty}} = 4{,}10$$

$$\nu_{ef}(y) = \frac{u^4(y)}{\frac{u^4(\ell)}{\nu(\ell)} + \frac{u^4(\theta)}{\nu(\theta)}} = \frac{(10{,}19)^4}{\frac{(10{,}190)^4}{4{,}10} + \frac{(0{,}299)^4}{\infty}} = 4{,}11 \Rightarrow \nu_{ef} = 4$$

Pela tabela dada em [3] : $t_{90}(4) = 2{,}13$

Logo,

$$U_{90}(4) = t_{90}(4)\, u(y) = 2{,}13 \times 10{,}19\ \mu m = 21{,}7\mu m \Rightarrow 22\ \mu m$$

Resultado:

Valor nominal (mm)	Valor lido no mostrador (média) (mm)	Erro (mm)
10	10,000	0,000
20	20,012	0,012
30	30,010	0,010

Valor lido no mostrado r± 0,022

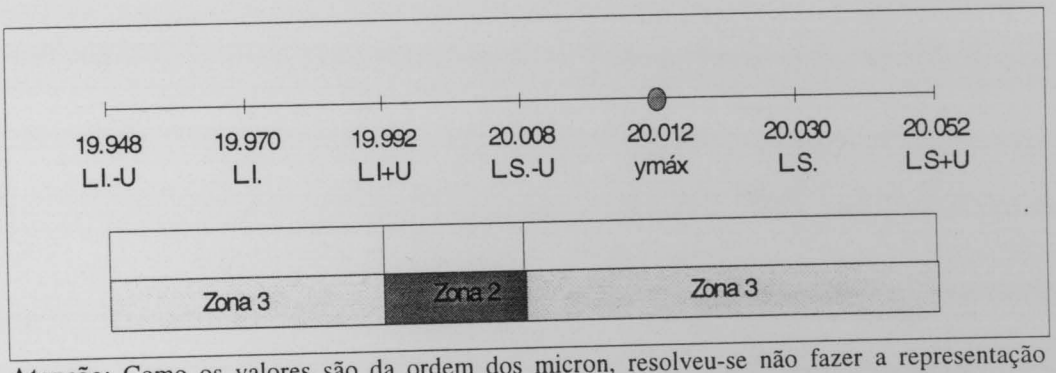
onde *Valor lido no mostrador* e U estão expressos em mm e *Valor lido no mostrador* representa qualquer ponto da escala do medidor de interiores"

A incerteza expandida de medição apresentada corresponde à incerteza padrão de medição multiplicada pelo factor de expansão $k = 2{,}13$, calculado a partir da distribuição t com 4 graus de liberdade efectivos para se obter um nível de confiança de aproximadamente 90%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com o documento EAL-R2. A estabilidade de longo prazo do objecto não foi tomada em consideração.

Critério de aceitação

Dever-se-á confrontar $y_{max} \pm U$ com y_{nom} **±erro admissível**

Nos medidores de interiores MITUTOYO de capacidade 10-30 mm, o erro admitido é de ±0,03 mm.
Ou seja, neste caso dever-se-á confrontar 20,012 ± 0,022 com 20,000 ± 0,03



Atenção: Como os valores são da ordem dos micron, resolveu-se não fazer a representação proporcionalmente. Por este motivo os valores estão igualmente espaçados.
Na realidade as zonas 3 são iguais já que correspondem à amplitude da incerteza expandida.

Conclusão:

❶ Análise da capacidade do processo de medição

Capacidade = (T-2xU)/T = (0,06-2x0,022)/0,06 = 0,26

❷ Análise da conformidade do resultado com a sua especificação

O resultado obtido na calibração encontra-se na zona 3. Por isso é necessário analisar o risco de aceitar o instrumento. O risco é inferior ao risco máximo admissível (50%), já que y se encontra à esquerda de L.S.

❸ Cálculo do valor do risco

$z' = (L.S.-y)/u(y) = (20,030-20,012)/0,01019 = 1,76$

Pela tabela de [7] , $P(Z \geq z') = 0,0392$
Como o valor de y se situa próximo da "cauda" da distribuição, o verdadeiro risco é de facto maior (ver nota do capítulo secção 1.4).

Logo, assume-se que o risco de aceitar o instrumento seja cerca de 6%

Referências

[1] Capítulo III-2 "Calibres de tampão lisos"
[2] Capítulo III-1.1 "Como obter a incerteza padrão a partir de certificados"
[3] Anexo"Micrómetros"
[4] Capítulo III-1.3 c) "Como determinar k a partir de graus de liberdade efectivos"
[5] Capítulo II-4.2 e apêndice II-4 "Expressão da incerteza"
[6] Capítulo III-1.4 "Declaração de Conformidade ou Não-Conformidade"
[7] Apêndice III-4 "Tabela de Probabilidades"

Paquímetros

PAQUÍMETROS

Por uma questão de simplicidade, neste procedimento irão ser agrupados os paquímetros de acordo com o padrão utilizado na sua calibração.
Surgem assim os seguintes grupos:

	Paquímetros	Padrão
I	• Paquímetros tipo A;B;D;E de capacidade <200 mm • Paquímetros de engrenagens	Blocos padrão
II	• Centri-meter	Placas padrão
III	• Paquímetros tipo A,B,D,E de capacidade >200 mm • Paquímetros tipo C	Banco de calibração e medida

1- Objectivo:

Testar a exactidão da escala dos paquímetros, para a maxila exterior, maxila interior e alturas.

I -Determinar os valores resultantes da medição dos blocos padrão ao longo da capacidade do paquímetro.
II -Determinar os valores resultantes da medição da distância entre furos das placas padrão.
III-Determinar os valores resultantes da medição do afastamento das faces de medição do banco de calibração e medida, ao longo da capacidade do paquímetro.

Exprimir a maior incerteza associada a estas leituras.
Submeter os resultados obtidos ao critério de aceitação.

Nota: No caso dos paquímetros de centri-meter é ainda necessário calibrar as varetas de ampliação - o que será feito num outro procedimento.

2- Modelo matemático:

(Aplicado a cada tipo de maxila existente no paquímetro)

$$y = \ell\,(1+\alpha\theta) \qquad \text{ou seja: } y = f(\ell,\alpha,\theta)$$

ℓ : -comprimento do bloco padrão (em I)
-distância entre furos das placas padrão (em II)
-afastamento das faces de medição do banco de calibração e medida (em III)

α : coeficiente de expansão térmica do bloco(I)/ placas(II)/ faces de medição do banco de calibração e medida(III)

θ : desvio da temperatura relativamente à temperatura de referência (20°C)

3- Considerações:

as mesmas previstas em [1]

4- Cálculo da incerteza:

$\Rightarrow$ Tal como mencionado na nota final do procedimento referente ao calibre de tampão liso, **não será incluida a componente u(α)**.

4.1- Coeficientes de sensibilidade:

$$c_\ell = \frac{\partial f}{\partial \ell} = 1$$

$$c_\theta = \frac{\partial f}{\partial \theta} = \ell\alpha = 11{,}5\text{x}10^{-6}\,\text{x}\,\ell$$

Para o cálculo deste último coeficiente, **entrar-se-á apenas com o maior valor nominal testado.**

4.2- Componentes da incerteza:

a) Incerteza da medição u(ℓ)

- Incerteza padrão do padrão utilizado **u(ℓ_p)**
  (ver [2])

  I - A incerteza devida ao padrão será calculada para cada valor testado da escala.
  Se se recorrer à sobreposição de vários blocos padrão, somam-se os quadrados das incertezas padrão dos blocos intervenientes na medição desse ponto da escala.
  Após se ter calculado o valor desse componente para todos os pontos, escolhe-se o maior cuja raíz quadrada representará u(ℓ_p)

  Na prática e actualmente, a entidade calibradora dos blocos padrão garante que a incerteza dos mesmos é dada pela fórmula 0,02+0,3xL, em que L representa o comprimento do bloco padrão, expresso em metros.

Assim sendo a maior incerteza corresponde ao maior L testado, mesmo que este tenha sido obtido por sobreposição de vários blocos.

$\mathbf{u(\ell_p)}$ vem então da expressão:

$$\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(0{,}02+0{,}3\cdot L_i)^2}$$

em que n = nº blocos sobrepostos para obter L (maior valor nominal testado, em metros), e L_i = comprimento dapadrão i.

II - De todas as placas padrão utilizadas **entrar-se-á apenas com a incerteza da placa padrão que apresentar maior incerteza padrão.**

III- Consultar o certificado de calibração do banco de calibração e medida

- Incerteza padrão da estimativa de entrada $\mathbf{u(\bar{\ell})}$

$$s(\bar{\ell})=\sqrt{\frac{1}{n(n-1)}\sum_{j=1}^{n}(\ell_j-\bar{\ell})}$$

Esta fórmula será aplicada a cada valor testado da escala e para cada uma das maxilas existentes no paquímetro em causa. No caso dos paquímetros centri-meter, para cada um destes valores é ainda necessário obter as medições com os contactos de medição finos e grossos.
Em cada maxila, após se ter calculado todos os valores de $s(\bar{\ell})$ **escolhe-se o maior, que representará** $\mathbf{u(\bar{\ell})}$ **.**

- Incerteza devida à resolução do paquímetro $\mathbf{u(\ell_R)}$

Existe um intervalo de sinais de entrada que apesar de serem diferentes originam todos a mesma indicação.
Se a resolução é ∂x, o valor do estímulo que produz a indicação x encontra-se com igual probabilidade no intervalo $[x-\partial x/2\ ,\ x+\partial x/2]$ - distribuição rectangular.

Logo, $u^2(\ell_R)=(\partial x)^2/12$

- No caso dos paquímetros digitais ∂x é dado pela diferença de indicação que corresponde à alteração de uma unidade do algarismo menos significativo do dispositivo indicador.

- No caso dos paquímetros analógicos existe sempre um nónio. Neste caso ∂x é a própria resolução indicada no aparelho.

Assim:

$$u(\ell) = \sqrt{u^2(\ell_p) + u^2(\bar{\ell}) + u^2(\ell_R)}$$

NOTA:

Da conjugação do coeficiente c_θ e das incertezas $u(\ell_p)$ e $u(\bar{\ell})$, obtidas pelo processo indicado, resulta a situação mais desfavorável possível. Isto é, está-se a admitir, para cada maxila, que na medição do valor da escala em que ocorreu o maior desvio padrão experimental foi utilizado o padrão com maior incerteza - o que a acontecer seria uma grande coincidência.
Para evitar este tipo de situações penalizantes, poderia recorrer-se ao processo indicado na nota 1 de [3]. Tal não será feito por uma questão de tempo e de simplicidade do procedimento.

Também por uma questão de simplicidade não se vai associar uma incerteza a cada tipo de maxila. O maior valor da incerteza das maxilas analisadas será assumido como a incerteza do paquímetro. Consequentemente, podem haver maxilas que se aceitariam como válidas se analisadas individualmente, mas que estão a ser rejeitadas por se tratar o paquímetro como um todo.
A qualquer momento se pode alterar este tipo de procedimento passando-se a calcular tantos valores da incerteza quantas as maxilas existentes.

Tendo em conta a NOTA anterior e o modo de calcular os componentes da incerteza, conclui-se que para obter $u(\ell)$ do paquímetro basta condiderar o maior valor de $u(\bar{\ell})$ e de $u(\ell_p)$ encontrados nas várias maxilas.

b) Incerteza do desvio de temperatura $u(\theta)$

- Incerteza devida à variação cíclica da temperatura:

$$u(\Delta) = 1°C/\sqrt{2} = 0{,}707°C$$

- Incerteza padrão do termómetro utilizado $u(\bar{\theta})$
(ver [2])

Assim $u(\theta) = \sqrt{u^2(\Delta) + u^2(\bar{\theta})}$

4.3 - Incerteza padrão combinada: u (y)

$$u^2(y) = c^2_{\ell}\, u^2(\ell) + c^2_{\theta}\, u^2(\theta) = u_1{}^2(y) + u_2{}^2(y)$$

4.4 - Incerteza expandida de medição: U

A incerteza expandida será calculada de tal forma que assegure um intervalo com um nível de confiança de aproximadamente 90 %. A determinação de um factor de expansão k que produza esse intervalo é feita com base nos graus de liberdade efectivos. (ver [4])

$$U = k \times u(y)$$

4.5 - Expressão do resultado

Deverão ser apresentados para cada maxila todos os valores lidos, bem como o erro associado a cada um:

Valor nominal (mm)	Valor lido no paquímetro (mm)	Erro(mm)

Uma vez que o número de pontos analisados é muito elevado opta-se por exprimir a incerteza encontrada da seguinte forma:

"

Valor lido no paquímetro ± **U**

onde *Valor lido no paquímetro* e U estão expressos em mm e *Valor lido no paquímetro* representa qualquer ponto do paquímetro"

É ainda necessário acrescentar-se o texto descrito em [5]

Nota:

No caso dos paquímetros centri-meter deverão ser expressos dois valores para a incerteza:

- um referente à utilização do centri-meter sem varetas de ampliação. A incerteza neste caso é apenas a que se obteve através deste procedimento.
- outro referente à utilização do centri-meter com varetas de ampliação. A incerteza é neste caso a soma da que se obteve através deste procedimento com a que se obtém através do procedimento referente à calibração das mesmas.

5 - Confronto com o critério de aceitação

(ver [6])

Para cada valor da escala analisa-se o erro observado e confronta-se com o maior erro admissível para esse ponto (visto na norma). Se for menor, esse ponto é considerado conforme nesta primeira análise. O mesmo processo se aplica a todos os outros pontos.

Caso exista algum ponto não-conforme o paquímetro é rejeitado globalmente.

Mesmo que todos os erros observados sejam inferiores ou iguais aos respectivos erros admissíveis é ainda necessário confirmar se são aceites à luz da incerteza calculada.

Designando por $\mathbf{y_{max}}$ o valor lido no paquímetro **correspondente ao maior erro obtido**, e por $\mathbf{y_{nom}}$ o valor nominal correspondente a y_{max}, dever-se-á confrontar o intervalo definido por $\mathbf{y_{max} \pm U}$ com $\mathbf{y_{nom}}$ **± erro admissível** de modo a confrontar o maior erro encontrado com o erro admissível (visto na norma).

> **Note-se que o valor mais afastado** (e que apresenta por isso o maior erro) **não tem de ter necessariamente a maior incerteza** (U anteriormente definida).
> **A situação considerada corresponde por isso ao pior caso possível quer em termos de amplitude da incerteza** (como já foi visto em 4.2 alínea a)), **quer em termos de posicionamento do intervalo da incerteza face ao intervalo da tolerância, já que se considera U associada a y_{max} .**

6 - Exemplo ilustrativo:

Aplicado a um paquímetro centri-meter de capacidade 0-125 mm

Dados recolhidos:

temp.ambiente: 21°C

medições (mm)

	Placa de 80 mm		Placa de 125 mm	
Contactos de medição	finos	grossos	finos	grossos
V.nominal (mm)	79,995	79,995	125,002	125,002
1°leitura	79,98	80,00	124,98	125,00
2°leitura	79,98	80,00	124,98	125,00
3°leitura	80,00	80,02	124,97	125,02
4°leitura	79,98	80,01	125,00	125,02
5°leitura	79,99	80,00	124,98	125,02

Considera-se que o valor nominal é o valor da distância entre furos das placas e que consta no último certificado de calibração das mesmas

placas padrão utilizadas:

	Placa de 80 mm	Placa de 125 mm
Incerteza expandida (μm)	2	1,5
k	2	2
Graus efectivos de liberdade	∞	∞

incerteza expandida do termómetro : 1°C com k=2.

resolução do paquímetro: 20 μm

Dados calculados:

incerteza padrão das placas padrão - de 80 mm: 1 μm
- de 125 mm: 0,75 μm

incerteza padrão do termómetro: 0,5°C

V.nominal (μm)	79995	79995	125002	125002
Média (μm)	79986	80006	124982	125012
D.Padrão (μm)	8,94	8,94	10,95	10,95
Erro (μm)	9	11	20	10

máximo desvio padrão: 10,95 μm
máximo erro: 20 μm
máximo valor nominal testado: 125002 μm

Tabela resumo:

Componentes $u(x_i)$	Fonte de incerteza	$c_i = \partial f / \partial x_i$	Incerteza padrão $u(x_i)$	$u_i(y)=\lvert c_i \rvert u(x_i)$ (μm)	Contribuição de cada $u_i(y)$ %	Graus liberdade efectivos
$u(\ell)$	4.2.a)	1	7,638	7,638	97	24
$u(\ell_p)$			1,000		2	∞
$u(\bar{\ell})$			4,899		41	4
$u(\ell_r)$			5,774		57	∞
$u(\theta)$	4.2.b)	1,438	0,866	1,245	3	∞
$u(\Delta)$			0,707		67	∞
$u(\bar{\theta})$			0,500		33	∞

Incerteza padrão:

$$u^2(y) = c^2_{\ell}\, u^2(\ell) + c^2\theta\, u^2(\theta) = u_1{}^2(y) + u_2{}^2(y) =$$
$$= (7{,}638)^2 + (1{,}245)^2 = 59{,}88\ \mu m$$

$$u(y) = \sqrt{59{,}88} = 7{,}74\ \mu m$$

Graus de liberdade efectivos:

No momento em que foi feita esta calibração não se dispunham de dados relativos aos graus de liberdade efectivos do termómetro. No entanto mesmo que existisse este dado, não se entraria com ele visto a sua contribuição ser pequena.

$$\nu_{ef}(\ell) = \frac{u^4(\ell)}{\frac{u^4(\ell_p)}{\nu(\ell_p)} + \frac{u^4(\bar{\ell})}{\nu(\bar{\ell})} + \frac{u^4(\ell_r)}{\nu(\ell_r)}} = \frac{(7{,}638)^4}{\frac{(1)^4}{\infty} + \frac{(4{,}899)^4}{4} + \frac{(5{,}774)^4}{\infty}} = 23{,}63$$

$$\nu_{ef}(y) = \frac{u^4(y)}{\frac{u^4(\ell)}{\nu(\ell)} + \frac{u^4(\theta)}{\nu(\theta)}} = \frac{(7{,}74)^4}{\frac{(7{,}638)^4}{23{,}63} + \frac{(1{,}245)^4}{\infty}} = 24{,}90 \Rightarrow \nu_{ef} = 24$$

Pela tabela dada em [4] : $t_{90}(24) = 1{,}71$

Logo,

$$U_{90}(24) = t_{90}(24)\, u(y) = 1{,}71 \times 7{,}74\ \mu m = 13{,}24 \mu m \Rightarrow 14\ \mu m$$

Resultado:

Valor nominal (mm)	Valor lido no paquímetro(média) (mm)	Erro (mm)
79,995	79,986	0,009
79,995	80,006	0,011
125,002	124,982	0,020
125,002	125,012	0,010

Valor lido no paquímetro $\pm$ 0,014

onde *Valor lido no paquímetro* e U estão expressos em mm e *Valor lido no paquímetro* representa qualquer ponto do paquímetro"

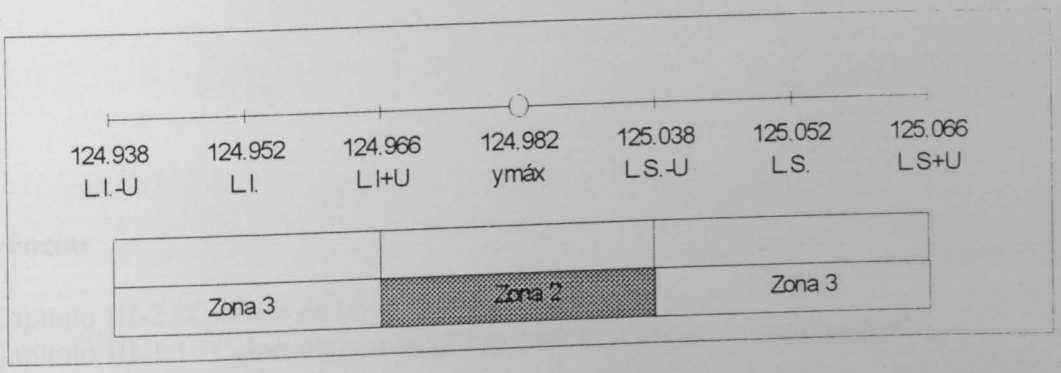
A incerteza expandida de medição apresentada corresponde à incerteza padrão de medição multiplicada pelo factor de expansão $k = 1{,}71$, calculado a partir da distribuição t com 24 graus de liberdade efectivos para se obter um nível de confiança de aproximadamente 90%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com o documento EAL-R2. A estabilidade de longo prazo do objecto não foi tomada em consideração.

ATENÇÃO: Tal como foi referido (na nota em 4.5) a expressão da incerteza do centri-meter só está completa se se incluir a incerteza referente às varetas de ampliação.

Critério de aceitação

Dever-se-á confrontar $\mathbf{y_{max} \pm U}$ com $\mathbf{y_{nom}}$ **±erro admissível**

Nos centri-meter de capacidade 0-125 mm, o erro admitido é de ±0,05 mm.
Ou seja, neste caso dever-se-á confrontar 124,982 ± 0,014 com 125,002 ± 0,05



Atenção: Como os valores são da ordem dos micron, resolveu-se não fazer a representação proporcionalmente. Por este motivo os valores estão igualmente espaçados.
Na realidade as zonas 3 são iguais já que correspondem à amplitude da incerteza expandida.

Conclusão:

❶ Análise da capacidade do processo de medição

Capacidade = (T-2xU)/T = (0,1-2x0,014)/0,1 = 0,72

❷ Análise da conformidade do resultado com a sua especificação

O resultado obtido na calibração encontra-se na zona 2. Por isso o paquímetro é dado como conforme.

Referências

[1] Capítulo III-2 "Calibres de tampão lisos"
[2] Capítulo III-1.1 "Como obter a incerteza padrão a partir de certificados"
[3] Anexo"Micrómetros"
[4] Capítulo III-1.3 c) "Como determinar k a partir de graus de liberdade efectivos"
[5] Capítulo II-4.2 e apêndice II-4 "Expressão da incerteza"
[6] Capítulo III-1.4 "Declaração de Conformidade ou Não-Conformidade"

Micrómetros

MICRÓMETROS

Por uma questão de simplicidade, neste procedimento irão ser agrupados os micrómetros de acordo com o padrão utilizado na sua calibração dimensional. Surgem assim os seguintes grupos:

	Micrómetros	Padrão
I	• Micrómetros exteriores de capacidade 0-100 mm (excepto em "V") • Micrómetros de coluna	Blocos padrão
II	• Micrómetros exteriores em "V"	Conjunto de cilindros
III	• Micrómetros exteriores 100-1000 mm (excepto em "V") • Fusos micrométricos • Micrómetros interiores de varetas • Micrómetros de profundidades • Unitestes	Banco de calibração e medida
IV	• Micrómetros interiores tipo 3 pontos	Argolas padrão

Nota: Os micrómetros exteriores podem ser de engrenagens, roscas, espessura de tubos e em "V".

1- Objectivo:

Testar os seguintes parâmetros metrológicos:

1) Exactidão da escala

I, II, IV- Determinar os valores resultantes da medição do respectivo padrão em pontos pré definidos do fuso micrométrico. No caso de IV apenas na capacidade mínima e máxima por falta de meios.

III- Determinar os valores resultantes da medição do afastamento das faces de medição do banco de calibração e medida, em pontos pré definidos do fuso micrométrico.

Exprimir a maior incerteza associada a estas leituras.
Submeter os resultados obtidos ao critério de aceitação.

Nota: No caso dos micrómetros interiores de vareta, observam-se ainda as capacidades mínimas dos conjuntos formados pelo micrómetro e cada uma das alongas.

2) Paralelismo das faces de medição
(micrómetros exteriores até 100 mm desde que tenham faces planas)

- Determinar o número de franjas obtidas pelo método de interferências utilizando um conjunto de ópticas padrão.
  Submeter os resultados obtidos ao critério de aceitação.

3) Planeza das faces de medição
(micrómetros exteriores e de profundidades desde que tenham faces planas e espelhadas)

Determinar o número de franjas obtidas pelo método de interferências utilizando um conjunto de ópticas padrão.
Submeter os resultados obtidos ao critério de aceitação.

2- Modelo matemático:

(**Utilizado apenas para testar a exactidão da escala** e aplicado a cada valor do fuso micrométrico)

$y = \ell\,(1+\alpha\theta)$ ou seja: $y = f(\ell,\alpha,\theta)$

ℓ : -comprimento do bloco padrão (em I)
-diâmetro do cilindro (em II)
-afastamento das faces de medição do banco de calibração e medida (em III)
-diâmetro da argola padrão (em IV)

α : coeficiente de expansão térmica do bloco(I)/ cilindro(II)/ faces de medição do banco de calibração e medida(III)/ argola padrão(IV).

θ : desvio da temperatura relativamente à temperatura de referência (20°C)

3- Considerações:

as mesmas previstas em [1]

4- Cálculo da incerteza:

⇒ Tal como mencionado na nota final do procedimento referente ao calibre de tampão liso, **não será incluida a componente u(α)**.

4.1- Coeficientes de sensibilidade:

$$c_\ell = \frac{\partial f}{\partial \ell} = 1$$

$$c_\theta = \frac{\partial f}{\partial \theta} = \ell\alpha = 11{,}5\text{x}10^{-6}\text{ x }\ell$$

Para o cálculo deste último coeficiente, **entrar-se-á apenas com o maior valor nominal testado.**

4.2- Componentes da incerteza:

a) Incerteza da medição $u(\ell)$

- Incerteza padrão do padrão utilizado $u(\ell_p)$
  (ver [2])

  I - A incerteza devida ao padrão será calculada para cada valor do fuso micrométrico testado.
  Se se recorrer à sobreposição de vários blocos padrão, somam-se as incertezas padrão dos blocos intervenientes na medição desse ponto do fuso.
  Após se ter calculado o valor dessa componente para todos os pontos, escolhe-se o maior que representará $u(\ell_p)$.

  Na prática e actualmente, a entidade calibradora dos blocos padrão garante que a incerteza dos mesmos é dada pela fórmula 0,02+0,3xL , em que L representa o comprimento do bloco padrão, expresso em metros. Assim sendo, a maior incerteza corresponde ao maior L testado mesmo que este tenha sido obtido por sobreposição de vários blocos.

  $u(\ell_p)$ vem então da expressão:

  $$u(l_p) = \sqrt{u^2_{bp}} \quad \text{e } u^2 bp = \sum_{i=1}^{n} (0{,}02 + 0{,}3 \cdot L_i)^2 \ \mu m$$

  em que n = nº blocos sobrepostos para obter L (maior valor nominal testado, em metros).
  i = bloco i sobreposto para obter L
  L_i = comprimento do padrão i (em metros).

  II e IV- De todos os cilindros (em II) ou argolas padrão (em IV) utilizados **entrar-se-á apenas com a incerteza da argola padrão que apresentar maior incerteza padrão**.

  III- Consultar o certificado de calibração do banco de calibração e medida.

- Incerteza padrão da estimativa de entrada $u(\bar{\ell})$

$$s(\bar{\ell}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{j=1}^{n} (\ell_j - \bar{\ell})}$$

Esta fórmula será aplicada a cada valor do fuso micrométrico testado.
Após se ter calculado todos os valores de $s(\bar{\ell})$ escolhe-se o maior, que representará $u(\bar{\ell})$.

- Incerteza devida à resolução do micrómetro **$u(\ell_R)$**
(ver [3])

Existe um intervalo de sinais de entrada que apesar de serem diferentes originam todos a mesma indicação.
Se a resolução é ∂x, o valor do estímulo que produz a indicação x encontra-se com igual probabilidade no intervalo $[x-\partial x/2 \ , \ x+\partial x/2]$ - distribuição rectangular.

Logo, $u^2(\ell_R) = (\partial x)^2/12$

- No caso dos micrómetros digitais ∂x é dado pela diferença de indicação que corresponde à alteração de uma unidade do algarismo menos significativo do dispositivo indicador.

- No caso dos micrómetros analógicos:
  - com nónio, ∂x é a própria resolução indicada no aparelho.
  - sem nónio, ∂x é 10% da resolução indicada no aparelho.

Assim:

$$u(\ell) = \sqrt{u^2(\ell_p) + u^2(\bar{\ell}) + u^2(\ell_R)}$$

NOTA:

Da conjugação do coeficiente c_θ e das incertezas $u(\ell_p)$ e $u(\bar{\ell})$, obtidas pelo processo indicado, resulta a situação mais desfavorável possível. Isto é, está-se a admitir, para cada maxila, que na medição do valor da escala em que ocorreu o maior desvio padrão experimental foi utilizado o padrão com maior incerteza - o que a acontecer seria uma grande coincidência.
Para evitar este tipo de situações penalizantes, poderia recorrer-se ao processo indicado na nota 1. Tal não será feito por uma questão de tempo e de simplicidade do procedimento.

b) Incerteza do desvio de temperatura $u(\theta)$

- Incerteza devida à variação cíclica da temperatura:

$$u(\Delta) = 1°C/\sqrt{2} = 0{,}707°C$$

- Incerteza padrão do termómetro utilizado $u(\bar{\theta})$ (ver [2])

Assim $u(\theta) = \sqrt{u^2(\Delta) + u^2(\bar{\theta})}$

4.3 - Incerteza padrão combinada: u (y)

$$u^2(y) = c^2_{\ell}\, u^2(\ell) + c^2_{\theta}\, u^2(\theta) = u_1{}^2(y) + u_2{}^2(y)$$

4.4 - Incerteza expandida de medição: U

A incerteza expandida será calculada de tal forma que assegure um intervalo com um nível de confiança de aproximadamente 90 %. A determinação de um factor de expansão k que produza esse intervalo é feita com base nos graus de liberdade efectivos.(ver [4])

$U = k \times u(y)$

4.5 - Expressão do resultado

Deverão ser apresentados todos os valores lidos no micrómetro, bem como o erro associado a cada um:

Valor nominal (mm)	Valor lido no micrómetro (média) (mm)	Erro (mm)

Uma vez que o número de pontos analisados é muito elevado opta-se por exprimir a incerteza encontrada da seguinte forma:

"

Valor lido no micrómetro ± **U**

onde *Valor lido no micrómetro* e U estão expressos em mm e *Valor lido no micrómetro* representa qualquer ponto do micrómetro".

É ainda necessário acrescentar-se o texto descrito em [5].

5 - Confronto com o critério de aceitação

(ver [6])

Nos micrómetros, o critério de aceitação entra em conta com a margem de desvio máxima, ou seja, com o módulo da maior diferença algébrica entre erros obtidos nos vários pontos do fuso micrométrico.
Para verificar de imediato se o micrómetro é considerado não-conforme, calcula-se o valor dessa diferença. Assim, caso todos os erros encontrados sejam positivos ou negativos basta considerar o maior erro em módulo, já que no primeiro valor

nominal testado se obtém sempre um erro igual a zero. Caso existam erros positivos e negativos, a diferença é dada pela soma do maior erro positivo com o maior erro negativo em módulo.
Se a diferença obtida for superior à máxima admissível, o micrómetro é rejeitado.
Se for menor ou igual, é ainda necessário confirmar se é aceite à luz da incerteza calculada.
Designando por $\mathbf{d_{max}}$ essa diferença obtida, e por $\mathbf{d_{adm}}$ a maior diferença admissível dada pela norma, dever-se-á confrontar o intervalo definido por $\mathbf{d_{max}}$ com $\mathbf{d_{adm}}$. tendo ainda em conta que d_{max} tem uma incerteza de $\pm\mathbf{2U}$(ver [7])

Note-se que os valores mais afastados (e que apresentam por isso os maiores erros) **não têm de ter necessariamente a maior incerteza** (U anteriormente definida).
A situação considerada corresponde por isso ao pior caso possível quer em termos de amplitude da incerteza (como já foi visto em 4.2 alínea a)), **quer em termos de posicionamento do intervalo da incerteza face ao intervalo da tolerância, já que se considera U associada aos pontos onde é determinada d_{max} .**

6 - Exemplo ilustrativo:

Aplicado a um micrómetro exterior analógico de capacidade 50-75 mm (micrómetro sem nónio)

Dados recolhidos:

temperatura ambiente: 21°C

medições (mm)

V.nominal	50	52.5	55.1	57.7	60.3	62.9	65	67.6	70.2	72.8	75
1°leitura	50,000	52.501	55.101	57.702	60.302	62.900	65.001	67.601	70.200	72.800	75.001
2°leitura	50,000	52.501	55.101	57.703	60.303	62.900	65.002	67.602	70.200	72.802	75.001
3°leitura	50,000	52.500	55.100	57.702	60.302	62.900	65.002	67.602	70.200	72.801	75.001
4°leitura	50,000	52.500	55.102	57.702	60.302	62.900	65.002	67.602	70.201	72.801	75.001
5°leitura	50,000	52.501	55.101	57.702	60.302	62.900	65.000	67.602	70.201	72.800	75.001
N°blocos	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

blocos padrão utilizados:

Incerteza expandida (μm)	0,04+0,6 x L
k	2
Graus efectivos de liberdade	∞

sendo L expresso em metros

incerteza expandida do termómetro : 1°C com k=2.

resolução do micrómetro : 1 μm

Dados calculados:

incerteza padrão dos blocos padrão (μm): 0,02+0,3 x L (L em m)

incerteza padrão do termómetro: 0,5°C

V.nomina (μm)	50000	52500	55100	57700	60300	62900	65000	67600	70200	72800	75000
Média (μm)	50000	52500,6	55101	57702,2	60302,2	62900	65001,4	67601,8	70200,4	72801	75001
D.Padrão (μm)	0	0,55	0,71	0,45	0,45	0	0,89	0,45	0,55	0,82	0,001
Erro(μm)	0	0,6	1	2,2	2,2	0	1,4	1,8	0,4	1	1

máximo desvio padrão: 0,89 μm
máxima diferença d_{max} : 2,2 μm
máximo valor nominal testado: 75000 μm
N° máximo de blocos sobrepostos: 2

resolução estimada do micrómetro : 0,1 μm

Tabela resumo:

Componentes $u(x_i)$	Fonte de incerteza	$c_i = \partial f / \partial x_i$	Incerteza padrão $u(x_i)$	$u_i(y)=\|c_i\|u(x_i)$ (μm)	Contribuição de cada $u_i(y)$ %	Graus de liberdade efectivos
$u(\ell)$	4.2.a)	1	0,406	0,406	23	4
$u(\ell_p)$			0,063		2	∞
$u(\overline{\ell})$			0,400		97	4
$u(\ell_r)$			0,029		1	∞
$u(\theta)$	4.2.b)	0,863	0,866	0,747	77	∞
$u(\Delta)$			0,707		67	∞
$u(\overline{\theta})$			0,500		33	∞

Incerteza padrão:

$$u^2(y) = c^2_{\ell}\, u^2(\ell) + c^2_{\theta}\, u^2(\theta) = u_1{}^2(y) + u_2{}^2(y) =$$
$$= (0{,}406)^2 + (0{,}747)^2 = 0{,}723\,\mu m$$

$$u(y) = \sqrt{0{,}723} = 0{,}85\ \mu m$$

Graus de liberdade efectivos:

No momento em que foi feita esta calibração não se dispunham de dados relativos aos graus de liberdade efectivos do termómetro.

$$\nu_{ef}(\ell) = \frac{u^4(\ell)}{\frac{u^4(\ell_p)}{\nu(\ell_p)} + \frac{u^4(\bar{\ell})}{\nu(\bar{\ell})} + \frac{u^4(\ell_r)}{\nu(\ell_r)}} = \frac{(0{,}406)^4}{\frac{(0{,}063)^4}{\infty} + \frac{(0{,}4)^4}{4} + \frac{(0{,}029)^4}{\infty}} = 4{,}24$$

$$\nu_{ef}(y) = \frac{u^4(y)}{\frac{u^4(\ell)}{\nu(\ell)} + \frac{u^4(\theta)}{\nu(\theta)}} = \frac{(0{,}85)^4}{\frac{(0{,}406)^4}{4{,}24} + \frac{(0{,}747)^4}{\infty}} = 81{,}6$$

$$\Rightarrow \nu_{ef} = 81$$

Pela tabela dada em [4] : $t_{90}(81) = 1{,}66$

Logo,

$$U_{90}(81) = t_{90}(81)\, u(y) = 1{,}66 \times 0{,}85\ \mu m = 1{,}41\mu m$$
$$\Rightarrow 1{,}4\ \mu m$$

Resultado:

Valor nominal (mm)	Valor lido no micrómetro (média) (mm)	Erro (mm)
50	50,000	0
52,5	52,5006	0,0006
55,1	55,101	0,001
57,7	57,7022	0,0022
60,3	60,3022	0,0022
62,9	62,900	0
65	65,0014	0,0014
67,6	67,6018	0,0018
70,2	70,2004	0,0004
72,8	72,801	0,001
75	75,001	0,001

Valor lido no micrómetro± 0,0014

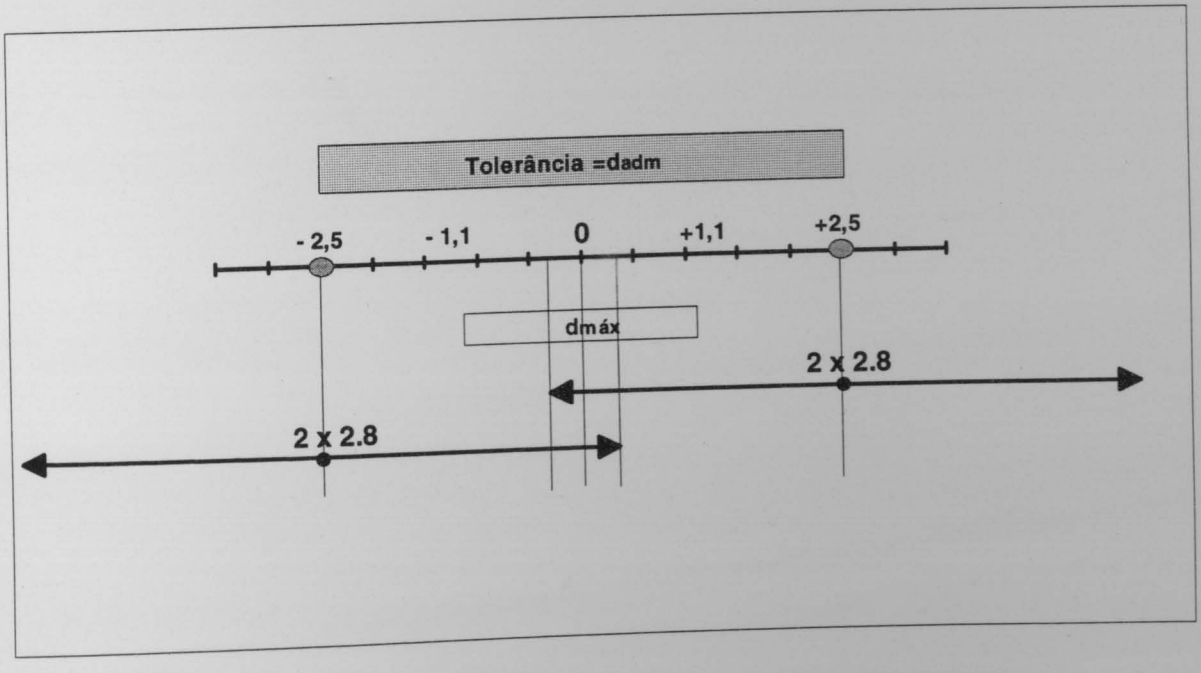
onde *Valor lido no micrómetro* e U estão expressos em mm e *Valor lido no micrómetro* representa qualquer ponto do micrómetro"

A incerteza expandida de medição apresentada corresponde à incerteza padrão de medição multiplicada pelo factor de expansão $k = 1{,}66$, calculado a partir da distribuição *t* com 81 graus de liberdade efectivos para se obter um nível de confiança de aproximadamente 90%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com o documento EAL-R2. A estabilidade de longo prazo do objecto não foi tomada em consideração.

Critério de aceitação

Dever-se-á confrontar o intervalo definido por $\mathbf{d_{max}}$ com $\mathbf{d_{adm}}$. tendo ainda em conta que d_{max} tem uma incerteza de ±**2U**.

Nos micrómetros exteriores de capacidade 50-75 mm, a maior diferença admissível é de 5 µm
Como d_{max} = 2,2 µm, e se consideram os intervalos centrados em zero, dever-se-á confrontar o intervalo [-1.1 ,+ 1,1] µm (com uma incerteza de ±2,8 µm) com o intervalo [-2.5, +2.5] µm.



Conclusão:

❶ Análise da capacidade do processo de medição

Capacidade = (T-2xU')/T = (5-2x2,8)/5 = -0,12

Como já se previa pela figura acima, apesar de d_{max} ser inferior a d_{adm} a incerteza é muito elevada traduzindo-se numa capacidade do processo negativa. O resultado não oferece por isso credibilidade suficiente, pelo que o micrómetro não pode ser dado como conforme nas actuais circunstâncias. Isto não quer dizer que deva ser rejeitado, mas antes que se devem proceder às alterações propostas no capítulo II-2.6.2.

NOTA 1 - Tal como referido 4.2.a) poder-se-ia considerar os procedimentos :

1ª situação:
- Obter o maior $s(\overline{\ell})$, que representa $u(\overline{\ell})$
- Consultar o certificado de calibração do padrão utilizado na medição do valor do fuso micrométrico correspondente a esse maior $s(\overline{\ell})$. Obtém-se assim $u(\ell_p)$.
- No cálculo do coeficiente c_θ , entrar com o valor de ℓ correspondente a esse padrão.

2ª situação:
- Consultar o certificado de calibração dos padrões utilizados. Considerar a maior incerteza padrão que representará $u(\ell_{bp})$.
- Obter o $s(\overline{\ell})$ correspondente à medição do valor do fuso micrométrico onde se utilizou o padrão atrás mencionado. Tem-se assim $u(\overline{\ell})$.
- No cálculo do coeficiente c_θ , entrar com o valor de ℓ correspondente a esse padrão.

Destas duas situações teria de se escolher a que tivesse maior valor. Este seria necessariamente inferior ao obtido pelo processo utilizado na prática.

Referências

[1] Capítulo III-2 "Calibres de tampão lisos"
[2] Capítulo III-1.1 "Como obter a incerteza padrão a partir de certificados"
[3] Capítulo III-1.1 "Resolução do instrumento a calibrar"
[4] Capítulo III-1.3 c) "Como determinar k a partir de graus de liberdade efectivos"
[5] Capítulo II-4.2 e apêndice II-4 "Expressão da incerteza"
[6] Capítulo III-1.4 "Declaração de Conformidade ou Não-Conformidade"
[7] Apêndice III-5 "Critério de aceitação de instrumentos com escala"

Comparadores

COMPARADORES

1- Objectivo:

Testar os cursos dos comparadores e dos comparadores de alavanca (apalpadores). Para isso é necessário determinar os desvios ocorridos nos vários pontos testados relativamente aos valores dados pelo padrão-calibrador de comparadores. No caso dos comparadores estas leituras fazem-se nos sentidos crescente e decrescente. No caso dos comparadores de alavanca para além das leituras serem feitas nos sentidos crescente e decrescente, para cada um desses sentidos há ainda que considerar duas direcções consoante a posição da alavanca.
Exprimir a maior incerteza associada a estas leituras.
Submeter os resultados obtidos ao critério de aceitação.

2- Modelo matemático:

(aplicado a cada ponto testado)

$$y = \ell\,(1+\alpha\theta) \qquad \text{ou seja: } y = f(\ell,\alpha,\theta)$$

ℓ : percurso da haste do calibrador de comparadores até tocar no comparador
α : coeficiente de expansão térmica da haste do calibrador de comparadores.
θ : desvio da temperatura relativamente à temperatura de referência (20°C)

3- Considerações:

as mesmas previstas em [1]

4- Cálculo da incerteza:

⇒ Tal como mencionado na nota final do procedimento referente ao calibre de tampão liso, **não será incluida a componente u(α)**.

4.1- Coeficientes de sensibilidade:

$$c_\ell = \frac{\partial f}{\partial \ell} = 1$$

$$c_\theta = \frac{\partial f}{\partial \theta} = \ell\alpha = 11{,}5\text{x}10^{-6} \cdot \ell$$

Para o cálculo deste último coeficiente, **entrar-se-á apenas com o maior "percurso" realizado.**

4.2- Componentes da incerteza:

a) Incerteza da medição $u(\ell)$

- Incerteza padrão do padrão utilizado $u(\ell_p)$
  (ver [2])

  Consultar o certificado de calibração do calibrador de comparadores.

- Incerteza padrão da estimativa de entrada $u(\bar{\ell})$

$$s(\bar{\ell}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{j=1}^{n} (\ell_j - \bar{\ell})}$$

  Esta fórmula será aplicada a cada ponto testado do curso, para cada sentido e no caso dos comparadores de alavanca também para cada direcção.
  Após se ter calculado todos os valores de $s(\bar{\ell})$ seja qual for o sentido e a direcção, escolhe-se o maior, que representará $u(\bar{\ell})$.

- Incerteza devida à resolução do comparador $u(\ell_R)$
  (ver [3])

  Existe um intervalo de sinais de entrada que apesar de serem diferentes originam todos a mesma indicação.
  Se a resolução é ∂x, o valor do estímulo que produz a indicação x encontra-se com igual probabilidade no intervalo $[x-\partial x/2 \ , \ x+\partial x/2]$ - distribuição rectangular.

  Logo, $u^2(\ell_R) = (\partial x)^2/12$

  Nestes instrumentos -com mostrador tipo relógio- relaciona-se a espessura do ponteiro com o espaço físico entre duas indicações .Obtém-se assim uma resolução estimada e calcula-se ∂x através da expressão:
  [Espessura do ponteiro / Espaço físico entre duas indicações (medição directa sobre o mostrador)] x Resolução real do medidor.

- Incerteza devida à histerese $u(\ell_H)$

  Os comparadores sofrem de um fenómeno chamado histerese. Por este motivo as indicações dadas pelo instrumento, relativamente a um mesmo valor da

grandeza a ser medida, diferem de um valor fixo consoante as sucessivas leituras foram efectuadas no sentido incremental ou decremental da escala.
Sabe-se que para um determinado valor da escala testado se podem obter valores que se distribuem (devido à histerese) com igual probabilidade no intervalo
[x-∂x/2 , x+∂x/2] , sendo ∂x a maior diferença de valores encontrados nas sucessivas leituras quando efectuadas num sentido ou no sentido oposto.
Pode-se então assumir que esses valores são descritos por uma distribuição rectangular.
Logo, $u^2 = (\partial x)^2/12$

Assim:

$$u(\ell) = \sqrt{u^2(\ell_p) + u^2(\bar{\ell}) + u^2(\ell_R) + u^2(\ell_H)}$$

b) <u>Incerteza do desvio de temperatura</u> u(θ)

- <u>Incerteza devida à variação cíclica da temperatura</u>:

$$\mathbf{u(\Delta)} = 1°C/\sqrt{2} = 0{,}707°C$$

- <u>Incerteza padrão do termómetro utilizado</u> $u(\bar{\theta})$
(ver [2])

Assim $u(\theta) = \sqrt{u^2(\Delta) + u^2(\bar{\theta})}$

4.3 - Incerteza padrão combinada: u (y)

$$\mathbf{u^2(y)} = c^2_{\ell}\, u^2(\ell) + c^2\theta\, u^2(\theta) = u_1{}^2(y) + u_2{}^2(y)$$

4.4 - Incerteza expandida de medição: U

A incerteza expandida será calculada de tal forma que assegure um intervalo com um nível de confiança de aproximadamente 90 %. A determinação de um factor de expansão k que produza esse intervalo é feita com base nos graus de liberdade efectivos.(ver [4])

$$U = k \cdot u(y)$$

4.5 - Expressão do resultado

Deverão ser apresentados para cada sentido (e direcção no caso dos comparadores de alavanca) todos os desvios (erros) apresentados pelo comparador.

FE BIBLIOTECA PORTO

Valor nominal (mm)	Erro (mm)

Uma vez que o número de pontos analisados é muito elevado opta-se por exprimir a incerteza encontrada da seguinte forma:
"

Valor lido no comparador ± **U**

onde *Valor lido no comparador* e U estão expressos em mm e *Valor lido no comparador* representa qualquer ponto do comparador".

É ainda necessário acrescentar-se o texto descrito em [5].

5 - Confronto com o critério de aceitação

(ver [6])

Nos comparadores, o critério de aceitação entra em conta com margens de desvio máximas:

$\mathbf{f_e}$: amplitude do erro
$\mathbf{f_t}$: amplitude local do erro
$\mathbf{f_{ges}}$: amplitude total do erro
$\mathbf{f_u}$:erro de histerese
$\mathbf{f_w}$:erro de repetibilidade (apenas para os comparadores de alavanca)

Para verificar de imediato se o comparador é considerado não-conforme, calcula-se os valores desses parâmetros.
Se os valores obtidos forem superiores aos máximos admissíveis, o comparador é rejeitado.
Se forem menores ou iguais, é ainda necessário confirmar se este é aceite à luz da incerteza calculada.
Representando por $\mathbf{d_{max}}$ cada um desses valores, e por $\mathbf{d_{adm}}$ o maior valor admissível dada pela norma para cada um deles, dever-se-á confrontar os intervalos definidos pelos vários $\mathbf{d_{max}}$ com os correspondentes $\mathbf{d_{adm}}$. tendo ainda em conta que d_{max} tem uma incerteza de $\pm\mathbf{2U}$(ver [7])

Note-se que os valores mais afastados (e que apresentam por isso os maiores erros) **não têm de ter necessariamente a maior incerteza** (U anteriormente definida).
A situação considerada corresponde por isso ao pior caso possível quer em termos de amplitude da incerteza, quer em termos de posicionamento do intervalo da incerteza face ao intervalo da tolerância, já que se considera U associada aos pontos onde é determinado d_{max} .

6 - Exemplo ilustrativo:

Aplicado a um comparador de capacidade 10 mm

Dados recolhidos:

temperatura ambiente: 21°C

medições (μm)

SENTIDO CRESCENTE					
V.nominal (mm)	1° leitura	2° leitura	3°leitura	4°leitura	5°leitura
0	0	0	0	0	0
0.5	-4	-3.5	-5	-5	-4.5
1	1.5	2	1	1.5	1
1.5	-2	-3.5	-3	-4.5	-3.5
2	2.5	2.5	2	2.5	2
2.5	-3.5	-3	-3	-3	-3
3	2	2	2	2	1.5
3.5	-3	-3.5	-3.5	-3.5	-3
4	1	2	1.5	1.5	1.5
4.5	-6	-5	-5.5	-5.5	-5.5
5	-1	-1	-1	-0.5	-1
5.5	-6	-6.5	-6	-8	-8
6	-2	-3	-3	-3	-3
6.5	-7	-6	-8	-6	-7
7	-4.5	-4.5	-3.5	-3.5	-4.5
7.5	-8	-7	-9	-8	-8
8	-4	-5	-3	-3	-2
8.5	-8	-7	-7.5	-7	-8
9	-2	-4	-2	-3	-3.5
9.5	-4.5	-4.5	-6	-6	-6
10	-1.5	-1.5	-2	-1.5	-2.5

SENTIDO DECRESCENTE					
V.nominal (mm)	1° leitura	2° leitura	3°leitura	4°leitura	5°leitura
0	0	-1	0.5	0	1.5
0.5	-4	-4	-3.5	-3	-3
1	2	1	3	1.5	1
1.5	-2	-2	-2	-1	-1
2	2.5	2	4	4	3
2.5	-1.5	-1	-2	-2	-2.5
3	2.5	3	4	2.5	1.5
3.5	-2.5	-3	-3	-3.5	-3
4	2	2	1.5	2	1
4.5	-6	-6.5	-5	-4.5	-5.5
5	-1	-1	-1	-1	-1
5.5	-6	-7.5	-7	-6	-5
6	-2.5	-1.5	-2.5	-3	-2.5

6.5	-7	-6	-7	-6	-7
7	-4	-3.5	-4	-1.5	-3
7.5	-8	-7.5	-8	-6.5	-9
8	-3.5	-3.5	-4	-4	-4.5
8.5	-6	-7	-8	-7	-7
9	-1	-3	-3	-3	-2
9.5	-6	-6	-7	-5.5	-6
10	-1	-1	-1.5	-1	-2

incerteza expandida do calibrador de comparadores : 2,6 µm com k=2.
incerteza expandida do termómetro : 1ºC com k=2.

resolução do comparador : 10 µm
espessura do ponteiro(aprox.):0,2 mm
espaço físico entre duas indicações:1,6 mm

Dados calculados:

incerteza padrão do calibrador de comparadores : 1,3 µm.
incerteza padrão do termómetro: 0,5ºC

V.nominal (mm)	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10
Sentido Crescente																					
Média (µm)	0	-4.4	1.4	-3.3	2.3	-3.1	1.9	-3.3	1.5	-5.5	-0.9	-6.9	-2.8	-6.8	-4.1	-8	-3.4	-7.5	-2.9	-5.4	-1.8
D.Padrão (µm)	0	0.65	0.42	0.91	0.27	0.22	0.22	0.27	0.35	0.35	0.22	1.02	0.45	0.84	0.55	0.71	1.14	0.5	0.89	0.82	0.45
Sentido Decrescente																					
Média (µm)	0.2	-3.5	1.7	-1.6	3.1	-1.8	2.7	-3	1.7	-5.5	-1	-6.3	-2.4	-6.6	-3.2	-7.8	-3.9	-7	-2.4	-6.1	-1.3
D.Padrão (µm)	0.90	0.5	0.84	0.55	0.89	0.57	0.91	0.35	0.45	0.79	0	0.97	0.55	0.55	1.04	0.91	0.42	0.71	0.89	0.55	0.45

máximo desvio padrão: 1,14 µm

f_e : 10,9 µm
f_t : 7,2 µm
f_{ges} : 11,1 µm
f_u : 1,7 µm

máximo valor nominal testado: 10000 µm

resolução estimada do comparador : 0,2/1,6x10 =1,25 µm

Tabela resumo:

Componentes $u(x_i)$	Fonte de incerteza	$c_i = \partial f / \partial x_i$	Incerteza padrão $u(x_i)$	$u_i(y) = \lvert c_i \rvert u(x_i)$ (μm)	Contribuição de cada $u_i(y)$ %	Graus de liberdade efectivos
u(l)	4.2.a)	1	1,523	1,523	99,6	172
$u(\ell_p)$			1,3		73	∞
$u(\ell)$			0,510		11,2	4
$u(\ell_r)$			0,361		5,6	∞
$u(\ell_h)$			0,491		10,4	4
u(θ)	4.2.b)	0,115	0,866	0,100	0,4	∞
u(Δ)			0,707		67	∞
$u(\bar{\theta})$			0,500		33	∞

Incerteza padrão:

$$u^2(y) = c^2_{\ell}\, u^2(\ell) + c^2_{\theta}\, u^2(\theta) = u_1{}^2(y) + u_2{}^2(y) =$$
$$= (1{,}523)^2 + (0{,}1)^2 = 2{,}331\,\mu m$$
$$u(y) = \sqrt{2{,}331} = 1{,}53\ \mu m$$

Graus de liberdade efectivos:

No momento em que foi feita esta calibração não se dispunham de dados relativos aos graus de liberdade efectivos do termómetro. No entanto, mesmo que existissem, não se entraria com eles visto a sua contribuição ser muito pequena.

$$\nu_{ef}(\ell) = \frac{u^4(\ell)}{\dfrac{u^4(\ell_p)}{\nu(\ell_p)} + \dfrac{u^4(\bar{\ell})}{\nu(\bar{\ell})} + \dfrac{u^4(\ell_r)}{\nu(\ell_r)} + \dfrac{u^4(\ell_h)}{\nu(\ell_h)}} = \frac{(1{,}523)^4}{\dfrac{(1{,}3)^4}{\infty} + \dfrac{(0{,}51)^4}{4} + \dfrac{(0{,}361)^4}{\infty} + \dfrac{(0{,}491)^4}{4}}$$
$$= 171{,}6$$

$$\nu_{ef}(y) = \frac{u^4(y)}{\dfrac{u^4(\ell)}{\nu(\ell)} + \dfrac{u^4(\theta)}{\nu(\theta)}} = \frac{(1{,}53)^4}{\dfrac{(1{,}523)^4}{171{,}6} + \dfrac{(0{,}1)^4}{\infty}} = 173{,}04 \Rightarrow \nu_{ef} = 173$$

Pela tabela dada em [4] : $t_{90}(173) = 1{,}645$

Logo,

$$U_{90}(173) = t_{90}(173)\, u(y) = 1{,}645 \times 1{,}53\ \mu m = 2{,}52\mu m$$
$$\Rightarrow 2{,}6\ \mu m$$

Resultado:

Valor lido no comparador ± 0,0026

onde *Valor lido no comparador* e U estão expressos em mm e *Valor lido no comparador* representa qualquer ponto do comparador"

A incerteza expandida de medição apresentada corresponde à incerteza padrão de medição multiplicada pelo factor de expansão k = 1,645 , calculado a partir da distribuição t com 173 graus de liberdade efectivos para se obter um nível de confiança de aproximadamente 90%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com o documento EAL-R2. A estabilidade de longo prazo do objecto não foi tomada em consideração.

Critério de aceitação

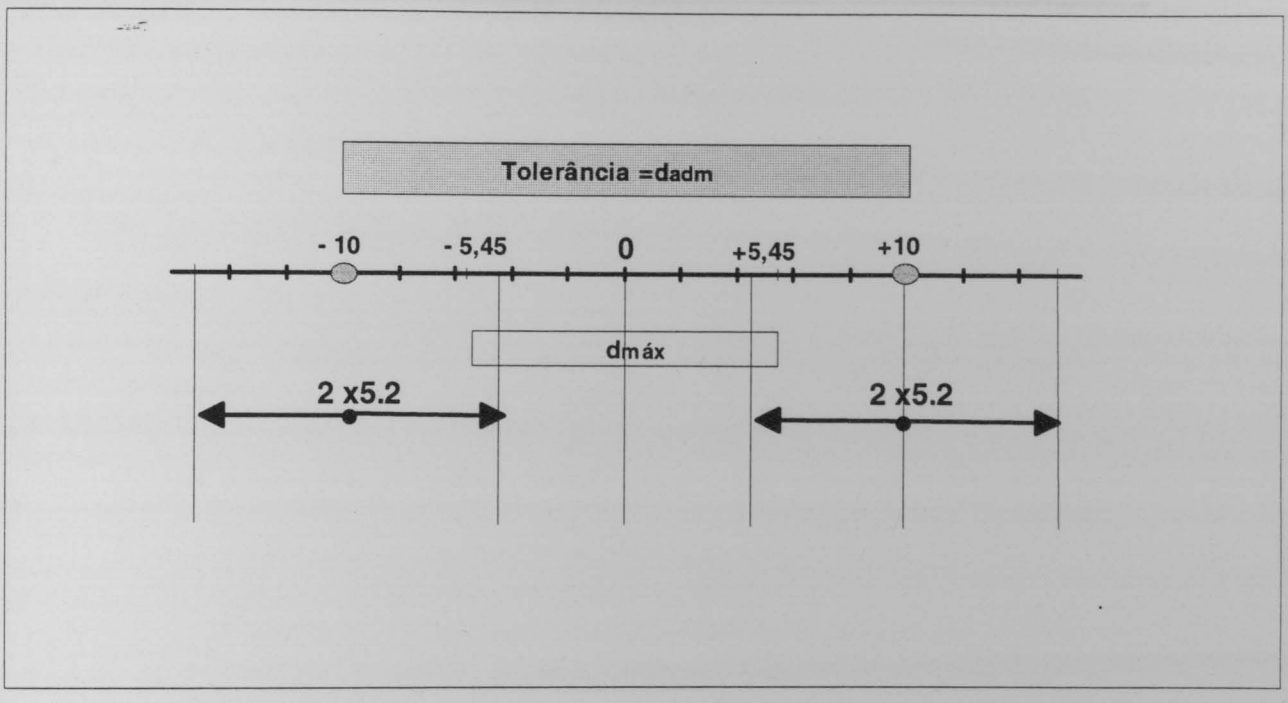
Dever-se-á confrontar os intervalos definidos pelos vários $\mathbf{d_{max}}$ ($\mathbf{f_e}$, $\mathbf{f_t}$, $\mathbf{f_{ges}}$, $\mathbf{f_u}$) com os correspondentes $\mathbf{d_{adm}}$ tendo ainda em conta que d_{max} tem uma incerteza de ±**2U**.
(ver [7])

Nos comparadores de capacidade 10 mm, as margens de desvio máximas são:
$\mathbf{f_e}$:20 µm
$\mathbf{f_t}$:10 µm
$\mathbf{f_{ges}}$:30 µm
$\mathbf{f_u}$:8 µm

Considerando os intervalos centrados em zero, dever-se-á confrontar :

[-5.45 ,+5.45] µm (com uma incerteza de ±5,2 µm)
com o intervalo[-10, +10] µm.
[-3.6 ,+3.6] µm (com uma incerteza de ±5,2 µm)
com o intervalo [-5, +5] µm.
[-5.55 ,+5.55] µm (com uma incerteza de ±5,2 µm)
com o intervalo [-15, +15] µm.
[-0.85 ,+0.85] µm (com uma incerteza de ±5,2 µm)
com o intervalo [-4, +4] µm.

Apenas se exemplificará para o 1° intervalo, sendo análoga a análise para os restantes.



Conclusão:

❶ Análise da capacidade do processo de medição

Capacidade = (T-2xU')/T = (20-2x5.2)/20 = 0,48

❷ Análise da conformidade do resultado com a sua especificação

O resultado obtido na calibração encontra-se na zona amarela de [7]. Por isso é necessário analisar o risco de aceitar o instrumento. O risco é inferior ao risco máximo admissível (50%), já que $- d_{max}/2$ se encontra à direita de L.I.

❸ Cálculo do valor do risco

$z' = (d_{adm} - d_{max})/2u(y) = (0,0109-0,02)/0,0052 = -1.75$

Pela tabela de [8] , $P(Z \geq z') = 0,0401$

Como os limites do intervalo definido por d_{max} se situam próximos da "cauda" da distribuição, o verdadeiro risco é de facto maior (ver nota do capítulo secção 1.4).

Logo, assume-se que o risco de aceitar o instrumento seja cerca de 6%

Referências

[1] Capítulo III-2 "Calibres de tampão lisos"
[2] Capítulo III-1.1 "Como obter a incerteza padrão a partir de certificados"
[3] Capítulo III-1.1 "Resolução do instrumento a calibrar"
[4] Capítulo III-1.3 c) "Como determinar k a partir de graus de liberdade efectivos"
[5] Capítulo II-4.2 e apêndice II-4 "Expressão da incerteza"
[6] Capítulo III-1.4 "Declaração de Conformidade ou Não-Conformidade"
[7] Apêndice III-5 "Critério de aceitação de instrumentos com escala"
[8] Apêndice III-4 "Tabela de probabilidades "

ANEXO B

Procedimentos práticos para o cálculo da incerteza nas calibrações.

Instrumentos diversos:

1) Calibres de tampão liso
(Este procedimento é aplicável ao lado passa e não passa do calibre)
2) Cavilhas para medir roscas exteriores
(Este procedimento é aplicável a cada uma das três cavilhas do conjunto)
3) Calibres de roscado exterior
(Este procedimento é aplicável apenas ao **diâmetro exterior** do calibre)
4) Calibres de roscado interior (consultar [4])
(Aplicável ao **diâmetro interior** do calibre)
5) Padrões "ajuste de zero" de micrómetros exteriores em "V"
6) Padrões de calibração para micrómetros exteriores em "V"
7) Películas de calibração
8) Apalpa-folgas
9) Acessórios para blocos padrão rectangulares
(ref 50-1, 50-2, 50-3, 50-4, 50-5 e 50-6)
10) Varetas padrão para ajuste de micrómetros exteriores de rosca
11) Varetas padrão "P.M."
12) Padrões de topo
13) Argolas padrão
14) Calibres de roscado interior

Calibres de tampão roscado e Calibres padrão de tampão roscado

Réguas, Escalas e Fitas métricas

Medidores de Interiores e de Espessuras

Paquímetros

Micrómetros

Comparadores e Comparadores de alavanca

Procedimento prático para o cálculo da incerteza expandida na calibração de

1) **Calibres de tampão liso** (consultar [1])
(Este procedimento é aplicável ao lado passa e não passa do calibre)

2) **Cavilhas para medir roscas exteriores** (consultar [2])
(Este procedimento é aplicável a cada uma das três cavilhas do conjunto)

3) **Calibres de roscado exterior** (consultar [3])
(Este procedimento é aplicável apenas ao **diâmetro exterior** do calibre)

4) **Calibres de roscado interior** (consultar [4])
(Aplicável ao **diâmetro interior** do calibre)

5) **Padrões "ajuste de zero" de micrómetros exteriores em "V"**

6) **Padrões de calibração para micrómetros exteriores em "V"**

7) **Películas de calibração**

8) **Apalpa-folgas**

9) **Acessórios para blocos padrão rectangulares (ref 50-1, 50-2, 50-3, 50-4, 50-5 e 50-6)**

10) **Varetas padrão para ajuste de micrómetros exteriores de rosca**

11) **Varetas padrão "P.M."**

12) **Padrões de topo**

13) **Argolas padrão**

14) **Calibres de roscado interior** (consultar [4])
(Aplicável ao **diâmetro de flancos** do calibre **se obtido pelo processo B**)

- Registar a temperatura ambiente (em °C)

- Medir o diâmetro/espessura nos 5 pontos pré-determinados.

Calcular a média desses valores $\bar{\ell} = \dfrac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5}{5}$

- Calcular a variância experimental da média dessas observações

$$s^2(\bar{\ell}) = \frac{(x_1 - \bar{\ell})^2 + (x_2 - \bar{\ell})^2 + (x_3 - \bar{\ell})^2 + (x_4 - \bar{\ell})^2 + (x_5 - \bar{\ell})^2}{20}$$

- Consultar o certificado de calibração do micrómetro (casos de 1 a 9) ou do banco de calibração e medida (casos de 10 a 14) e calcular a incerteza padrão associada ***a*** a partir da incerteza expandida dada (ver [5]) bem como os graus de liberdade efectivos ***a'*** .

- Consultar o certificado de calibração do termómetro e calcular a incerteza padrão associada ***c*** a partir da incerteza expandida dada.(ver [5]) .

Nota: **Quando nada for dito nos certificados acerca dos graus de liberdade efectivos consideram-se** ∞. Recorde-se que o resultado de um quociente cujo denominador seja ∞, é zero.

- Incerteza padrão

Substituir as variáveis atrás determinadas na expressão:
(Atenção: **a unidade de comprimento utilizada deverá ser o μm**)

$$u(y) = \sqrt{a^2 + s^2(\bar{\ell}) + (\bar{\ell} \times 11{,}5 \times 10^{-6})^2 \times (c^2 + 0{,}707^2)}$$

- Incerteza expandida

1° Determinar

$$d = \frac{(a^2 + s^2(\bar{\ell}))^2}{\frac{(s^2(\bar{\ell}))^2}{4} + \frac{a^4}{a'}}$$

2° Determinar

$$G.lib.efect. = \frac{u^4(y)}{\frac{(a^2 + s^2(\bar{\ell}))^2}{d}}$$

3° Consultar a tabela dada em [6] e ver o *k* correspondente a *G.lib.efect.*

4° Determinar $U = k \cdot u(y)$

- Apresentar o resultado sob a forma: ver [7]

  $y = \bar{\ell} \pm U$ em que $\bar{\ell}$ e U estão expressos em mm.

  e acrescentar o seguinte texto (substituindo o valor das variáveis em itálico):

  A incerteza expandida de medição apresentada corresponde à incerteza padrão de medição multiplicada pelo factor de expansão **k=** *k*, calculado a partir da distribuição t com *G.lib.efect.* graus de liberdade efectivos para se obter um nível de confiança de aproximadamente 90% . A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com o documento EAL-R2. A estabilidade de longo prazo do objecto não foi tomada em consideração.

Referências

[1] Capítulo III-2 "Calibres de tampão lisos"
[2] Anexo "Cavilhas-Piges"
[3] Anexo "Calibres de roscado exterior"
[4] Anexo "Calibres de roscado interior"
[5] Capítulo III-1.1 "Como obter a incerteza padrão a partir de certificados"
[6] Capítulo III-1.3 c) "Como determinar k a partir de graus de liberdade efectivos"
[7] Capítulo II-4.2 e apêndice II-4 "Expressão da incerteza".

Procedimento prático para o cálculo da incerteza expandida na calibração de

Calibres de tampão roscado e Calibres padrão de tampão roscado
(consultar [1])

(Este procedimento é aplicável apenas ao diâmetro de flancos dos calibres)

- Registar a temperatura ambiente (em °C)

- Medir o diâmetro nos 5 pontos pré-determinados, utilizando as cavilhas.

  Calcular a média desses valores $\bar{\ell} = \dfrac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5}{5}$

- Calcular a variância experimental da média dessas observações

$$s^2(\bar{\ell}) = \frac{(x_1 - \bar{\ell})^2 + (x_2 - \bar{\ell})^2 + (x_3 - \bar{\ell})^2 + (x_4 - \bar{\ell})^2 + (x_5 - \bar{\ell})^2}{20}$$

- Consultar o certificado de calibração do micrómetro e calcular a incerteza padrãoassociada a (ver [2]) bem como os graus de liberdade efectivos a'.

- Consultar o certificado de calibração das cavilhas e calcular a incerteza padrão b associada à cavilha com maior incerteza expandida.(ver [2])
  Consultar os graus de liberdade efectivos b' dessa cavilha.

- Consultar o certificado de calibração do termómetro e calcular a incerteza padrão associada c (ver [2]).

  Nota: Quando nada for dito nos certificados acerca dos graus de liberdade efectivos consideram-se ∞ . Recorde-se que o resultado de um quociente cujo denominador seja ∞, é zero.

- Incerteza padrão

  Substituir as variáveis atrás determinadas na expressão:
  (Atenção: a unidade de comprimento utilizada deverá ser o μm)

$$u(y) = \sqrt{a^2 + ,2xb^2 + s^2(\bar{\ell}) + (\bar{\ell}\ x11{,}5x10^{-6})^2\ x\ (c^2 + 0{,}707^2)}$$

- Incerteza expandida

1° Determinar

$$d = \frac{(a^2 + 2xb^2 + s^2(\bar{\ell}))^2}{\frac{a^4}{a'} + \frac{4\ xb^4}{b'} + \frac{(s^2(\bar{\ell}))^2}{4}}$$

2° Determinar

$$G.lib.efect. = \frac{u^4(y)}{\frac{(a^2 + 2xb^2 + s^2(\bar{\ell}))^2}{d}}$$

3° Consultar a tabela dada em [3] e ver o *k* correspondente a *G.lib.efect.*

4° Determinar $U = k \cdot u(y)$

- Apresentar o resultado sob a forma: ver[4]

$y = \bar{\ell} \pm U$, em que $\bar{\ell}$ e U estão expressos em μm

e acrescentar o seguinte texto (substituindo o valor das variáveis em itálico):

A incerteza expandida de medição apresentada corresponde à incerteza padrão de medição multiplicada pelo factor de expansão **k=** *k* , calculado a partir da distribuição t com *G.lib.efect.* graus de liberdade efectivos para se obter um nível de confiança de aproximadamente 90% . A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com o documento EAL-R2. A estabilidade de longo prazo do objecto não foi tomada em consideração.

Referências

[1] Anexo "Calibres de roscado exterior"
[2] Capítulo III-1.1 "Como obter a incerteza padrão a partir de certificados"
[3] Capítulo III-1.3 c) "Como determinar k a partir de graus de liberdade efectivos"
[4] Capítulo II-4.2 e apêndice II-4 "Expressão da incerteza"

Procedimento prático para o cálculo da incerteza expandida na calibração de

Réguas, Escalas e Fitas Métricas

(consultar [1])

- Registar a temperatura ambiente (em °C)

- Fazer 5 leituras do afastamento das faces de medição do banco de calibração e medida nos pontos pré-definidos da escala .

  Calcular para cada um desses pontos, a média das 5 leituras $\bar{\ell} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5}{5}$

- Calcular a variância experimental da média das observações, em cada ponto da escala através da fórmula:

$$s^2(\bar{\ell}) = \frac{(x_1 - \bar{\ell})^2 + (x_2 - \bar{\ell})^2 + (x_3 - \bar{\ell})^2 + (x_4 - \bar{\ell})^2 + (x_5 - \bar{\ell})^2}{20}$$

  considerar apenas **o maior valor** encontrado de $s^2(\bar{\ell})$

- Consultar o certificado de calibração do banco de calibração e medida e calcular a incerteza padrão associada a a partir da incerteza expandida dada (ver [2]) bem como os graus de liberdade efectivos a' .

  Nota: **Quando nada for dito nos certificados acerca dos graus de liberdade efectivos consideram-se** ∞ . Recorde-se que o resultado de um quociente cujo denominador seja ∞, é zero.

- Consultar o certificado de calibração do termómetro e calcular a incerteza padrão associada c a partir da incerteza expandida dada.(ver [2]) .

- Fazer:

  e = 833,33

  Nota: Este valor só é válido enquanto se assumir que em média a espessura dos traços da escala é de cerca de 100 µm.

- Incerteza padrão

Substituir as variáveis atrás determinadas na expressão:
(Atenção: **a unidade de comprimento utilizada deverá ser o μm**)

$$u(y) = \sqrt{(a^2 + s^2(\bar{\ell}) + e) + (Lx11{,}5x10^{-6})^2 x(c^2 + 0{,}707^2)}$$

- Incerteza expandida

1° Determinar

$$d = \frac{(a^2 + s^2(\bar{\ell}) + e)^2}{\frac{a^4}{a'} + \frac{(s^2(\bar{\ell}))^2}{4}}$$

2° Determinar

$$G.lib.efect. = \frac{u^4(y)}{\frac{(a^2 + s^2(\bar{\ell}) + e)^2}{d}}$$

3° Consultar a tabela dada em [3] e ver o *k* correspondente a *G.lib.efect.*

4° Determinar $U = k \cdot u(y)$

- Apresentar o resultado sob a forma: (ver [4])

Valor nominal (mm)	Valor lido no *instrumento** (média) (mm)	Erro (mm)

*substituir pelo caso concreto.

Acrescentanto, após ter substituído o valor de U e das outras variáveis em itálico,
" Valor lido na Régua/Escala/Fita Métrica ± **U**

onde "Valor lido na Régua/Escala/Fita Métrica" e U estão expressos em mm.

A incerteza expandida de medição apresentada corresponde à incerteza padrão de medição multiplicada pelo factor de expansão **k=** *k* , calculado a partir da distribuição t com *G.lib.efect.* graus de liberdade efectivos para se obter um nível de confiança de aproximadamente 90% . A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com o documento EAL-R2. A estabilidade de longo prazo do objecto não foi tomada em consideração."

Referências

[1] Anexo " Réguas, Escalas e Fitas Métricas"
[2] Capítulo III-1.1 "Como obter a incerteza padrão a partir de certificados"
[3] Capítulo III-1.3 c) "Como determinar k a partir de graus de liberdade efectivos"
[4] Capítulo II-4.2 e apêndice II-4 "Expressão da incerteza"

Procedimento prático para o cálculo da incerteza expandida na calibração de

Medidores de Interiores (II) e de Espessuras (I)

(consultar [1])

- Registar a temperatura ambiente (em °C)

- Fazer 5 leituras :

  I- do comprimento do bloco padrão
  II- do afastamento das faces de medição do banco de calibração e medida

  nos pontos pré-definidos da escala .

  Calcular para cada um desses pontos, a média das 5 leituras $\bar{\ell} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5}{5}$

- Calcular a variância experimental da média das observações, em cada ponto da escala através da fórmula:

$$s^2(\bar{\ell}) = \frac{(x_1 - \bar{\ell})^2 + (x_2 - \bar{\ell})^2 + (x_3 - \bar{\ell})^2 + (x_4 - \bar{\ell})^2 + (x_5 - \bar{\ell})^2}{20}$$

  considerar apenas **o maior valor** encontrado de $s^2(\bar{\ell})$

- Consultar o certificado de calibração dos respectivos padrões e calcular a incerteza padrão associada ***a*** a partir da incerteza expandida dada (ver [2]) bem como os graus de liberdade efectivos ***a'*** .

  Nota: **Quando nada for dito nos certificados acerca dos graus de liberdade efectivos consideram-se** ∞ . Recorde-se que o resultado de um quociente cujo denominador seja ∞, é zero.

- Consultar o certificado de calibração do termómetro e calcular a incerteza padrão associada ***c*** a partir da incerteza expandida dada.(ver [2]) .

- Fazer:

  e = [(Espessura do ponteiro / Espaço físico entre duas indicações medida directamente sobre o mostrador) x Resolução real do medidor]^2 **/ 12**

↳ Incerteza padrão

Substituir as variáveis atrás determinadas na expressão:
(Atenção: **a unidade de comprimento utilizada deverá ser o μm**)

$$u(y) = \sqrt{(a^2 + s^2(\bar{\ell}) + e) + (Lx11{,}5x10^{-6})^2 x(c^2 + 0{,}707^2)}$$

↳ Incerteza expandida

1° Determinar

$$d = \frac{(a^2 + s^2(\bar{\ell}) + e)^2}{\frac{a^4}{a'} + \frac{(s^2(\bar{\ell}))^2}{4}}$$

2° Determinar

$$G.lib.efect. = \frac{u^4(y)}{\frac{(a^2 + s^2(\bar{\ell}) + e)^2}{d}}$$

3° Consultar a tabela dada em [3] e ver o *k* correspondente a *G.lib.efect.*

4° Determinar $U = k \cdot u(y)$

↳ Apresentar o resultado sob a forma: (ver [4])

Valor nominal (mm)	Valor lido no medidor (média) (mm)	Erro (mm)

*substituir pelo caso concreto.

Acrescentanto, após ter substituído o valor de U e das outras variáveis em itálico,
" Valor lido no medidor de interiores/espessuras± **U**

onde "Valor lido no medidor de interiores/espessuras" e U estão expressos em mm.

A incerteza expandida de medição apresentada corresponde à incerteza padrão de medição multiplicada pelo factor de expansão **k=** *k* , calculado a partir da distribuição t com *G.lib.efect.* graus de liberdade efectivos para se obter um nível de confiança de aproximadamente 90% . A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com o documento EAL-R2. A estabilidade de longo prazo do objecto não foi tomada em consideração."

Referências

[1] Anexo " Medidores de Interiores e de Espessuras"
[2] Capítulo III-1.1 "Como obter a incerteza padrão a partir de certificados"
[3] Capítulo III-1.3 c) "Como determinar k a partir de graus de liberdade efectivos"
[4] Capítulo II-4.2 e apêndice II-4 "Expressão da incerteza"

Procedimento prático para o cálculo da incerteza expandida na calibração de

Paquímetros

(Considerar o seguinte agrupamento e consultar [1])

	Paquímetros	Padrão
I	• Paquímetros tipo A;B;D;E de capacidade <200 mm • Paquímetros de engrenagens	Blocos padrão
II	• Centri-meter	Placas padrão
III	• Paquímetros tipo A,B,D,E de capacidade >200 mm • Paquímetros tipo C	Banco de calibração e medida

↳ Registar a temperatura ambiente (em °C)

↳ Fazer 5 leituras do:

-comprimento do bloco padrão (em I)
-distância entre furos das placas padrão (em II)
-afastamento das faces de medição do banco de calibração e medida (em III)

nos pontos pré-definidos da escala e para cada tipo de maxila existente no paquímetro

Calcular para cada um desses pontos, a média das 5 leituras $\bar{\ell} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5}{5}$

↳ Calcular a variância experimental da média das observações, em cada ponto da escala e para cada tipo de maxila, através da fórmula:

$$s^2(\bar{\ell}) = \frac{(x_1 - \bar{\ell})^2 + (x_2 - \bar{\ell})^2 + (x_3 - \bar{\ell})^2 + (x_4 - \bar{\ell})^2 + (x_5 - \bar{\ell})^2}{20}$$

considerar apenas **o maior valor** encontrado de $s^2(\bar{\ell})$

↳ Consultar o certificado de calibração do padrão e calcular a incerteza padrão associada ***a*** a partir da incerteza expandida dada (ver [2]) bem como os graus de liberdade efectivos ***a'***.

Em I : $a = \sum_{i=1}^{n} (0{,}02 + 0{,}3 \cdot L_i)^2$

em que n = nº blocos sobrepostos para obter L (maior valor nominal testado, em metros).

i = bloco i sobreposto para obter L

L_i = comprimento do padrão i (em metros).

Nota: esta expressão só é válida enquanto a entidade calibradora dos blocos padrão continuar a apresentar nos seus certificados a incerteza sob a forma: 0,04+0,6xL, com k=2

Em II : **a** = maior incerteza padrão das placas utilizadas
Em III : **a** = incerteza padrão do banco de calibração e medida

Nota: **Quando nada for dito nos certificados acerca dos graus de liberdade efectivos consideram-se** ∞ . Recorde-se que o resultado de um quociente cujo denominador seja ∞, é zero.

- Consultar o certificado de calibração do termómetro e calcular a incerteza padrão associada ***c*** a partir da incerteza expandida dada.(ver [2]) .

- Fazer:

e = ("resolução")^2 / 12

em que o valor de "resolução" é dado:
- No caso dos paquímetros digitais pela diferença de indicação que corresponde à alteração de uma unidade do algarismo menos significativo do dispositivo indicador.
- No caso dos paquímetros analógicos pela própria resolução indicada no aparelho.

- Incerteza padrão

Substituir as variáveis atrás determinadas na expressão:
(Atenção: **a unidade de comprimento utilizada deverá ser o μm)**

$$u(y) = \sqrt{(a^2 + s^2(\bar{\ell}) + e) + (Lx11{,}5x10^{-6})^2 x(c^2 + 0{,}707^2)}$$

- Incerteza expandida

1º Determinar

$$d = \frac{(a^2 + s^2(\bar{\ell}) + e)^2}{\frac{a^4}{a'} + \frac{(s^2(\bar{\ell}))^2}{4}}$$

2º Determinar

$$G.lib.efect. = \frac{u^4(y)}{\frac{(a^2 + s^2(\bar{\ell}) + e)^2}{d}}$$

3° Consultar a tabela dada em [3] e ver o *k* correspondente a *G.lib.efect.*

4° Determinar U = k ·u(y)

↳ Apresentar o resultado para cada maxila sob a forma: (ver [4])

Valor nominal (mm)	Valor lido no Paquímetro(média) (mm)	Erro (mm)

Acrescentanto, após ter substituido o valor de U e das outras variáveis em itálico,
" Valor lido no Paquímetro **± U**

onde "Valor lido no Paquímetro" e U estão expressos em mm.

A incerteza expandida de medição apresentada corresponde à incerteza padrão de medição multiplicada pelo factor de expansão **k=** *k* , calculado a partir da distribuição t com *G.lib.efect.* graus de liberdade efectivos para se obter um nível de confiança de aproximadamente 90% . A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com o documento EAL-R2. A estabilidade de longo prazo do objecto não foi tomada em consideração."

Nota:

No caso dos paquímetros centri-meter deverão ser expressos dois valores para a incerteza:

- um referente à utilização do centri-meter sem varetas de ampliação. A incerteza neste caso é apenas a que se obteve através deste procedimento.
- outro referente à utilização do centri-meter com varetas de ampliação. A incerteza é neste caso a soma da que se obteve através deste procedimento com a que se obtém através do procedimento referente à calibração das mesmas.

Referências

[1] Anexo " Paquímetros "
[2] Capítulo III-1.1 "Como obter a incerteza padrão a partir de certificados"
[3] Capítulo III-1.3 c) "Como determinar k a partir de graus de liberdade efectivos"
[4] Capítulo II-4.2 e apêndice II-4 "Expressão da incerteza"

Procedimento prático para o cálculo da incerteza expandida na calibração de

Micrómetros

(Considerar o seguinte agrupamento e consultar [1])

	Micrómetros	Padrão
I	• Micrómetros exteriores de capacidade 0-100 mm (excepto em "V") • Micrómetros de coluna	Blocos padrão
II	• Micrómetros exteriores em "V"	Conjunto de cilindros
III	• Micrómetros exteriores 100-1000 mm (excepto em "V") • Fusos micrométricos • Micrómetros interiores de varetas • Micrómetros de profundidades • Unitestes	Banco de calibração e medida
IV	• Micrómetros interiores tipo 3 pontos	Argolas padrão

- Registar a temperatura ambiente (em °C)

- Fazer 5 leituras do:
  - -comprimento do bloco padrão (em I)
  - -diâmetro exterior dos cilindros (em II)
  - -afastamento das faces de medição do banco de calibração e medida (em III)
  - -diâmetro interior das argolas padrão (em IV)

  nos pontos pré-definidos do fuso micrométrico.

  Calcular para cada um desses pontos, a média das 5 leituras $\bar{\ell} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5}{5}$

- Calcular a variância experimental da média das observações, em cada ponto do fuso micrométrico, através da fórmula:

$$s^2(\bar{\ell}) = \frac{(x_1 - \bar{\ell})^2 + (x_2 - \bar{\ell})^2 + (x_3 - \bar{\ell})^2 + (x_4 - \bar{\ell})^2 + (x_5 - \bar{\ell})^2}{20}$$

  considerar apenas **o maior valor** encontrado de $s^2(\bar{\ell})$

- Consultar o certificado de calibração do padrão e calcular a incerteza padrão associada ***a*** a partir da incerteza expandida dada (ver [2]) bem como os graus de liberdade efectivos ***a'*** .

Em I : $\mathbf{a} = \sum_{i=1}^{n} (0{,}02 + 0{,}3 \cdot \mathbf{L_i})^2$

em que n = nº blocos sobrepostos para obter L (maior valor nominal testado, em metros).
i = bloco i sobreposto para obter L
L_i = comprimento do padrão i (em metros).

Nota: esta expressão só é válida enquanto a entidade calibradora dos blocos padrão continuar a apresentar nos seus certificados a incerteza sob a forma: 0,04+0,6xL, com k=2

Em II : **a** = maior incerteza padrão dos cilindros utilizados
Em III : **a** = incerteza padrão do banco de calibração e medida
Em IV : **a** = maior incerteza padrão das argolas padrão utilizadas

Nota: **Quando nada for dito nos certificados acerca dos graus de liberdade efectivos consideram-se** ∞ . Recorde-se que o resultado de um quociente cujo denominador seja ∞ , é zero.

- Consultar o certificado de calibração do termómetro e calcular a incerteza padrão associada ***c*** a partir da incerteza expandida dada.(ver [2]) .

- Fazer:

e = ("resolução")^2 / 12

em que o valor de "resolução" é dado:
- No caso dos micrómetros digitais, pela diferença de indicação que corresponde à alteração de uma unidade do algarismo menos significativo do dispositivo indicador.
- No caso dos micrómetros analógicos:
  - com nónio, pela própria resolução indicada no aparelho.
  - sem nónio, pela décima parte da resolução indicada no aparelho.

- Incerteza padrão

Substituir as variáveis atrás determinadas na expressão:
(Atenção: **a unidade de comprimento utilizada deverá ser o μm)**

$$u(y) = \sqrt{(\mathbf{a}^2 + \mathbf{s}^2(\bar{\ell}) + \mathbf{e} + \mathbf{f}) + (\mathbf{Lx11{,}5x10^{-6}})^2 \mathbf{x}(\mathbf{c}^2 + 0{,}707^2)}$$

- Incerteza expandida

1º Determinar

$$d = \frac{(a^2 + s^2(\bar{\ell}) + e + f)^2}{\frac{a^4}{a'} + \frac{(s^2(\bar{\ell}))^2}{4}}$$

2° Determinar

$$G.lib.efect. = \frac{u^4(y)}{\frac{(a^2 + s^2(\bar{\ell}) + e + f)^2}{d}}$$

3° Consultar a tabela dada em [3] e ver o *k* correspondente a *G.lib.efect.*

4° Determinar U = k · u(y)

↳ Apresentar o resultado sob a forma

Valor nominal (mm)	Valor lido no Micrómetro(média) (mm)	Erro (mm)

Acrescentanto, após ter substituido o valor de U e das outras variáveis em itálico,
" Valor lido no Micrómetro **± U**

onde "Valor lido no Micrómetro" e U estão expressos em mm.

A incerteza expandida de medição apresentada corresponde à incerteza padrão de medição multiplicada pelo factor de expansão **k=** *k* , calculado a partir da distribuição t com *G.lib.efect.* graus de liberdade efectivos para se obter um nível de confiança de aproximadamente 90% . A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com o documento EAL-R2. A estabilidade de longo prazo do objecto não foi tomada em consideração."

Referências

[1] Anexo " Micrómetros "
[2] Capítulo III-1.1 "Como obter a incerteza padrão a partir de certificados"
[3] Capítulo III-1.3 c) "Como determinar k a partir de graus de liberdade efectivos"
[4] Capítulo II-4.2 e apêndice II-4 "Expressão da incerteza".

Procedimento prático para o cálculo da incerteza expandida na calibração de

Comparadores e Comparadores de alavanca

(consultar [1])

- Registar a temperatura ambiente (em °C)

- Fazer 5 leituras no calibrador de comparadores em cada um dos pontos pré-definidos da escala, e para cada um dos sentidos (crescente e decrescente) e no caso dos comparadores de alavanca também para cada direcção.

  Calcular para cada um desses pontos, a média das 5 leituras $\bar{\ell} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5}{5}$.

- Calcular a variância experimental da média das observações, em cada ponto da escala através da fórmula:

$$s^2(\bar{\ell}) = \frac{(x_1 - \bar{\ell})^2 + (x_2 - \bar{\ell})^2 + (x_3 - \bar{\ell})^2 + (x_4 - \bar{\ell})^2 + (x_5 - \bar{\ell})^2}{20}$$

  considerar apenas **o maior valor** encontrado de $s^2(\bar{\ell})$

- Consultar o certificado de calibração do calibrador de comparadores e calcular a incerteza padrão associada a a partir da incerteza expandida dada (ver [2]) bem como os graus de liberdade efectivos a' .

  Nota: **Quando nada for dito nos certificados acerca dos graus de liberdade efectivos consideram-se** ∞ . Recorde-se que o resultado de um quociente cujo denominador seja ∞, é zero.

- Consultar o certificado de calibração do termómetro e calcular a incerteza padrão associada c a partir da incerteza expandida dada.(ver [2]) .

- Fazer:

  e = [(Espessura do ponteiro / Espaço físico entre duas indicações medida directamente sobre o mostrador) x Resolução real do medidor]^2 **/ 12**

f = [erro de histerese encontrado]^2 / 12

- Incerteza padrão

Substituir as variáveis atrás determinadas na expressão:
(Atenção: **a unidade de comprimento utilizada deverá ser o μm**)

$$u(y) = \sqrt{(a^2 + s^2(\bar{\ell}) + e + f) + (Lx11{,}5x10^{-6})^2 x(c^2 + 0{,}707^2)}$$

- Incerteza expandida

1° Determinar

$$d = \frac{(a^2 + s^2(\bar{\ell}) + e + f)^2}{\frac{a^4}{a'} + \frac{(s^2(\bar{\ell}))^2}{4} + \frac{(f)^2}{4}}$$

2° Determinar

$$G.lib.efect. = \frac{u^4(y)}{\frac{(a^2 + s^2(\bar{\ell}) + e + f)^2}{d}}$$

3° Consultar a tabela dada em [3] e ver o *k* correspondente a *G.lib.efect.*

4° Determinar U = k * u(y)

- Apresentar o resultado sob a forma: (ver [4])

Valor nominal (mm)	Erro (mm)

Acrescentanto, após ter substituído o valor de U e das outras variáveis em itálico,
" Valor lido no comparador± **U**

onde "Valor lido no comparador" e U estão expressos em mm.

A incerteza expandida de medição apresentada corresponde à incerteza padrão de medição multiplicada pelo factor de expansão **k=** *k* , calculado a partir da distribuição t com *G.lib.efect.* graus de liberdade efectivos para se obter um nível de confiança de aproximadamente 90% . A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com o documento EAL-R2. A estabilidade de longo prazo do objecto não foi tomada em consideração."

Referências

[1] Anexo " Comparadores"
[2] Capítulo III-1.1 "Como obter a incerteza padrão a partir de certificados"
[3] Capítulo III-1.3 c) "Como determinar k a partir de graus de liberdade efectivos"
[4] Capítulo II-4.2 e apêndice II-4 "Expressão da incerteza"

FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO
BIBLIOTECA
0000068055