

# **CONTROLE DA QUALIDADE DE PADRÕES ESCALONADOS UTILIZADOS NA VERIFICAÇÃO DE MÁQUINAS DE MEDIR POR COORDENADAS**

**José Carlos Valente de Oliveira**

Aluno do mestrado profissional em Sistemas de Gestão da Universidade Federal Fluminense e  
Coordenador Técnico do Laboratório de Metrologia Dimensional do Instituto Nacional de  
Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial  
jcoliveira@inmetro.gov.br

**João Antônio Pires Alves, M.Sc.**

Técnico do Laboratório de Metrologia Dimensional do Instituto Nacional de Metrologia,  
Normalização e Qualidade Industrial  
jaalves@inmetro.gov.br

**Oswaldo Luis Gonçalves Quelhas, D.Sc.**

Coordenador do LATEC da Universidade Federal Fluminense  
quelhas@latec.uff.br

## **Resumo**

Neste trabalho é demonstrada a capacidade do Laboratório de Metrologia Dimensional (LAMIN), do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO) para calibrar padrões escalonados, que por sua vez servem para verificar máquinas de medir por coordenadas (MMCs), largamente utilizadas no parque industrial brasileiro no controle dimensional de peças fabricadas. São feitas considerações a respeito do sistema de medição utilizado, da metodologia de calibração adotada e da determinação da incerteza de medição dos resultados obtidos. A confiabilidade do método de calibração é evidenciada por meio de uma comparação interlaboratorial realizada com o Laboratoire National d'Essais (LNE), instituto nacional de metrologia da França.

**Palavras-chave:** controle da qualidade, incerteza de medição, confiabilidade do método, comparação interlaboratorial

## **1. Introdução**

Padrões escalonados são medidas materializadas que objetivam estabelecer comprimentos de referência na verificação de MMCs. A partir de um padrão escalonado devidamente calibrado pode-se determinar os erros de medição de comprimento nos três eixos de uma MMC e, conseqüentemente, determinar seus efeitos sobre resultados de medição obtidos nessa máquina.

Devido às rigorosas exigências metrológicas no controle dimensional de peças fabricadas que, conseqüentemente, requerem o uso de MMC's, torna-se necessário que as mesmas sejam periodicamente verificadas com a utilização de padrões escalonados, calibrados com uma alta exatidão, isto é, com uma baixa incerteza de medição.

Para atender à demanda de laboratórios credenciados pelo INMETRO, pertencentes à Rede Brasileira de Calibração (RBC), assim como de laboratórios industriais possuidores de padrões escalonados, o LAMIN utiliza um sistema de medição composto por uma MMC, modelo UMM-500, do fabricante "Carl Zeiss" e um laser interferométrico para medição linear, modelo 5528A, do fabricante "Hewlett Packard". A metodologia de calibração adotada, que assegura a obtenção de resultados com a exatidão requerida, é descrita a seguir. Posteriormente, é discutida a determinação da incerteza de medição de resultados, obtida a partir do modelo matemático representativo do experimento. Por último, são mostrados os resultados de uma comparação entre o LAMIN / INMETRO e o laboratório de metrologia dimensional do LNE, envolvendo um padrão escalonado de 820mm de comprimento máximo, com escalonamentos de 20mm, do fabricante "Kolb & Baumann – KOB", de aço (coeficiente de dilatação térmica " $\alpha$ "=11,5.10<sup>-6</sup>K<sup>-1</sup>).

## **2. Metodologia para calibração de padrões escalonados**

O sistema laser interferométrico de medição linear está acoplado à máquina de medir por coordenadas. O laser, que substitui a escala da própria máquina registrando seu movimento na direção X, está interfaceado com um computador pessoal. Sensores devidamente calibrados são utilizados no monitoramento da pressão, da temperatura do ar no ambiente da medição e da temperatura do padrão, principais grandezas de influência.

Apoia-se o padrão escalonado sobre a mesa da MMC, alinhando-o, em seguida, da melhor maneira possível em relação à direção X. Programa-se a máquina por comando numérico de modo que seu sensor toque, no centro, de todas as superfícies de medição do

padrão a calibrar. Para executar a calibração desloca-se automaticamente o sensor de modo que este toque, inicialmente, a superfície correspondente à posição "zero" do padrão (posição de referência) e a seguir, as demais superfícies. No instante da aplicação da carga de medição (sensor tocando as superfícies do padrão), os valores dessas posições medidas pelo laser interferométrico são registrados e corrigidos automaticamente, considerando-se os valores das grandezas de influência no instante da medição.

Com o padrão sendo tocado ao longo da direção X da máquina, em todas as suas superfícies de medição e considerando-se o diâmetro do sensor, chega-se aos valores medidos e corrigidos, correspondentes a todas as distâncias dessas superfícies em relação à posição de referência.

Devido à limitação da faixa de medição da MMC, na direção X, padrões com comprimentos acima de 420mm são calibrados por partes, deslocando-os sobre a mesa da máquina ou girando-os 180°, após a medição do trecho inicial (0 a 420mm).

Utiliza-se, para captação, correção e pós-processamento dos dados, um programa computacional desenvolvido no próprio laboratório. Os critérios para correção do comprimento de onda do laser interferométrico são baseados na “equação de Edlén” [3]. Durante todo o processo de medição considera-se o “princípio de Abbe”, que estabelece como condição ideal, a coincidência do eixo de medição do padrão a calibrar (padrão escalonado) com o do sistema de medição (laser interferométrico e MMC). As medições são realizadas para temperatura do padrão na faixa de  $(20 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ . A umidade relativa é mantida na faixa de  $(60 \pm 10)\%$ .

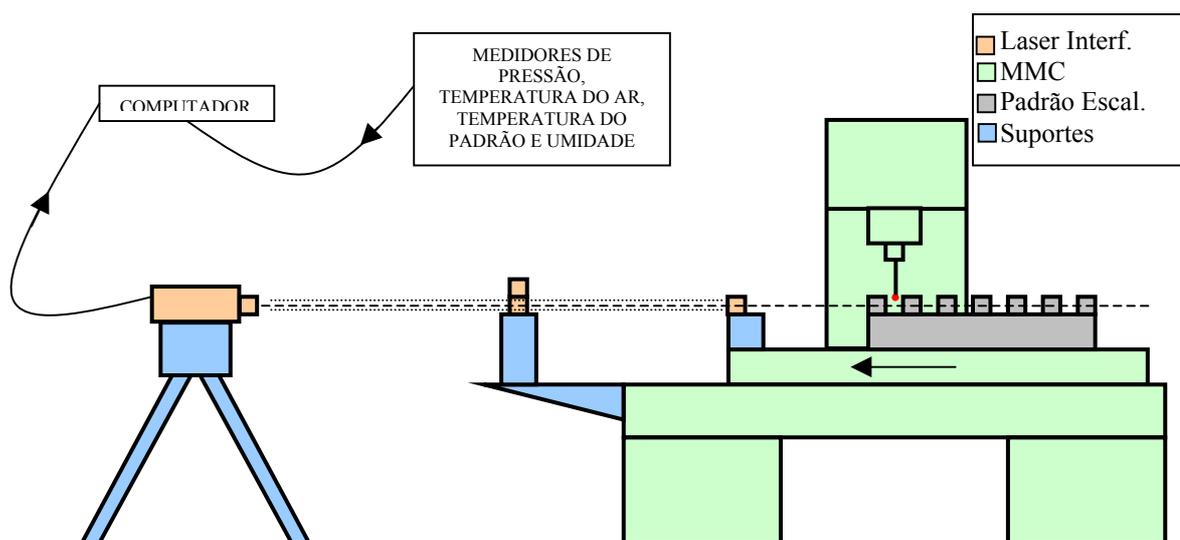


Figura 1- Sistema de medição utilizado na calibração de padrões escalonados (Oliveira, Alves & Quelhas, 2002)

### 3. Modelo matemático do experimento e incerteza de medição dos resultados

O modelo matemático representativo do experimento em questão é dado pela seguinte equação (Oliveira, Alves & Quelhas, 2002):

$$L_f = \frac{n_r \cdot L}{n} - L_n \cdot \alpha_p \cdot (T_p - T_r) - d - d_n \cdot \alpha_s \cdot (T_s - T_r) - E_{al} - F_l - R \quad (1)$$

onde

$L_f$  – Comprimento corrigido [mm]

$L$  – Distância não corrigida obtida no laser [mm]

$L_n$  – Comprimento nominal [mm]

$d$  – Diâmetro do apalpador [mm]

$d_n$  – Diâmetro nominal do apalpador [mm]

$E_{al}$  – Erro de alinhamento [mm]

$F_l$  – Erro devido à flutuação da indicação digital do laser [mm]

$R$  – Reprodutibilidade das medições [mm]

$T_p$  – Temperatura do padrão escalonado [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$\alpha_p$  – Coeficiente de expansão térmica do material do padrão escalonado [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]

$T_s$  – Temperatura do sensor da MMC [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$\alpha_s$  – Coeficiente de expansão térmica do material do sensor da MMC [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]

$T_r$  – Temperatura de referência [ $20^{\circ}\text{C}$ ]

$n_r$  – Índice de refração do ar nas condições de referência

$n$  – Índice de refração do ar nas condições de medição

A correção do diâmetro do sensor da MMC, devido à sua diferença de temperatura em relação à de referência, é desprezível porque a medição é realizada em temperatura próxima a  $20^{\circ}\text{C}$  e o diâmetro do sensor é de apenas 5mm (valor nominal). Com isto, a equação pode ser reduzida à seguinte forma:

$$L_f = \frac{n_r \cdot L}{n} \cdot \frac{1}{1 + \alpha_p(T_p - T_r)} - d - E_{al} - F_l - R \quad (2)$$

“n”, segundo a equação de Edlén, é dado por:

$$n = K_{\lambda} \cdot D_{tp} - u_a \cdot [3,8020 - 0,0384 \cdot (1/\lambda)^2] \cdot 10^{-10} + 1 \quad (3)$$

onde

$K_{\lambda}$  – Fator de dispersão dependente do comprimento de onda do laser

$D_{tp}$  – fator de densidade dependente da temperatura do ar e da pressão

$\lambda$  – Comprimento de onda do laser no vácuo [ $\mu\text{m}$ ]

Em consequência de tal modelo, a incerteza de medição para padrões escalonados, calculada com base no documento ISO GUM [4], leva em conta as seguintes componentes:

- a) Repetitividade das medições dos comprimentos  $L$  baseada no desvio-padrão do valor médio do número de ciclos de medição realizados.
- b) Estimativa do intervalo em que poderia estar contido um possível erro de alinhamento do laser interferométrico e do padrão escalonado.
- c) Estimativa do intervalo em que poderia ocorrer uma flutuação na indicação digital do laser.
- d) Incerteza no coeficiente de expansão térmica do material do padrão escalonado.
- e) Incertezas nas medições de temperatura do padrão escalonado e do ar.
- f) Estimativas dos intervalos em que poderiam ocorrer, durante a calibração, flutuações de temperatura do padrão escalonado e do ar.
- g) Incerteza na medição da pressão no ambiente da calibração.
- h) Incerteza do diâmetro do sensor da MMC.
- i) Incerteza do comprimento de onda do laser interferométrico.
- j) Possível diferença de resultados em condições de reprodutibilidade.

Com isso, chega-se à seguinte expressão representativa da incerteza expandida de medição na calibração de padrões escalonados com comprimento máximo de 420mm, para um nível de confiança de 95% (fator de abrangência “k=2”).

$$U = \sqrt{0,4^2 + (1,2 \cdot 10^{-3} \cdot L_n)^2} \mu m \quad (4)$$

onde " $L_n$ " é o comprimento nominal em mm.

Devido à impossibilidade da medição direta, para comprimentos acima de 420mm a incerteza é expressa por:

$$U = 0,64 + \sqrt{0,4^2 + [1,2 \cdot 10^{-3} \cdot (L_n - 420)]^2} \mu m \quad (5)$$

onde  $0,64\mu m$  corresponde à incerteza para o comprimento de 420mm.

#### 4. Resultados da comparação interlaboratorial

O gráfico da figura 2 abaixo apresenta os desvios dos resultados do LNE e respectivas incertezas expandidas de medição para um nível de confiança de 95% (fator de abrangência “k=2”) em relação aos resultados do LAMIN / INMETRO. Pode-se notar a compatibilidade entre os dois laboratórios, tendo em vista que a linha neutra (desvio 0µm), representativa dos resultados do LAMIN / INMETRO, está contida, ao longo de todo o trecho calibrado, nos intervalos correspondentes aos resultados e respectivas incertezas do LNE.

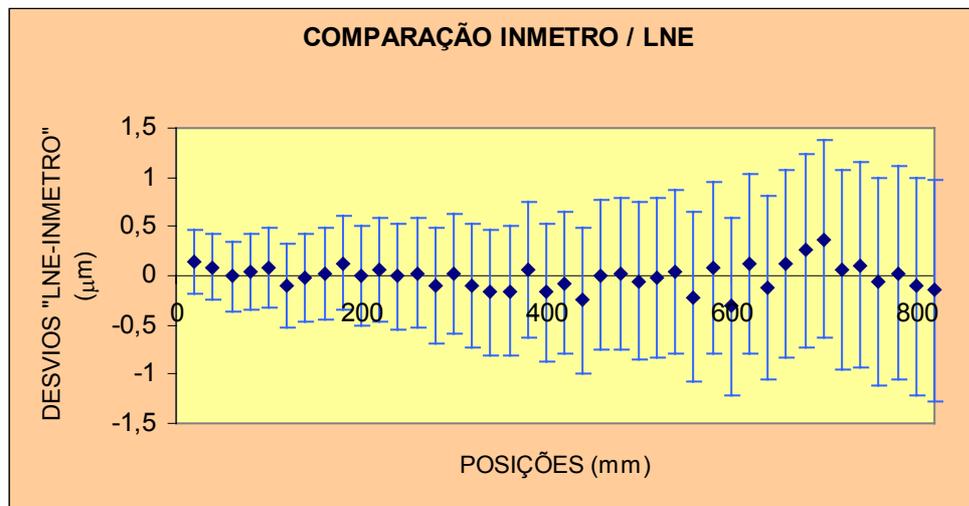


Figura 2 – Desvios dos resultados do LNE em relação aos do LAMIN / INMETRO (Oliveira, Alves & Quelhas, 2002)

Outra forma de análise de comparações laboratoriais, e a usualmente adotada por organismos credenciadores de laboratórios de ensaio e calibração [7], é aqui também apresentada. Trata-se da determinação do valor do erro normalizado ( $E_n$ ) para todos os pontos calibrados.

“ $E_n$ ” é dado pela seguinte expressão:

$$E_n = \frac{|R_1 - R_2|}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2}} \quad (6)$$

onde

$R_1$  – Resultado do LNE

$R_2$  – Resultado do LAMIN / INMETRO

$U_1$  – Incerteza expandida de medição do LNE

$U_2$  – Incerteza expandida de medição do LAMIN / INMETRO

Caso os valores obtidos de “ $E_n$ ” sejam menores ou iguais a 1, os resultados dos laboratórios são considerados compatíveis. Do contrário, isto é, caso sejam maiores do que 1, os resultados são tidos como incompatíveis.

Na comparação em questão, o valor máximo de “ $E_n$ ” obtido foi de 0,27, na posição 20mm, para um desvio de 0,14 $\mu$ m entre LNE e LAMIN / INMETRO. Na posição 700mm ocorreu o desvio máximo de 0,37 $\mu$ m entre os laboratórios, mas como para esse comprimento, as incertezas de ambos são maiores, o valor de “ $E_n$ ” foi de 0,24.

## 7. Conclusões

- 1) Foi evidenciada total compatibilidade entre os resultados dos laboratórios do LNE e LAMIN / INMETRO, tanto pela análise gráfica apresentada, quanto pelos valores de “ $E_n$ ” obtidos.
- 2) O sistema utilizado na medição de comprimentos mostra-se bastante satisfatório, pois obtém-se incertezas coerentes com a exatidão requerida na calibração de padrões escalonados, como aquele utilizado na comparação entre os laboratórios.
- 3) Cuidados básicos como manter a temperatura de medição em  $(20 \pm 0,5)^\circ\text{C}$  e estável, calibrar o diâmetro do apalpador da máquina de medir por coordenadas com a menor incerteza possível, alinhar da melhor maneira o padrão escalonado e o laser interferométrico para medição linear em relação ao eixo X de deslocamento da mesa da máquina, assim como montar este último de forma estável, são fatores imprescindíveis para a obtenção de reduzidas incertezas de medição com este sistema.

## 8. Referências bibliográficas

- 1- “An updated Edlén equation for the refractive index of air” – K. P. Birch and M. J. Downs – Metrologia 1993, 30, 155 – 162
- 2- “Correction to the updated Edlén equation for the refractive index of air” – K. P. Birch and M. J. Downs – Metrologia 1994, 31, 315 – 316
- 3- “Measurement of the refractive index of air and comparison with modified Edlén’s formulae” – G. Bönsch and E. Potulski – Metrologia 1998, 35, 133 - 139

- 4- “Guia para expressão da incerteza de medição” – Segunda edição brasileira - agosto de 1998 – INMETRO/ ABNT/ SBM/ RH Metrologia
- 5- “INMETRO’s performance in calibration of ball bars” – J. C. Valente de Oliveira and J. A. Pires Alves – XIV Congresso Mundial (IMEKO’97) – Finlândia – junho de 1997
- 6- “Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia” – Portaria 029, de 10 de março de 1995 – INMETRO
- 7- "Orientações para a organização de comparações interlaboratoriais pelas comissões técnicas da RBC" – DOQ-DIMCI-005 (Rev. 00), de 08/99 – INMETRO