

*Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial  
Diretoria de Metrologia Científica e Industrial - Dimci  
Divisão de Metrologia Mecânica - Dimec*

# **INCERTEZA NOS RESULTADOS DE MEDIÇÃO EM CALIBRAÇÃO DE FORÇA**

**DIMEC/gc-06/v.00**  
**Tradução do documento EAL-G221 Agosto 1996**

## **GUIA DE CALIBRAÇÃO**

**Setembro 2008**



## Informação

Esta publicação é uma tradução do documento “Incerteza nos Resultados de Medição em Calibração de Força” (EAL-G221, August 1996). Os direitos autorais do documento original pertencem à EURAMET. Este documento não pode ser copiado para a revenda e não pode ser reproduzido a não ser na sua totalidade. Em nenhuma circunstância a EURAMET, os autores ou qualquer outra pessoa envolvida na criação do documento poderá ser responsabilizada por quaisquer danos decorrentes do uso das informações aqui contidas.”

# Conteúdo

1	Introdução-----	1
2	Escopo e campo de aplicação-----	2
3	Tipos de máquinas de calibração de força e exemplos típicos de Melhor Capacidade de Medição-----	2
4	Método de medição para determinar a melhor capacidade de medição alcançada pelas máquinas de calibração de força-----	3
5	Estimativa da incerteza expandida de medição dos valores de referência-----	4
6	Cálculo da melhor capacidade de medição alcançada pelas máquinas de calibração de força-----	7
7	Contribuição de incertezas derivadas dos resultados de calibração e estimativa de variâncias-----	10
8	Cálculo das incertezas-----	11
9	Cálculo da incertezas relativas dos resultados de calibração de acordo a norma EN 10002-3-----	11
10	Diagrama de bloco-----	13
11	Referências-----	14

## **Incerteza nos Resultados de Medição em Calibração de Força**

### **1 Introdução**

- 1.1 A incerteza de medição associada com as escalas de força realizadas nos institutos nacionais de metrologia, é derivada das unidades de base do SI e assegurada por meio de várias intercomparações internacionais realizadas nas duas décadas passadas, em todo o mundo. A incerteza relativa de medição cujos valores de força podem ser realizados por máquinas padrão de força por peso-morto é fixada por vários laboratórios nacionais com sendo  $\leq 2 \times 10^{-5}$ . Na prática, todavia, quando máquinas padrão de peso-morto são utilizadas para a calibração de transdutores de força, as diferenças entre os resultados obtidos com diferentes máquinas padrão são geralmente significativamente maiores devido ao efeito de interação. Isto tornou-se evidente nas comparações laboratoriais da BCR e WECC passadas, que foram realizadas em 1987 e 1991, respectivamente [ref. 1,2].
- 1.2 Entretanto, os resultados de medição alcançados com máquinas de calibração de força (também com máquinas de peso-morto) que estão instaladas em laboratório de calibração acreditados, devem ser rastreáveis as unidades realizadas com as máquinas padrão nacionais. Em adição, para estabelecer confiança mútua entre os diferentes serviços de calibração, a diferença dos resultados de calibração do padrão de medição de força deve estar entre os limites das melhores capacidades de medição dos laboratórios acreditados participantes.
- 1.3 Um dos métodos reconhecidos para a pesquisa dos efeitos parasitas de força inseridos nas máquinas de calibração, e que deve-se levar em conta é a comparação interlaboratorial utilizando um transdutor de força de alta exatidão como padrão de transferência em uma faixa restrita de força. A melhor capacidade de medição será determinada daquela maneira. Por esta técnica, as vantagens da alta resolução e da repetitividade do transdutor de força serão aproveitados, enquanto que outros efeitos sistemáticos, tais como aqueles devido a histerese, posição angular, deriva a longo prazo e efeito de fluência, serão considerados de modo a não influenciar os resultados da intercomparação.
- 1.4 Para transdutores de força de uso comercial calibrados em máquinas de calibração de força, o procedimento de classificação aplicado na Europa é aquele dado na Norma Européia EN 10002-3 [ref. 3]. Conseqüentemente, a fim de se determinar a incerteza de medição dos resultados de calibração para uma classe em particular do dispositivo de força, as diferentes contribuições para a incerteza também devem ser estabelecidas.

## **2 Escopo e campo de aplicação**

- 2.1 Os requisitos de incerteza para as forças aplicadas para a calibração de transdutores de força estão definidos em várias normas, como por exemplo a EN 10002-3. Entretanto, as normas não estabelecem um procedimento para a determinação das incertezas, especialmente as incertezas dos resultados de calibração. Para a definição do escopo de acreditação de um laboratório de calibração e para a determinação da incerteza dos resultados de calibração, é necessário um guia que garanta a compatibilidade dos resultados de calibração e suas incertezas.
- 2.2 O escopo deste guia, proporciona um método para estimar a melhor capacidade de medição alcançada por uma máquina de calibração de força de um laboratório de calibração acreditado, e descreve um procedimento para a expressão de todas as incertezas dos resultados de calibração de transdutor de força, para calibrações realizadas em laboratório de calibração de acordo com a EN 10002-3.
- 2.3 O método desenvolvido permite que todas as incertezas de medição de força sejam expressas com o uso de critérios estabelecidos para classificação de instrumentos no campo da medição de força [ref. 4]. Não é o propósito deste documento fornecer um método para a determinação da incerteza das escalas de força realizadas pelas máquinas padrão de força dos institutos nacionais de metrologia, entretanto, em muitos casos o método descrito pode também ser aplicado a estes institutos. Este guia é baseado no método de estimativa de incerteza descrito no documento EAL-R2 e no Guia para a Expressão da Incerteza de Medição [ref. 5, 6]. Este conceito também pode ser aplicado para outros campos de medição mecânica.

## **3 Tipos de máquinas de calibração de força e exemplos típicos de Melhor Capacidade de Medição**

- 3.1 A melhor capacidade de medição esperada, a ser realizada por uma máquina de calibração de força depende do tipo de realização da força. A tabela 3.1 mostra valores típicos. A incerteza de medição dos valores de força que são realizados por uma máquina de calibração de força por peso-morto em laboratórios de calibração, pode ser calculada de um modo similar àquele utilizado para máquinas padrão e pode ser menor que  $5 \times 10^{-5}$ . Porém, de acordo com o desenvolvimento atual dos padrões de força de transferência, a tentativa e o gasto para determinar uma melhor capacidade de medição menor que  $5 \times 10^{-5}$  pode ser muito grande ou tecnicamente inviável. Em muitos casos, os requisitos para um laboratório de calibração são satisfeitos se a melhor capacidade de medição com  $1 \times 10^{-4}$  puder ser realizada. Isto capacita o laboratório de calibração a calibrar instrumentos de medição de força de classe 00 de acordo com a EN 10002-3.

- 3.2 Os valores da Tabela 3.1 podem ser usados como a melhor capacidade de medição nos laboratórios acreditados, assumindo-se que o laboratório de calibração irá disseminar a grandeza força com a melhor capacidade de medição obtida como o valor médio das últimas três calibrações, cada uma executada em diferentes posições angulares, uniformemente distribuídas em torno do eixo axial da máquina de calibração de força. Este método de medição é usado porque a força é uma grandeza vetorial. Por esta razão, a diferença entre o efeito de rotação na máquina de padrão de força e a máquina de calibração de força não será fundamentalmente considerado para os cálculos da melhor capacidade de medição. Se o efeito de rotação na força da máquina de calibração for razoavelmente grande, deve-se considerar que a razão disto é devido ao alinhamento imperfeito da máquina.

**Tabela 3.1: Faixas características de melhores capacidades de medição**

<b>Tipos de máquinas de calibração de força</b>	<b>Exemplos de melhor capacidade de medição (incerteza de medição expandida)</b>
Máquina de calibração de força por peso-morto	$5 \times 10^{-5}$ to $1 \times 10^{-4}$
Máquina de calibração de força por amplificação hidráulica	$1 \times 10^{-4}$ to $5 \times 10^{-4}$
Máquina de calibração de força por amplificação por alavanca	$1 \times 10^{-4}$ to $5 \times 10^{-4}$
Máquina de calibração de força por comparação com um ou três transdutores de força de referência	$5 \times 10^{-4}$ to $5 \times 10^{-4}$

- 3.3 Em máquinas com amplificação hidráulica e por alavanca, o menor valor da melhor capacidade de medição pode ser alcançado pela correção dos erros sistemáticos do efeito de amplificação. Para a determinação da melhor capacidade de medição da máquina de calibração de força por comparação, é desejável calibrar primeiro o transdutor de força incorporado a máquina em uma máquina padrão de calibração, e então realizar a calibração da máquina de calibração utilizando um padrão de força de transferência.

#### **4 Método de medição para determinar a melhor capacidade de medição alcançada pelas máquinas de calibração de força**

- 4.1 Para se obter as grandezas de entrada relevantes para a determinação da incerteza de acordo com a EAL-R2, deve-se aplicar o seguinte plano de medição.

- Seleção de diferentes transdutores de força como padrões de transferência que cubram todas as faixas de forças da máquina de calibração de força. As faixas de trabalho dos padrões de transferência normalmente devem iniciar em 40 % ou 50 % da sua força nominal. Isto reduziria a influência do efeito de interação. Isto requer geralmente o uso de três a cinco padrões de transferência. É necessário usar transdutores padrão separados para tração e compressão.
- Calibração dos padrões de transferência em máquina padrão de força nacional para determinar os seus valores de referência. A medição deve ser executada em  $n$  posições de rotação (no mínimo três) e deve incluir a medição da histerese. As medições são para serem repetidas uma vez em pelo menos em uma das posições de rotação.
- Calibração da máquina de calibração de força em consideração por meio de padrões de transferência. O procedimento de medição será similar ao da calibração do padrão de transferência.
  - Determinação do desvio relativo entre os valores de referência e os resultados de todos os valores médios das calibrações da máquina de calibração de força para cada patamar de força dentro da faixa total de medição.
  - Recalibração dos padrões de transferência em máquina padrão de força nacional para verificar o estado da calibração.

## 5 Estimativa da incerteza expandida de medição dos valores de referência

5.1 Para a estimativa da incerteza relativa de medição, a EAL-R2 é usada em conjunto com o *Guia para a Expressão de Incerteza em Medição* [ref. 6]. A incerteza-padrão relativa e a incerteza expandida relativa associada aos valores de referência dos padrões de transferência serão calculados em três passos.

- Passo 1: Determinação da incerteza relativa expandida  $W_{fsm}$  para a realização da força pela máquina padrão de força.

A incerteza relativa expandida com a qual a unidade força é realizada por uma máquina padrão de força típica é, por exemplo,  $W_{fsm} = 2 \times 10^{-5}$  para uma máquina de peso-morto [7]. Para máquinas com amplificação hidráulica ou por alavanca,  $W_{fs}$  pode ser estimada pelas regras básicas ou pode ser determinada experimentalmente por meio de medição de comparação com máquinas de peso-morto. Valores típicos de incerteza de medição são, por exemplo, de  $1 \times 10^{-4}$  a  $2 \times 10^{-4}$ .

- Passo 2: Determinação da incerteza relativa expandida  $W_{tsd}$  da calibração dos padrões de transferência em máquina de força padrão.

A grandeza determinada na calibração dos transdutores de força usados como padrão de transferência para os patamares de força selecionados é o seu coeficiente de calibração  $K_{tsd}$  que é a relação entre o valor de força aplicado  $F_{fsm}$  e o valor  $x$  indicado pelo

$$K_{tsd} = \frac{F_{fsm}}{x} \quad (1)$$

transdutor de força.

Para eliminar a influência do efeito de rotação, o valor indicado  $x$  mostrado na equação (1) é o valor médio de  $n$  posições de rotação do transdutor uniformemente espaçado em torno de seu eixo axial.

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

A variância relativa da média é

$$w^2(\bar{x}) = \frac{u^2(\bar{x})}{\bar{x}^2} = \frac{1}{n} \frac{a_{rep}^2}{3x^2} \quad (3)$$

assumindo-se que a variância seja igual para as diferentes posições de rotação. Esta variância é estimada pela meia banda  $a_{drift}$  da variação máxima da repetitividade sem rotação do transdutor (probabilidade de distribuição retangular).

Para a aplicação no padrão de transferência a influência da deriva  $D$  tem que ser incorporada por uma contribuição adicional de incerteza relativa como a seguir:

$$w^2 D = \frac{a_{drift}^2}{6} \quad (4)$$

onde o seu valor é estimado por uma probabilidade de distribuição triangular de meia banda  $a_{drift}$  da variação relativa da sensibilidade. Esta suposição se justifica se as medições de comparação são realizadas durante um período curto de tempo (aproximadamente um ano).

*Nota: Se a deriva não é dependente do tempo, a distribuição triangular tem de ser substituída pela distribuição retangular.*

A incerteza padrão combinada relativa do valor de força indicado pelo padrão de transferência  $w(K_{tsd})$  e sua incerteza expandida relativa  $W_{tsd}$  (fator de abrangência  $k = 2$ ) pode ser determinado pelas seguintes

$$w(K_{tsd}) = \sqrt{w^2(\bar{x}) + w^2(D)} \quad (5)$$

equações:

- Passo 3: Cálculo da incerteza expandida relativa dos valores de referência  $W_{refv}$ .

$$W_{tsd} = k \times w(K_{tsd}) \quad (6)$$

Finalmente, a incerteza relativa expandida do valor de referência será determinada como se segue:

$$W_{refv} = k \times \sqrt{w^2(F_{fsm}) + w^2(K_{tsd})} \quad (7)$$

5.2 A tabela 5.2 mostra exemplos típicos de incerteza expandida relativa de valores de referência de quatro qualidades diferentes de transdutores padrão em relação a diferentes tipos de máquinas padrão de força. Os padrões de transferências com a incerteza relativa mais baixa realizável até o presente, como mostrado na coluna 2, são os transdutores de força com faixa entre 100kN e 500kN. Para faixas abaixo de 2kN (coluna 3), ainda é muito difícil encontrar padrões de transferência de baixa incerteza relativa. Se as máquinas padrão de força não são máquinas de peso-morto, a incerteza dos padrões de transferência não são muito importantes, conforme mostrado nas colunas 4 e 5. Entretanto, no caso de forças acima de 3MN devem ser realizadas pesquisas para selecionar o padrão de transferência apropriado.

**Tabela 5.1: Exemplos de incerteza expandida relativa de valores de referência**

<b>Máquina padrão de força</b>				
	<b>Peso - morto</b>	<b>Peso - morto</b>	<b>Amplificação</b>	<b>Amplificação</b>
		$\leq 2 \text{ kN}$	<b>hidráulica ou</b>	<b>hidráulica ou</b>
			<b>por alavanca</b>	<b>por alavanca</b>
$W_{fsm}$	$2 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$
<b>Exemplos de padrões de transferência de força</b>				
$a_{drift}$	$3 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-4}$
$w^2(D)$	$1,5 \times 10^{-10}$	$4,2 \times 10^{-10}$	$4,2 \times 10^{-10}$	$1,7 \times 10^{-9}$
$a_{rep}$	$1 \times 10^{-5}$	$1,5 \times 10^{-5}$	$2,5 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$
$w^2(x)$	$1,1 \times 10^{-11}$	$2,5 \times 10^{-11}$	$7 \times 10^{-11}$	$2,8 \times 10^{-10}$
$W_{tsd}$	$2,5 \times 10^{-5}$	$4,2 \times 10^{-5}$	$4,4 \times 10^{-5}$	$8,9 \times 10^{-5}$
<b>Incerteza expandida relativa dos valores de referência</b>				
$W_{refv}$	$3,2 \times 10^{-5}$	$4,2 \times 10^{-5}$	$1,1 \times 10^{-4}$	$2,2 \times 10^{-4}$

## **6 Cálculo da melhor capacidade de medição alcançada pelas máquinas de calibração de força**

6.1 Depois de concluída a calibração da máquina de calibração de força a sua melhor capacidade de medição em termos relativos pode ser determinada de acordo com os dois passos seguintes. O cálculo é baseado na suposição que o transdutor de força a ser calibrado não irá introduzir componentes adicionais de incerteza.

- Passo 4: Determinação da incerteza expandida relativa  $W_{fem}$  associada à realização da força pela máquina de calibração de força.

As estimativas de entrada para a determinação da incerteza relativa são definidas na Tabela 6.1 e obtidas pela comparação direta dos valores de referência com os valores de força indicados na máquina da calibração de força.

**Tabela 6.1: Contribuições de incerteza para a determinação da melhor capacidade de medição para os patamares selecionados dentro da faixa de medição da máquina de calibração de força ( $a$ : meia banda relativa do desvio máximo)**

Contribuição de incerteza	Meia banda $a$	Probabilidade de distribuição	Estimativa de entrada
Desvio relativo entre os valores de referência de força e os valores realizados na máquina de calibração de força	$a_{rel\_dev}$	distribuição triangular	$\Delta_D$
Repetitividade relativa da máquina de calibração de força determinada com a posição constante do transdutor de força	$a_{rep\_fcm}$	distribuição retangular	$\Delta_R$
<i>Nota: a incerteza do transdutor de força foi considerada desprezível</i>			
Desvio relativo de histerese entre o padrão de transferência e a histerese medida na máquina de calibração de força	$a_{hys\_fcm}$	distribuição retangular	$\Delta_H$

6.2 As variâncias relativas correspondentes são determinadas de acordo com as seguintes equações:

$$w^2(\Delta_D) = \frac{a_{rel\_dev}^2}{6} \quad (8)$$

$$w^2(\Delta_R) = \frac{a_{rep\_fcm}^2}{3} \quad (9)$$

$$w^2(\Delta_H) = \frac{a_{hys\_fcm}^2}{3} \quad (10)$$

6.3 A incerteza padrão combinada relativa  $w_{fcm}$  e a incerteza expandida relativa  $W_{fcm}$  associada à realização da força pela máquina de calibração de força são determinadas de acordo com equações (11) e (12) a seguir:

$$w_{fcm} = \sqrt{w^2(\Delta_D) + w^2(\Delta_R) + w^2(\Delta_H)} \quad (11)$$

$$W_{fcm} = k \times w_{fcm} \quad (12)$$

6.4 A Tabela 6.4 mostra quatro exemplos típicos de resultados de medições obtidos em máquina de calibração de força. Os valores indicados na

coluna 2 para a máquina de peso-morto são mais usuais para as máquinas com capacidade abaixo de 2kN. As medições de comparação de máquinas de baixa capacidade irão geralmente mostrar os desvios relativos ( $a_{rel\_dev}$ ) como indicado na coluna 3. A menos que a variação sistemática da relação de multiplicação das forças crescentes seja compensada na máquina de amplificação hidráulica ou por braço de alavanca, o desvio relativo irá presumivelmente ficar entre  $1 \times 10^{-4}$  e  $5 \times 10^{-4}$ .

A coluna 4 mostra os valores típicos de uma máquina de amplificação hidráulica ou por braço de alavanca. O desvio relativo de máquinas por comparação, coluna 5, depende da estrutura do suporte de carregamento e do sistema de controle da máquina. Além do mais, os componentes de incerteza do transdutor de força de referência usado na máquina, e sua instabilidade ao longo do tempo devem ser considerados com indicado no passo 5.

- Passo 5: Cálculo da melhor capacidade de medição  $W_{bmc}$ .

A melhor capacidade de medição realizada por máquinas de peso-morto por amplificação hidráulica ou por braço de alavanca será calculada pela seguinte equação:

$$W_{bmc} = k \times \sqrt{w_{refv}^2 + w_{fcm}^2} \quad (13)$$

**Tabela 6.4: Exemplos de incertezas expandidas relativas obtidas por máquinas de calibração de força**

**Exemplo de máquinas de calibração de força**

	<b>Peso-morto I</b>	<b>Peso-morto I</b>	<b>Amplificação hidráulica ou alavanca</b>	<b>Máquinas por comparação</b>
$a_{rel\_dev}$	$5 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$	$4 \times 10^{-4}$
$w^2(\Delta_D)$	$4,2 \times 10^{-10}$	$1,7 \times 10^{-9}$	$6,7 \times 10^{-9}$	$2,7 \times 10^{-8}$
$a_{rep\_fcm}$	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$	$2,5 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$
$w^2(\Delta_R)$	$3,3 \times 10^{-11}$	$3,3 \times 10^{-11}$	$2,1 \times 10^{-10}$	$8,3 \times 10^{-8}$
$a_{hys\_fcm}$	$5 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-6}$	$2,5 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-4}$
$w^2(\Delta_H)$	$8,3 \times 10^{-12}$	$8,3 \times 10^{-12}$	$2,1 \times 10^{-10}$	$3,3 \times 10^{-9}$
$W_{fcm}$	$4 \times 10^{-5}$	$8 \times 10^{-5}$	$1,8 \times 10^{-4}$	$3,5 \times 10^{-4}$

- 6.5 No cálculo para máquinas por comparação, dois componentes adicionais de incerteza, por exemplo, a incerteza  $W_{ref\_tra}$  de seu próprio transdutor de força de referência e a instabilidade a longo prazo estimada  $W_{ref\_instb}$  do transdutor de referência, tem que ser considerados e aplicada na seguinte equação:

$$W_{bcm} = \sqrt{w_{refv}^2 + w_{fcm}^2 + w_{ref\_tra}^2 + w_{ref\_instab}^2} \quad (14)$$

- 6.6 Finalmente a Tabela 6.6 mostra todos os resultados típicos de melhor capacidade de medição para tipos diferentes de máquinas de calibração de força. A incerteza relativa do transdutor de força de referência será calculada de acordo com o procedimento dados nas seções 7 a 9. A instabilidade a longo prazo dos transdutores de força de referência é determinada a partir da calibração prévia ou por estimativa. Este componente de incerteza pode ser calculado assumindo-se uma distribuição simetricamente triangular da variação na sensibilidade.

**Tabela 6.6: Exemplos de melhor capacidade de medição  $W_{bmc}$**

**Máquinas de calibração de força**

	Peso-morto 	Peso-morto 	Amplificação hidráulica ou alavanca	Máquinas por comparação
$W_{ref\_tra}$	-	-	-	$3 \times 10^{-4}$
$W_{ref\_insta}$	-	-	-	$2 \times 10^{-4}$
b				
$W_{refv}$	$3,2 \times 10^{-5}$	$4,7 \times 10^{-5}$	$3,5 \times 10^{-5}$	$3,5 \times 10^{-5}$
$W_{fcm}$	$4,3 \times 10^{-5}$	$8,3 \times 10^{-5}$	$1,8 \times 10^{-4}$	$3,5 \times 10^{-4}$
$W_{bmc}$	$5,4 \times 10^{-5}$	$9,5 \times 10^{-5}$	$1,8 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$

**7 Contribuição de incertezas derivadas dos resultados de calibração e estimativa de variâncias**

- 7.1 Desde a adoção da nova Norma Européia EN 10002-3 pelos países membros em 1992, um procedimento uniforme para a calibração e classificação dos transdutores de força pode ser aplicado na Europa. A classificação dos componentes da EN 10002-3 demonstram a estimativa da incerteza padrão dos resultados de calibração de acordo com a EAL-R2. As contribuições de incerteza dos transdutores de força são determinados a partir de repetidas observações. Elas são consideradas grandezas de entrada não correlacionadas. A tabela 7.1 mostra as probabilidade de distribuição proposta para estas grandezas de entrada.

**Tabela 7.1: Probabilidade de distribuição adotada para grandezas de entrada diferentes ( $a$ : meia banda relativa do desvio máximo da grandeza de entrada)**

Contribuições de incerteza (grandezas de entrada)	Probabilidade de distribuição	Variância relativa estimada
<i>desvio de zero</i>	distribuição retangular	$w_{zer}^2 = a^2/3$
<i>repetitividade sem rotação</i>	distribuição retangular	$w_{rep}^2 = a^2/3$
<i>repetitividade com rotação</i>	normal	$w_{rot}^2 = a^2/2$
<i>desvio de interpolação</i>	distribuição triangular	$w_{inp}^2 = a^2/6$
<i>resolução</i>	distribuição retangular	$w_{res}^2 = a^2/3$
<i>reversibilidade (histerese)</i>	distribuição retangular	$w_{rev}^2 = a^2/3 \cdot 10$

## 8 Cálculo das incertezas

- 8.1 Após a determinação da variância relativa para cada patamar de força, a incerteza padrão combinada relativa  $w$  e a incerteza expandida relativa  $W_{tra}$  para  $k = 2$  serão calculadas pelas equações (15) e (16) seguintes para cada patamar de força.

$$w_{tra} = \sqrt{w_{zer}^2 + w_{rep}^2 + w_{rot}^2 + w_{inp}^2 + w_{res}^2 + w_{rev}^2} \quad (15)$$

$$W_{tra} = k \times w_{tra} \quad (16)$$

- 8.2 A incerteza expandida relativa de calibração  $W$  será determinada considerando-se a melhor capacidade de medição da máquina de calibração de força como se segue:

$$W = k \times \sqrt{w_{tra}^2 + w_{bmc}^2} \quad (17)$$

## 9 Cálculo da incerteza relativa dos resultados de calibração de acordo a norma EN 10002-3

- 9.1 A estimativa dos resultados de calibração permite atribuir ao instrumento de medição de força quatro classes diferentes de acordo com a EN 10002-3.

A tabela 9.1a contem os erros máximos permissíveis para a classificação na classe 00. Estes valores são usados como grandezas de entrada para determinar a variância relativa de acordo com as fórmulas da Tabela 7.1. Os resultados da incerteza máxima aplicando-se as equações (15) a (17) são mostrados para a classe 00 na Tabela 9.1b.

- 9.2 A incerteza relativa da calibração do transdutor de força é calculada depois de serem obtidos os resultados de calibração de cada patamar de força. Para uma dada classe, a incerteza relativa será determinada de acordo com o mais alto valor de incerteza calculado dentro da faixa de força. Em geral, a incerteza relativa irá se referir à força mais baixa da faixa.

**Tabela 9.1a: Erros relativos máximos e sua variância correspondente**

**Erro da calibração da força  $W_{bmc}$  0,01 %**

<b>Contribuições de incerteza (grandezas de entrada)</b>	<b>erro máximo Classe 00</b>	<b>variância relativa Classe 00</b>
desvio de zero	0,012 %	$1,2 \times 10^{-9}$
repetitividade sem rotação	0,025 %	$5,2 \times 10^{-9}$
repetitividade com rotação	0,05 %	$3,1 \times 10^{-8}$
desvio de interpolação	0,025 %	$2,6 \times 10^{-9}$
resolução	0,025 %	$5,2 \times 10^{-9}$
reversibilidade (histerese)	0,07 %	$4,1 \times 10^{-8}$

**Tabela 9.1b: Incerteza máxima relativa para a classe 00**

Incerteza padrão combinada relativa $W_{tra}$	0,029 %
Incerteza expandida relativa $W_{tra}$	0,059 %
Incerteza máxima relativa de calibração $W$	0,06 %

- 9.2 A tabela 9.2 mostra, na última coluna, a incerteza relativa máxima possível para todas as quatro classes da EN 10002-3. Estas foram calculadas usando o erro permissível máximo de acordo com as grandezas de entrada padrão das equações (15) a (17). Na coluna do meio são dados os valores mínimos para cada classe. Eles são equivalentes aos valores máximos da classe respectiva mais alta. Entretanto, para a classe 00 a incerteza mínima não pode ser menor que a melhor capacidade de medição da máquina de calibração de força. A incerteza dos resultados de calibração serão calculadas de acordo com a equação (17). Se este valor é menor que o valor mínimo para a classe dada na Tabela 9.2, será usado o valor da tabela. Todas as outras grandezas, que na prática influenciam no resultado da medição, por exemplo, a instabilidade a longo prazo e a influência da temperatura, precisam, adicionalmente, serem levadas em conta pelo o usuário do instrumento de calibração.

**Tabela 9.2: Limites para a incerteza expandida relativa para as diferentes classes da EN 10002-3**

	<b>min.</b>	<b>max.</b>
Classe 00	$W_{bmc}$	0,06 %
Classe 0.5	0,06 %	0,12 %
Classe 1	0,12 %	0,24 %
Classe 2	0,20 %	0,45 %

## 10 Diagrama de bloco

10.1 A figura 1 mostra o diagrama de bloco da cadeia de incerteza, desenvolvida neste documento guia. As incertezas são definidas em quatro diferentes níveis, Para definir o escopo de acreditação de um laboratório, as grandezas de entrada requeridas são incluídas em dois diferentes níveis. Para a expressão da incerteza dos resultados de calibração do transdutor de força, as respectivas grandezas de entrada são combinadas com as incertezas do laboratório.

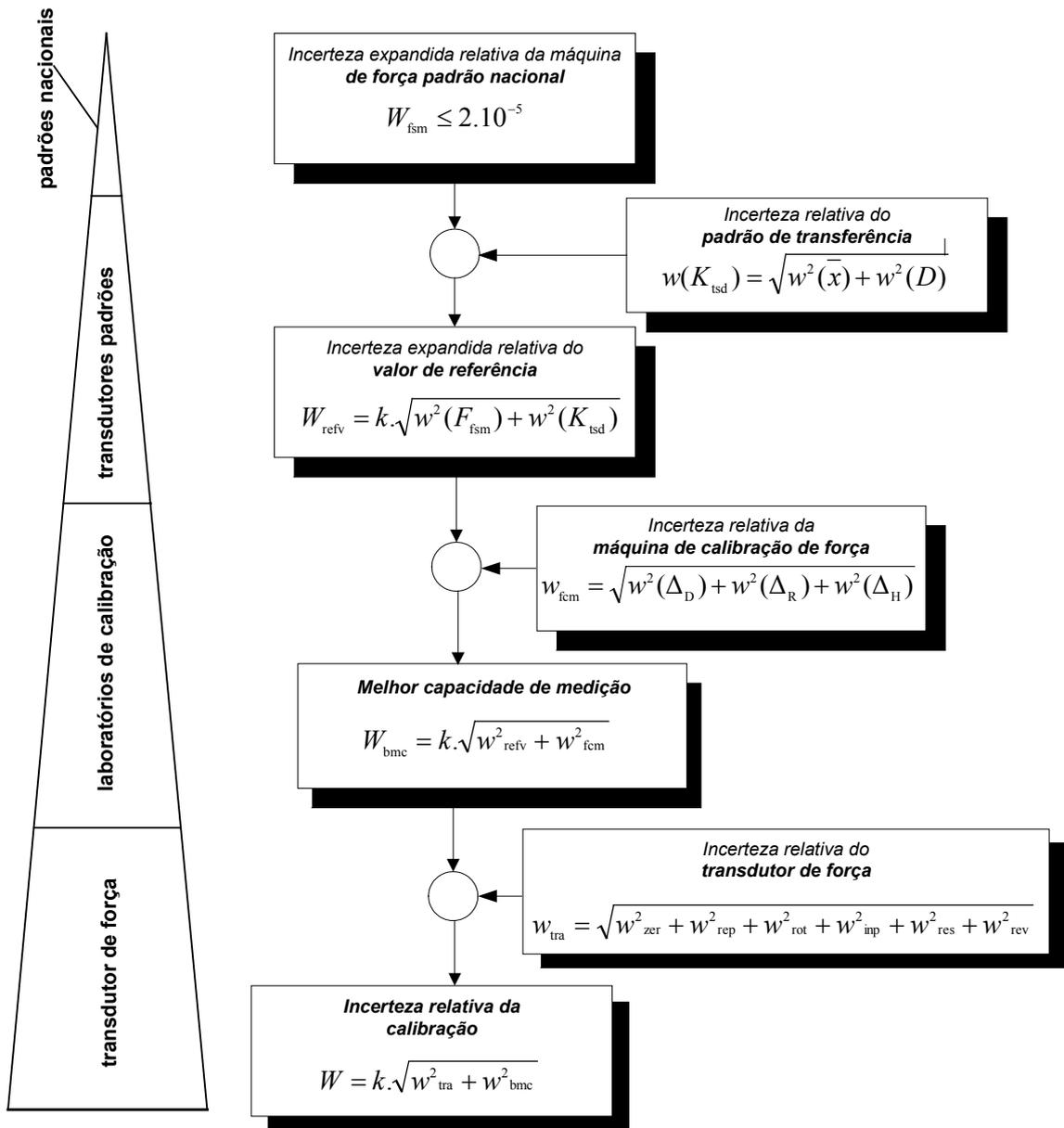


Figura 1. A hierarquia da calibração de força e sua importância para a incerteza em níveis diferentes

## 11 Referências

- 1 Sawla, A., Peters, M.: EC – Intercomparison of Force Transducer Calibration. Brussels, Commission of the European Communities, Bureau of Reference (1987), EUR 11324 EN.
- 2 Sawla, A., Peters, M.: WECC Inter-laboratory Comparison F2 Force Transducer Calibration. Braunschweig, PTB-Bericht PTB-MA-28, 1993.
- 3 EN 10002-3: 1993. Metallic materials; tensile test; part 3: Calibration of force proving instruments used for the uniaxial testing machines.
- 4 Sawla, A.: Guidance for the determination of the best measurement capability of force calibration machines and uncertainty of calibration results of force measuring devices. PTB-Mitteilungen 104 4/94, pp.237-242.
- 5 EAL-R2: 1997. Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration.
- 6 Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, ISBN 92-67-10188-9 International Organization for Standardization, 1995.
- 7 Peters, M., Sawla, A., Peschel, D.: Uncertainty in force measurement. Report of the CCM Working Group Force. Braunschweig, PTB-BERICHT PTB-MA-17, 1990.