



CÁLCULO DE INCERTEZA NA CALIBRAÇÃO DE MÁQUINA DE MEDIR UNIVERSAL

Prof. José Leonardo Noronha

Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Departamento de Produção
Cx. Postal 50, Av. BPS, 1303 - 37500-903 - Itajubá / MG, e-mail: jln@iem.efei.br

Prof. Luiz Fernando Barca

Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Departamento de Produção
e-mail: barca@iem.efei.br

Resumo. *No relato de resultados da medição de grandezas físicas, uma indicação quantitativa da qualidade desse resultado é necessária. Com essa indicação, a confiabilidade pode ser conhecida pelos usuários e somente assim, resultados de medições podem ser utilizados, comparando-os entre si e com valores de referência de uma especificação ou padrão. Este trabalho apresenta um procedimento de cálculo da incerteza na calibração de uma máquina de medir universal, com o uso de blocos padrão. Essa incerteza, que representa quantitativamente a qualidade do resultado da calibração, é calculada conforme procedimentos descritos no Guia para expressão da incerteza da medição, o ISO-GUM, publicado no Brasil em 1997 pelo INMETRO.*

Palavras-chave: metrologia, incerteza da medição, calibração

1. INTRODUÇÃO

Segundo Kessel (1996) e Mathiesen (1997), a incerteza do resultado de uma medição reflete a falta de conhecimento exato do mensurando. O resultado de uma medição após a correção dos efeitos sistemáticos reconhecidos é, ainda, tão somente uma estimativa do valor do mensurando por causa da incerteza proveniente dos efeitos aleatórios e da correção imperfeita do resultado no que diz respeito aos efeitos sistemáticos.

Na prática, há muitas fontes possíveis de incerteza em uma medição, incluindo (INMETRO, 1997; EA, 1999):

- a) definição incompleta do mensurando;
- b) realização imperfeita da definição do mensurando;
- c) amostragem não representativa - a amostra medida pode não representar o mensurando;
- d) conhecimento inadequado dos efeitos das condições ambientais sobre a medição ou medição imperfeita das condições ambientais;
- e) erro de tendência pessoal na leitura de instrumentos analógicos;
- f) resolução finita do instrumento ou limiar de mobilidade;
- g) valores inexatos dos padrões de medição e materiais de referência;
- h) valores inexatos de constantes e de outros parâmetros obtidos de fontes externas e usados no algoritmo de redução de dados ;
- i) aproximação e suposições incorporadas ao método e procedimento de medição;
- j) variações nas observações repetidas do mensurando sob condições aparentemente idênticas.

Estas fontes não são necessariamente independentes e algumas das fontes de “a” a “i” podem contribuir para a fonte “j”. Naturalmente, um efeito sistemático desconhecido não pode ser levado em consideração na avaliação da incerteza do resultado de medição, porém contribui para seu erro.

2. PROCEDIMENTO DE AVALIAÇÃO DA INCERTEZA EM MEDIÇÕES DIRETAS

Para avaliar a incerteza de medição, tem-se as seguintes etapas (INMETRO, 1997):

- Determinar o modelo matemático que relaciona a grandeza de entrada com a saída
 $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$
- Identificar todas as correções a serem feitas ao resultado de medição.
- Listar componentes sistemáticos da incerteza associada a correções e tratar efeitos sistemáticos não corrigidos com parcelas de incerteza.
- Atribuir valores de incertezas e distribuição de probabilidades com base em conhecimentos experimentais práticos ou teóricos.
- Calcular a Incerteza Padrão (u_i) para cada componente de incerteza;
- Calcular a Incerteza Combinada (u_c) ou $u_c(y)$.
- Calcular a Incerteza Expandida (U).

A medição direta é aquela cuja indicação resulta naturalmente da aplicação do sistema de medição sobre o mensurando.

2.1. Identificação das Fontes de Incerteza

Cada fonte de incerteza deve ser claramente identificada. Recomenda-se o uso de termos simples e que evitem interpretações ambíguas. Se for conveniente, um símbolo pode ser associado à fonte de incertezas.

Recomenda-se também explicitar a unidade em que os valores relativos à fonte de incertezas serão expressos. Se esta unidade difere da unidade do mensurando, recomenda-se que seja também indicado o fator multiplicativo que converte o efeito da fonte de erro em termos de alteração da indicação do sistema de medição. Se esta relação não for linear, deve ser claramente apresentada no memorial de cálculo.

2.2. Estimativa dos Efeitos Sistemáticos

Devem ser quantificados os efeitos sistemáticos de cada fonte de incertezas. O desvio da grandeza de influência em relação ao seu valor ideal pode ser apresentado na sua unidade natural, mas a correção decorrente deste efeito sistemático sobre a indicação do sistema de medição deve ser convertida e apresentada na unidade do mensurando.

Opcionalmente, se as influências dos efeitos sistemáticos não são conhecidas, ou deliberadamente são desconsideradas, estas devem ser deixadas em branco.

2.3. Estimativa dos Efeitos Aleatórios

Cada fonte de erro influi de forma sistemática e aleatória sobre o erro de medição. Após compensar a parcela sistemática, restará ainda a parcela aleatória a ser considerada. Para quantificar a parcela aleatória é comum estimar experimentalmente sua dispersão por meio do desvio padrão.

A incerteza padrão de uma fonte de erro é a faixa de dispersão em torno do valor central equivalente a um desvio padrão. Ela deve ser estimada para cada fonte de erro envolvida. É importante fazer uma análise crítica do processo de medição para identificar as fontes significativas de erros e quantificar os valores correspondentes das respectivas incertezas padronizadas de cada componente. A análise do conjunto destas incertezas padrão levará à estimativa da incerteza combinada.

2.3.1 Avaliação da incerteza padrão tipo A

O procedimento tipo “A” para estimar a incerteza padrão baseia-se em parâmetros estatísticos, estimados a partir de valores de observações repetitivas do mensurando.

Seja q uma variável aleatória. Sejam q_k (para $k = 1, 2, \dots, n$) n valores independentemente obtidos para a variável q , sua média pode ser estimada por:

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad (1)$$

O desvio padrão experimental da variável q , representado por “ s ”, é estimado por:

$$s(q) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2}{n-1}} \quad (2)$$

Deve ser lembrado que, para que a estimativa de $s(q)$ pela Eq. (2) seja confiável, é necessário envolver um número suficientemente grande de observações independente (é recomendável pelo menos $n > 10$).

Quando é utilizado o valor médio das indicações, obtido a partir da média de um conjunto de “ m ” indicações de q , o desvio padrão experimental da média de q é estimado por:

$$s\left(\bar{q}\right) = \frac{s(q)}{\sqrt{m}} \quad (3)$$

Neste caso, a incerteza padrão associada à variável q , representada por $u(q)$, é estimada pelo desvio padrão da média das “ m ” observações efetuadas. Assim:

$$u(q) = s\left(\bar{q}\right) \quad (4)$$

Quando não são envolvidas médias de indicações, mas apenas um único valor da indicação, a incerteza padrão coincide com o desvio padrão experimental $s(q)$, que já deve Ter sido determinado previamente.

O número de graus de liberdade envolvidos (\mathbf{n}) na determinação $u(q)$ é dado pelo número de medições independentes efetuadas menos um, isto é:

$$\mathbf{n} = n - 1 \quad (5)$$

2.3.2 Avaliação da incerteza padrão tipo B

Nem sempre é possível ou economicamente viável quantificar a influência de certas fontes de incertezas em uma medição a partir da análise de observações repetitivas. Entretanto, ainda assim, é necessário estimar a influência de cada fonte de incertezas para estimar a incerteza combinada da medição. A determinação tipo “B” da incerteza padrão de uma fonte de incerteza é realizada por meios não estatísticos, a partir de informações conhecidas *a priori* que incluem medições anteriores, certificados de calibração, especificações do instrumento, de manuais técnicos e outros certificados e mesmo estimativas baseadas em conhecimentos e experiências anteriores do experimentalista.

A estimativa tipo “B” geralmente depende de grande experiência prática e pode ser tão confiável quanto a do tipo “A”.

2.3.3 Incerteza combinada

Além de estimar a influência individual de cada fonte de erro sobre o desempenho do processo de medição analisado, é necessário chegar a um único número que estime a incerteza combinada destas várias fontes de erro. Se as várias fontes de erro agem de forma independente, este número não pode ser obtido pela simples soma de cada incerteza. Aspectos estatísticos devem ser levados em conta.

Duas variáveis aleatórias são ditas estatisticamente independentes se suas variações se comportam de forma totalmente desvinculadas, isto é, não há nenhuma relação entre o crescimento de uma e o crescimento (ou decrescimento) da outra. Do ponto de vista estatístico estas variáveis são ditas não correlacionadas, e seu coeficiente de correlação é zero. É a situação mais comumente presente entre as fontes de erro em medições diretas.

Duas variáveis aleatórias são ditas estatisticamente dependentes se suas variações se dão de forma vinculadas, isto é, há uma relação nitidamente definida entre o crescimento de uma e o crescimento da outra de forma proporcional à primeira. Do ponto de vista estatístico estas variáveis são ditas correlacionadas, e seu coeficiente de correlação é positivo.

Há ainda o caso em que o crescimento da primeira está nitidamente atrelado ao decrescimento proporcional da segunda. Neste caso estas variáveis são ainda ditas correlacionadas, e seu coeficiente de correlação é negativo.

Difícilmente fontes de erros estatisticamente dependentes estão presentes em medições diretas.

Freqüentemente na medição direta os efeitos associados às várias fontes de incerteza se manifestam sobre a indicação do sistema de medição de forma aditiva. É como se houvesse uma soma dos efeitos de várias variáveis aleatórias. Assim, neste caso, a incerteza combinada (u_c) da influência das várias fontes de incerteza pode ser estimada a partir das incertezas padrão de cada fonte de erro por:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2} \quad (6)$$

É necessário que as incertezas padrão de cada fonte de erro sejam expressas na mesma unidade do mensurando.

A Equação (6) só é válida para estimar a incerteza combinada se todas as fontes de incerteza se combinem de forma aditiva e sejam mutuamente estatisticamente independentes.

A ação combinada dos efeitos sistemáticos pode ser estimada através da simples adição algébrica da correção atribuída a cada fonte de incertezas. Também neste caso a correção para cada fonte de erro deve estar expressa na mesma unidade do mensurando. Obtém-se assim a correção combinada (C_c) que, deverá ser considerada para o cálculo do resultado da medição.

2.3.4 Incerteza Expandida

A incerteza combinada, estimada através da Eq. (6), reflete a influência da ação combinada das várias fontes de erros considerados. O valor obtido representa uma faixa de valores em torno do valor médio, dentro do qual, com uma probabilidade estatisticamente definida, espera-se encontrar o erro de medição. Tipicamente u_c corresponde a uma probabilidade de enquadramento em torno de 68% e apresenta distribuição normal.

Na engenharia é comum o trabalho com níveis da confiança de 95%. Para atingir aproximadamente 95%, u_c deve ser multiplicado por um coeficiente numérico denominado de fator de abrangência (o fator de Student), calculando-se a denominada *incerteza expandida* (U).

Assim:

$$U = k \cdot u_c \quad (7)$$

O número de graus de liberdade efetivos (n_{ef}) através da equação de Welch-Satterthwaite:

$$n_{ef} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4}{n_i}} \quad (8)$$

Onde:

u_c é a incerteza combinada;

u_i é a incerteza padrão associada à i -ésima fonte de incerteza;

n_i é o número de graus de liberdade associado à i -ésima fonte de incerteza;

N é o número total de fontes de incertezas analisadas.

Da aplicação da Eq. (8) resulta o número de graus de liberdade efetivo. O valor de “ k ” para nível de confiança de 95,45% pode então ser obtido da Tab. (1).

Tabela 1. Fator de abrangência em função do número de graus de liberdade

u_{ef}	1	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14	16
k	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,28	2,23	2,20	2,17
u_{ef}	18	20	25	30	35	40	45	50	60	80	100	∞
k	2,15	2,13	2,11	2,09	2,07	2,06	2,06	2,05	2,04	2,03	2,02	2,00

Para valores fracionários de n_{ef} , interpolação linear pode ser usada se $n_{ef} > 3$.

Alternativamente o valor de k corresponde ao valor de n_{ef} imediatamente inferior na tabela pode ser adotado.

Assim, finalmente a incerteza expandida pode ser calculada por:

$$U_{95\%} = k \cdot u_c \quad (9)$$

3. AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO NA METROLOGIA DIMENSIONAL

Em metrologia dimensional, as principais fontes de erros e incerteza na medição são:

- influências externas: o mais crítico, de modo geral, é a variação da temperatura ambiente, embora outras grandezas como vibrações mecânicas, variações atmosférica, umidade ou tensão da rede, também possam trazer alguma influência;
- variação da temperatura ambiente: provoca dilatação das escalas dos instrumentos de medição, da mesma forma age sobre o mensurando, modificando o comprimento da peça a medir, provoca instabilidade interna dos sistemas elétricos de medição;
- existência de atrito, folgas, imperfeições construtivas e o comportamento não ideal de elementos físicos são outros exemplos de perturbação interna;
- modificação indevida do mensurando pela ação do sistema de medição, ou do operador, força de medição aplicada no mensurando, por exemplo;
- modificação do mensurando por outros módulos da cadeia de medição, acontece, por exemplo na conexão indevida de dispositivos registradores;
- erros do operador: erros de interpolação na leitura, erros inerentes ao manuseio ou à aplicação irregular do sistema de medição.

Na calibração, as fontes de erros e incerteza mais comuns na metrologia dimensional são:

- incerteza do sistema de medição ou padrão de referência;
- incertezas associadas com a diferença de temperaturas entre o sistema de medição ou padrão de referência e sistema de medição à calibrar;
- estabilidade do sistema de medição/padrão em função do tempo (grau de utilização / agressividade do meio);
- resolução do sistema de medição;
- deformação elástica do sistema de medição ou padrão de referência e sistema de medição à calibrar;
- erros de cosseno, devido ao desalinhamento entre padrão e o eixo de medição do sistema de medição;
- erros na geometria do padrão e do sistema de medição: planeza e esfericidade de sensores, retilinearidade, planeza, paralelismo ou perpendicularidade de dispositivos auxiliares, circularidade em padrões cilíndricos e padrões de referência.

4. AVALIAÇÃO DE INCERTEZA EM MEDIÇÃO DIRETA – CALIBRAÇÃO DO ERRO DE INDICAÇÃO DE UMA MÁQUINA DE MEDIR UNIVERSAL COM BLOCOS PADRÃO

4.1. Características da Máquina de Medir Universal

Máquina de medir universal Carl Zeiss

Faixa de medição: 0 – 100 mm

Resolução: 0,1 μ m

4.2. Identificação das Fontes de Incerteza

- Incerteza do bloco padrão (*IBP*);
- Estabilidade do bloco padrão em função do tempo ou deriva(*EP*);
- Erro devido ao contato não central nas faces de medição do bloco (*EC*);
- Arredondamento devido à resolução da máquina de medir(*IR*);
- Influência da temperatura ambiente ($I\Delta\bar{t}$);
- Influência da diferença de temperatura entre o bloco e a escala da máquina (*Idt*);
- Influência do erro de alinhamento dos sensores da máquina (*IAS*);
- Influência do erro de alinhamento do bloco padrão em relação à escala (*IA_{BP}*);
- Deformação devido à força de medição (*IFM*);
- Incerteza tipo A (*UA*).

4.3. Estimativas dos Efeitos Sistemáticos

Como efeito sistemático, considera-se para correção somente o erro do meio do bloco padrão. A temperatura média é estimada em 20,0 °C e a diferença de temperatura entre o bloco e a escala da máquina é em média 0° C, então, não existe correção a ser feita em função da temperatura e as incertezas dessas temperaturas contribuem para a incerteza do tipo B.

4.4. Estimativas dos Efeitos Aleatórios

a) Incerteza dos blocos padrão (*IBP*) - Avaliação tipo B

Do certificados de calibração dos blocos padrão tem-se $IBP = U_{95\%} = 0,08 \text{ mm}$, para um fator de abrangência $k=2$ (nível de confiança de 95% e graus de liberdade estimado $n_{ef} = \infty$).

A incerteza padrão correspondente é igual a $U_{95\%} / k = 0,08 / 2 = 0,04 \text{ mm} = u_1$.

b) Estabilidade dos padrões em função do tempo (*EP*) - Avaliação tipo B

Supondo que o tempo transcorrido desde a calibração seja de 3 meses, pode-se considerar que as características dos padrões tenham se degradado de forma desprezível. A incerteza padrão correspondente (u_2) será considerada igual a zero.

c) Erro devido ao contato não central nas faces de medição do bloco (*EC*) - Avaliação tipo B

Para um bloco padrão classe 0, a variação de comprimento admitida é de 0,12 mm. Admitindo também que essa variação ocorra de maneira linear ao longo do menor lado da face do bloco que é de 9 mm. O ponto de contato ocorrendo dentro de uma circunferência de raio 0,5 mm em torno do centro da face do bloco, implica em um erro de até 7 nm no comprimento, assumindo ainda uma distribuição retangular. A incerteza padrão correspondente é igual a $0,007 / \sqrt{3} = 0,004 \text{ mm} = u_3$.

d) Arredondamento devido à resolução da máquina de medir (*IR*) - Avaliação tipo B

A resolução do indicador introduz uma componente adicional de erro devido ao arredondamento numérico. Seu efeito é de natureza aleatória e pode ser quantificado através dos limites máximos possíveis. O máximo erro de arredondamento corresponde a metade do valor da resolução, segundo uma distribuição retangular.

A resolução é de 0,1 mm. A incerteza devido a resolução corresponde à metade da resolução, portanto $IR = 0,05 \text{ mm}$. Considerando uma distribuição retangular, a incerteza padrão correspondente é $0,5 / \sqrt{3} = 0,289 \text{ mm} = u_4$.

e) Influência da temperatura ambiente ($I\Delta\bar{t}$) - Avaliação tipo B

Antes da calibração, é necessário cuidado para que o bloco e a máquina se estabilizem à temperatura do laboratório. A diferença entre a temperatura do bloco e da máquina é assumida como sendo de $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$. A diferença entre a temperatura média do bloco e da máquina e a temperatura de referência é estimada em $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$, considerando a variação de temperatura durante as medições e a incerteza na medição da temperatura.

A variação de comprimento devido à diferença entre a temperatura média da máquina e do bloco e a temperatura de referência é calculada a partir de :

$$\Delta L = L d_a \Delta \bar{t} \quad (10)$$

Onde:

ΔL é a variação do comprimento devido a temperatura;

L é o comprimento medido;

d_a é a diferença entre os coeficientes de dilatação térmica do bloco padrão e da máquina, que tem distribuição triangular com média $3,7 \text{ } \mu\text{m}/(\text{m}^\circ\text{C})$ e incerteza padrão $u(d_a) = 1/\sqrt{6} \text{ } \mu\text{m}/(\text{m}^\circ\text{C})$.

Δt é a diferença de temperatura em relação à temperatura de referência ($20,0^\circ \text{C}$), que tem distribuição retangular entre $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ e incerteza padrão $u(\Delta \bar{t}) = 0,5/\sqrt{3}$.

O efeito combinado da distribuição triangular dos coeficientes, com a distribuição retangular da temperatura, no comprimento medido, resulta em uma incerteza padrão que pode ser calculada por:

$$u_5 = L \sqrt{d_a^2 u(\Delta \bar{t})^2 + \Delta t^2 u(d_a)^2 + u(\Delta \bar{t})^2 u(d_a)^2} \quad (11)$$

$$u_5 = 0,050 \sqrt{3,7^2 (0,5/\sqrt{3})^2 + 0^2 (1,0/\sqrt{6})^2 + (0,5/\sqrt{3})^2 (1,0/\sqrt{6})^2} = 0,054 \text{ mm} \quad (12)$$

Observando que para essa incerteza combinada, em que a diferença média da temperatura é igual a zero, o terceiro termo que aparece na Eq. (11) deve ser considerado. Em outras situações, onde os valores médios dos parâmetros são diferentes de zero, esse termo é pouco significativo e usualmente é desconsiderado.

f) Influência da diferença de temperatura entre bloco e escala da máquina (IdT) - Avaliação tipo B

A variação de comprimento entre o bloco padrão e a escala da máquina devido a diferença de temperatura entre ambos (estimada com distribuição retangular entre $\pm 0,1$ °C). Pode ser calculada a partir de:

$$Idt = L\bar{a}dt \quad (13)$$

Onde:

L é o comprimento do bloco;

\bar{a} é a média dos coeficientes de dilatação (bloco e escala da máquina);

dt é a estimativa da diferença de temperatura entre o bloco e a escala da máquina.

A incerteza padrão correspondente é obtida por:

$$u_6 = L\bar{a} \frac{dt}{\sqrt{3}} \quad (14)$$

$$u_6 = 0,050 \cdot \frac{(11,5 + 7,8)}{2} \frac{0,1}{\sqrt{3}} = 0,029 \text{ mm} \quad (15)$$

g) Influência do erro de alinhamento dos sensores da máquina (IA_S) - Avaliação tipo B

Estimando que o erro de alinhamento dos sensores da máquina provoquem um erro na indicação do comprimento de no máximo $0,1 \mu\text{m}$, com distribuição retangular. A incerteza padrão correspondente é de $0,058 \mu\text{m} = u_7$.

h) Influência do erro de alinhamento do bloco padrão em relação à escala (IA_{BP}) - Avaliação tipo B

Estimando que o erro na medição de comprimento devido ao erro de alinhamento do bloco em relação à direção da escala da máquina (erro de coseno), seja de no máximo $0,1 \mu\text{m}$, com distribuição retangular. A incerteza padrão correspondente é de $0,058 \mu\text{m} = u_8$.

i) Deformação devido à força de medição- Avaliação tipo B

A incerteza pode ser avaliada pela equação:

$$IFM = \frac{\Delta F \cdot L}{A \cdot E} = 0,0018 \mu\text{m} \quad (16)$$

Onde:

IFM é a variação de comprimento devido à força

ΔF é a variação máxima da força de medição = $2,4 \text{ N}$

L é o comprimento do bloco padrão ($L = 50 \text{ mm}$)

A é a área da seção transversal do bloco padrão ($A = 315 \text{ mm}^2$)

E é o módulo de elasticidade do aço ($E = 210000 \text{ N/mm}^2$)

Como a incerteza devido a força de medição é significativamente menor que as outras, sua influência será desprezada.

j) Dispersão das leituras - Avaliação tipo A (IL)

Foram efetuadas 5 leituras, são elas: 50,0004 mm; 50,0006 mm; 50,0006 mm; 50,0006 mm e 50,0007 mm.

O comportamento das leituras é tipicamente aleatório. A incerteza Tipo A é avaliada pelo cálculo do desvio padrão da média.

A média é estimada pela Equação (1) e é igual a $\bar{q} = 50,00058$ mm

O desvio padrão experimental da variável q pela é calculado pela Eq. (2) e a incerteza padrão pela Eq. (3) e Eq. (4).

O desvio padrão na calibração da máquina é 0,110 μm , portanto:

$$u_g = \frac{s}{\sqrt{n}} = 0,049 \text{ mm} \quad (17)$$

4.5. Incerteza Combinada

A incerteza combinada é diretamente estimada através da aplicação da Eq. (6):

Para 50,000 mm:

$$uc = \sqrt{0,04^2 + 0,004^2 + 0,0289^2 + 0,054^2 + 0,029^2 + 0,058^2 + 0,058^2 + 0,049^2} = 0,124 \text{ mm} \quad (18)$$

4.6. Incerteza Expandida

A incerteza expandida é dada pela equação (7): $U_{95\%} = k \cdot uc$

O número de graus de liberdade efetivo (n_{ef}), calculado a partir a partir da Eq. (8), fica:

$$n_{ef} = \frac{0,124^4}{\frac{0,04^4}{\infty} + \frac{0,004^4}{\infty} + \frac{0,0289^4}{\infty} + \frac{0,054^4}{\infty} + \frac{0,029^4}{\infty} + \frac{0,058^4}{\infty} + \frac{0,058^4}{\infty} + \frac{0,049^4}{4}} = 41 \quad (19)$$

Com o número de graus de liberdade obtém - se o valor de $k = 2,06$

Portanto: $U_{95\%} = 2,06 \cdot 0,124 = 0,256$ mm.

$U_{95\%} = 0,26$ mm

A incerteza na calibração do erro de indicação da máquina de medir universal para o ponto 50 mm é de 0,26 μm para um fator de abrangência de 2,06 e nível de confiança de aproximadamente 95%.

O erro sistemático ou tendência da máquina de medir universal, para esse ponto, é de 0,7 μm .

5. CONCLUSÃO

O procedimento de cálculo de incerteza de medição apresentado, baseado em procedimentos internacionalmente reconhecidos para estimar, com níveis de confiabilidade preestabelecidos, a incerteza de medições diretas, leva em conta diversos fatores que influenciam significativamente o seu valor. Com a implementação desse procedimento, o conhecimento da qualidade do resultado da calibração é obtido através da incerteza calculada e a seleção/aplicação do sistema de medição pode ser determinada com base em critérios recomendados mundialmente e que necessitam dessas estimativas.

6. REFERÊNCIAS

- EA – EUROPEAN CO-OPERATION FOR ACCREDITATION, EA-4/02, 1999, Expressions of the Uncertainty of Measurements in Calibration (*antiga EAL-R2*), Holanda.
- INMETRO, 1997, "Guia para Expressão da Incerteza de Medição" – Primeira Edição Brasileira do Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (ISO-GUM), Brasil.
- KESSEL, W., 1997, "Uncertainty of Measurements: Statement of Physical Ignorance", Advanced School of Metrology: Evaluation of Uncertainty in Measurement, Programa RH-Metrologia, Brasil.
- MATHIESEN, O., 1997, "Uncertainty of Measurement - understanding the GUM", Advanced School of Metrology: Evaluation of Uncertainty in Measurement, Programa RH-Metrologia, Brasil, 1997.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no trabalho.

THE EVALUATION OF MEASUREMENT UNCERTAINTY IN THE UNIVERSAL MEASURE MACHINE CALIBRATION

Prof. José Leonardo Noronha

Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Departamento de Produção
Av. BPS, 1303 - 37500-903 - Itajubá / MG, Brazil, e-mail: jln@iem.efei.br

Prof. Luiz Fernando Barca

Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Departamento de Produção
e-mail: barca@iem.efei.br

***Abstract.** Reporting a measurement result of physical quantities requires a quantitative indication of its quality. This indication will ensure that users can assess its reliability. Otherwise measurement results cannot be compared, either to themselves or to reference values in a specification or standard. It is, therefore, necessary that there be a readily implemented, easily understood and generally accepted procedure to characterize the quality of the result. This paper describes an evaluation procedure to calibration measuring uncertainty. The procedure follows the Guide to the expression of uncertainty in measurement (ISO-GUM), which establishes general rules for evaluating and expressing uncertainty in measurement that is to be applicable to a broad spectrum of instruments.*

Keywords. measurement uncertainty, metrology, calibration.