

AVALIAÇÃO DA INCERTEZA NA CALIBRAÇÃO DE PADRÃO ESCALONADO EM MÁQUINAS DE MEDIR POR COORDENADAS – MÉTODO DA COMPARAÇÃO

José Leonardo Noronha¹

Carlos Alberto Schneider²

Alexandre Becker de Barros³

¹ Prof. EFEI, Doutorando UFSC, ² Prof. Doutor em Engenharia, ³ Eng. Mecânico.

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Departamento de Engenharia Mecânica,
Laboratório de Metrologia e Automação LABMETRO, 88040-970, Florianópolis, SC, Brasil.
E-mail: ¹ jln@labmetro.ufsc.br ² cas@certi.ufsc.br

Resumo

As Máquinas de Medir por Coordenadas – CMMs são largamente utilizadas na verificação dimensional de peças, sendo que as CMMs laboratoriais com baixas incertezas de medição podem ser utilizadas também como padrões ou meios para calibração de medidas materializadas e instrumentos de medição. Os padrões escalonados são medidas materializadas, sendo referências para a medição de peças e para a calibração de alguns instrumentos de medição. A sua calibração é realizada normalmente através de métodos convencionais, nem sempre flexíveis e rápidos. Nas CMMs esta calibração pode ser realizada de forma flexível e com um menor custo, através do método da comparação ou substituição, tendo como referência blocos padrão calibrados. Neste artigo, são apresentadas as fontes de incertezas, o procedimento e a avaliação da incerteza na calibração de um padrão escalonado através do método da comparação, utilizando a Máquina de Medir por Coordenadas como meio e blocos padrão como referência para calibração. Os resultados mostraram que as incertezas de medição obtidas na calibração são admissíveis para este tipo de padrão escalonado, com vantagens operacionais significativas em relação aos métodos convencionais.

Palavras-chave: Incerteza de Medição, Máquinas de Medir por Coordenadas, Padrão Escalonado, Calibração.

1. INTRODUÇÃO

Existem diversos tipos de padrões escalonados com diferentes faixas de medição e erros admissíveis os quais são utilizados nas indústrias na verificação de máquinas ferramentas e máquinas de medir por coordenadas, nas medições diretas ou por comparação de alturas e nas calibrações de medidores internos com relógio, de micrômetros internos, de micrômetros de profundidade, de paquímetros e traçadores de altura.

Nas normas que tratam de requisitos de sistemas da qualidade (NBR ISO 9001, NBR ISO 9002, NBR ISO 9003, NBR ISO 9004, 1994, QS-9000, 1998) o controle de sistemas de medição é um importante elemento do sistema de garantia da qualidade. Como exigência das normas, deve-se estabelecer e manter um sistema efetivo para o controle e calibração dos

padrões e sistemas de medição utilizados para demonstrar a conformidade do produto com os requisitos especificados.

Em alguns métodos os padrões escalonados podem ser calibrados, utilizando:

- comparador eletrônico e blocos padrão (fig. 1.a);
- comparador eletrônico e laser interferométrico (fig. 1.b);
- CMM e laser interferométrico (Valente de Oliveira e Pires Alves, 1997).

Nestes métodos os tempos de preparação e execução são relativamente altos (em torno de 3 horas), devido à montagem, limpeza e posicionamento dos blocos padrão e alinhamento do laser, conseqüentemente aumentando os custos de calibração. Os métodos da comparação utilizando CMM CNC laboratoriais e blocos padrão e o da CMM Virtual (Trapet, 1997, Abackerli e Cauchick Miguel, 1997, PTB et al, 1998) estão sendo pesquisados para calibração, por terem apresentados vantagens em relação à flexibilidade e tempos de preparação e avaliação da incerteza de medição.

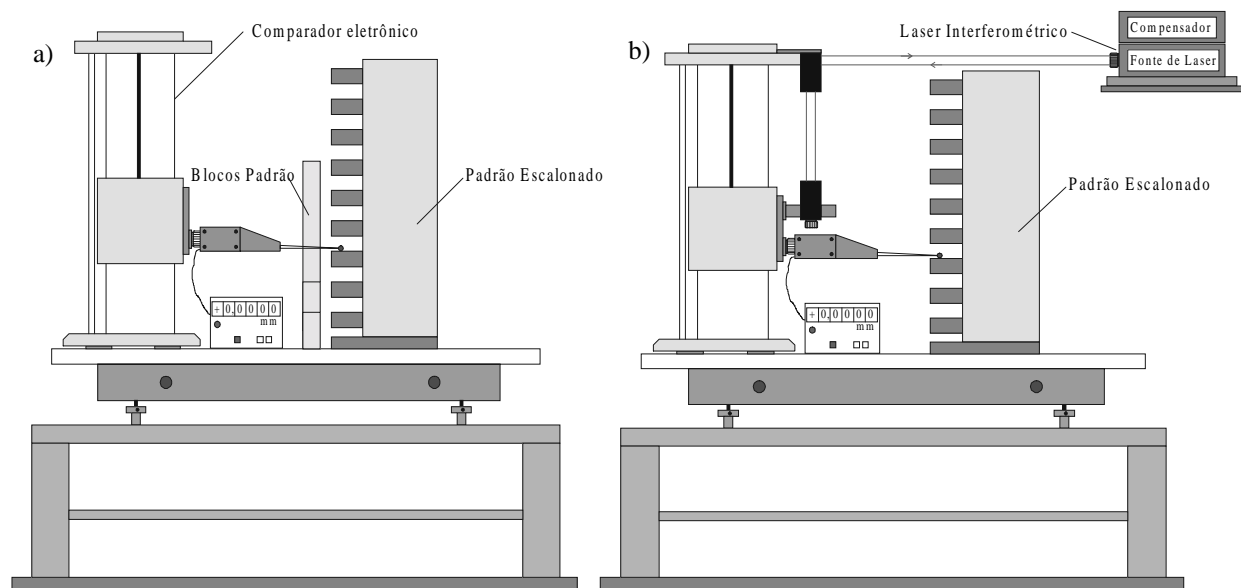


Figura 1 - Calibração de padrão escalonado utilizando comparador eletrônico e tendo como padrão: a) blocos padrão b) laser interferométrico (Link, 1997)

A incerteza de medição é o parâmetro básico para validação do método de calibração e a sua avaliação é complexa. Não existe uma forma única de se chegar à incerteza de medição nas calibrações. Uma proposta de padronização está contida no documento da ISO (ISO, 1993) e será utilizada como referência para a avaliação da incerteza.

Neste trabalho são apresentados o procedimento de calibração utilizando a CMM, o procedimento de avaliação da incerteza de medição, aplicação prática e análise dos resultados, mostrando a viabilidade de se utilizar a CMM na calibração de padrões escalonados.

2. METODOLOGIA DE CALIBRAÇÃO DE PADRÕES ESCALONADOS NA CMM

O método da comparação utilizando CMM e blocos padrão para calibração da coluna de ressaltos e do fuso de um padrão escalonado com tambor micrométrico é apresentado. Na figura 2 tem-se as partes principais de um padrão escalonado e os erros admissíveis para a coluna de ressaltos e do fuso micrométrico.

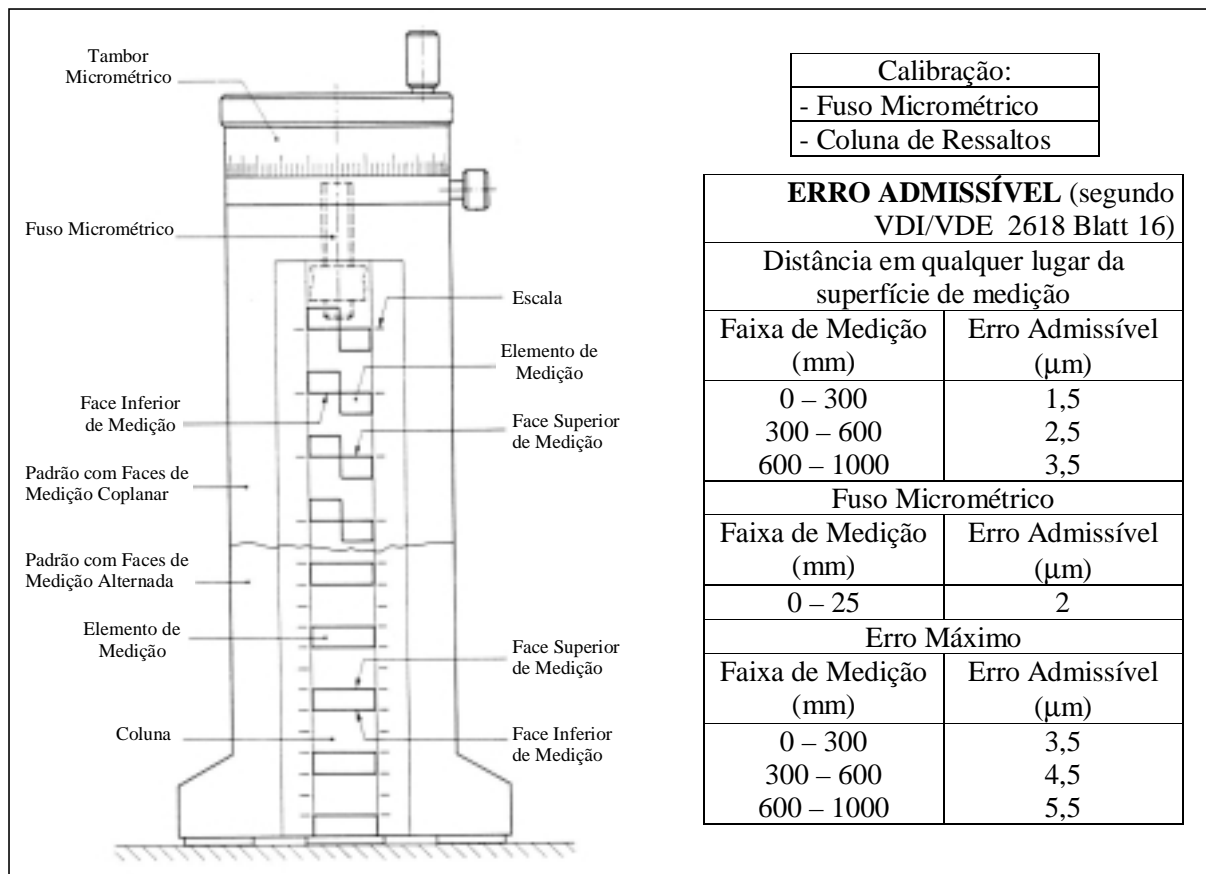


Figura 2 - Partes principais do padrão escalonado com tambor micrométrico e erros admissíveis (ISO 7863, 1984, VDI/VDE/DGQ 2618 – Blatt 16, 1991)

2.1 MÉTODO DA COMPARAÇÃO

No método da comparação ou substituição, a avaliação e a correção de erros são feitas com um padrão de referência calibrado com as mesmas características do objeto a ser calibrado. As diferenças entre os resultados de medições sobre o padrão e os valores correspondentes deste são usados para correção da medição sobre o objeto.

Na calibração de padrões escalonados na CMM, os erros podem ser determinados pela medição das distâncias entre os ressaltos do padrão escalonado a calibrar, comparando os resultados com uma medição de referência sobre um padrão de comprimento. A medição do padrão de referência fornece diretamente os erros associados com a tarefa de medição específica. Faz-se a avaliação e correção de erros utilizando blocos padrão de referência calibrados. Com os blocos padrão posicionados paralelamente ao padrão escalonado na CMM (fig.3), alguns erros do processo de medição podem ser determinados e corrigidos/eliminados na calibração do padrão escalonado.

O procedimento inicia-se com a medição de um bloco de aproximadamente 10 mm, onde se compensam os erros sistemáticos advindos da flexão e raio do apalpador da CMM. Após isso um bloco de comprimento aproximadamente igual ao comprimento do padrão escalonado, é medido de modo a compensar os erros devidos à principalmente às escalas da CMM.

Dependendo do tipo de padrão escalonado, o procedimento sofre alterações. Na calibração de padrão escalonado com tambor micrométrico o alinhamento do sistema coordenado é feito em relação ao eixo Z da CMM. Na medição dos ressaltos, um programa CNC executa os seguintes passos: apalpa um ponto sobre a mesa da CMM, apalpa no centro

das faces inferiores dos ressaltos de baixo para cima, as faces superiores de cima para baixo e novamente a mesa da CMM. Para o fuso micrométrico apalpa-se a face superior do último ressalto, sobre a qual define-se o zero. Os pontos de medição dependem do curso do fuso. Posiciona-se o fuso manualmente nas posições de medição, sendo que o sensor continua apalpando o último ressalto durante toda calibração.

Na calibração de padrão escalonado horizontal o alinhamento do sistema coordenado é feito em relação aos eixos X ou Y, através da medição de pontos sobre a superfície de referência e a lateral do primeiro ressalto. Nos ressaltos mede-se um ponto no centro das faces de medição, inclusive no ressalto de referência.

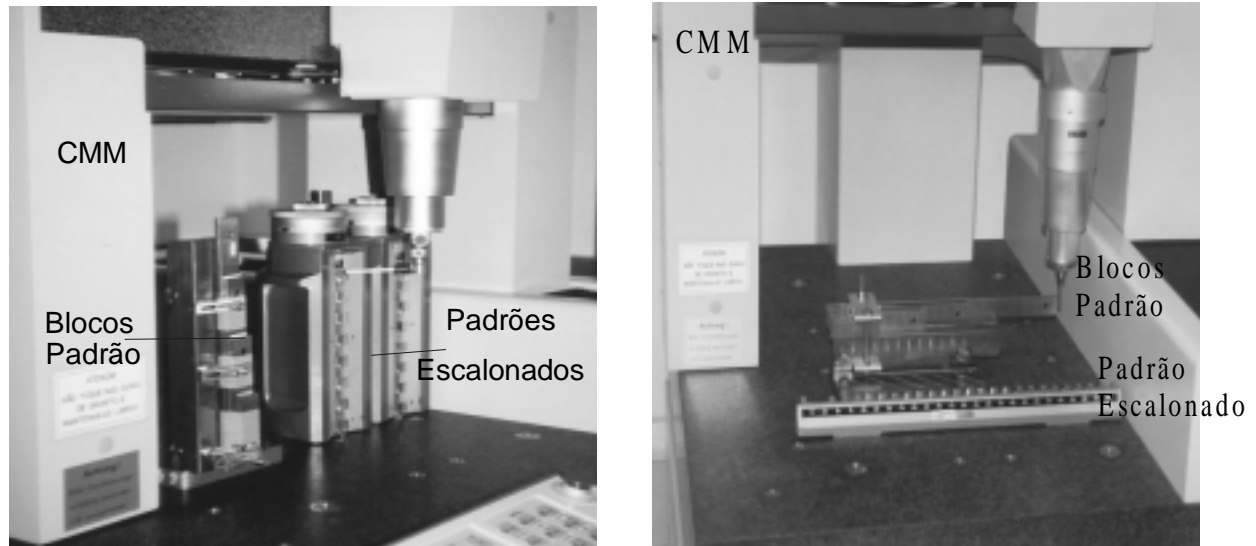


Figura 3 - Calibração de padrões escalonados (com tambor micrométrico e horizontal) utilizando CMM e blocos padrão

3. AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO - CALIBRAÇÃO DE PADRÃO ESCALONADO COM TAMBOR MICROMÉTRICO NA CMM

Na avaliação da incerteza de medição têm-se as estimativas da incerteza padrão (u) por meios estatísticos (avaliação tipo A) e por meio não estatísticos (avaliação tipo B). Na calibração do padrão escalonado com tambor micrométrico devem ser consideradas as seguintes fontes incertezas:

a) Repetitividade da indicação da CMM (Incerteza padrão tipo A - u_A)

A avaliação da incerteza - u_A fica definida como o desvio padrão experimental da média das indicações da CMM, então:

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

b) Incerteza da CMM (Avaliação tipo B)

Os efeitos desta fonte de incerteza são estimados tendo como base dados já existentes de uma calibração previamente realizada e apresentados no respectivo certificado. No método da comparação é considerada apenas a parcela independente do comprimento na incerteza de medição, a parcela relativa ao comprimento é compensada pela medição diferencial com o bloco padrão de referência.

c) Estabilidade do zero da CMM

Pode ocorrer em função de variação nas condições ambientais e de outros fatores no decorrer do tempo, e se manifesta como alteração do valor inicial da escala (zero) da CMM.

d) Resolução do tambor micrométrico (Avaliação tipo B)

O valor da incerteza expandida, o tipo de distribuição e o fator de abrangência dependem se o mostrador do padrão escalonado é analógico ou digital. Para calibração com mostrador digital, adota-se como caso geral o valor de incerteza igual à metade do incremento digital.

Para calibração com mostrador analógico, assume-se como valor de incerteza, devida à divisão da escala, a própria resolução adotada e distribuição retangular.

e) Diferenças de temperatura

Incertezas devido às diferenças de temperatura entre o padrão escalonado, o bloco padrão e a temperatura de referência 20°C (U_T).

$$U_T = L_{BP} \cdot \alpha_{BP} \cdot \Delta T_{BP} - L_{PE} \cdot \alpha_{PE} \cdot \Delta T_{PE} \quad (2)$$

Onde:

L_{BP} - Comprimento do bloco padrão

L_{PE} - Comprimento do padrão escalonado

α_{BP} - Coeficiente de expansão térmica do bloco padrão

α_{PE} - Coeficiente de expansão térmica do padrão escalonado

ΔT_{BP} , ΔT_{PE} - Diferenças de temperaturas do bloco padrão e padrão escalonado em relação à temperatura de referência 20°C.

f) Estabilidade de fixação do bloco padrão e do padrão escalonado

A incerteza devida à instabilidade da fixação do bloco padrão de referência e o padrão escalonado pode ser estimado por experiência.

A incerteza combinada (u_c) da influência das várias fontes de incerteza pode ser estimada a partir das incertezas padrão de cada fonte por:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2} \quad (3)$$

A Incerteza expandida (U) é obtida multiplicando a incerteza combinada (u_c) por um fator de abrangência (k):

$$U = k \cdot u_c \quad (4)$$

O fator de abrangência k deve levar em conta, além do nível de confiança desejado, o número de graus de liberdade efetivos (v_{eff}). O número de graus de liberdade efetivo pode ser calculado pela equação de Welch-Satterthwaite:

$$v_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4}{v_i}} \quad (5)$$

onde v_i é o número de graus de liberdade associado à i -ésima fonte de incerteza.

4. APLICAÇÃO - CALIBRAÇÃO DE PADRÃO ESCALONADO COM TAMBOR MICROMÉTRICO NA CMM

Na calibração de um padrão escalonado de 275 mm de comprimento utilizou-se uma CMM tipo portal e os blocos padrão de 10 mm e 350 mm (fig. 4), com as seguintes incertezas expandidas (U), para um fator de abrangência $k=2$ e nível de confiança 95 %:

- CMM, $U = \pm 1,0 \mu\text{m}$, considerando o método da comparação;

- Blocos Padrão de 350 e 10 mm, com $U = \pm 0,09 \mu\text{m}$ e $\pm 0,06 \mu\text{m}$, respectivamente;

As condições laboratoriais durante a calibração foram:

Temperatura: $(20,0 \pm 0,3)^\circ\text{C}$;

Umidade relativa do ar: $(50 \pm 10) \%$.

4.1 ESTIMATIVA DA INCERTEZA NO FUSO MICROMÉTRICO

O padrão escalonado foi colocado sobre a mesa da CMM na posição vertical. A posição do zero foi definida na face superior do último ressalto, com o mostrador analógico do tambor micrométrico indicando zero. O tambor micrométrico foi posicionado manualmente por valores crescentes e decrescentes a fim de se avaliar a histerese e foram realizados 3 ciclos de medição. A identificação e a contribuição das fontes de incerteza, para 27 mm, estão apresentadas na tabela 1 sendo que u é a incerteza padrão e v_{eff} é o grau de liberdade efetivo.



Figura 4 - Calibração de padrão escalonado com tambor micrométrico utilizando Máquina de Medir por Coordenadas, bloco padrão de 350 mm e bloco padrão de 10 mm.

Tabela 1 - Avaliação das incertezas de medição do fuso micrométrico do padrão escalonado na posição 27 mm

Símbolo	COMPONENTES DE INCERTEZA		DISTR. DE PROBABILIDADES		C _i	u _i ± [mm]	v _i ou v _{eff}
	FONTES	VALOR ± [mm]	TIPO	DIVISOR			
U_{CMM}	Incerteza da CMM	0,0010	Normal	2	1	0,0005	50
U_{Res}	Incerteza devida à Resolução do Parafuso	0,0010	Retangular	1,7321	1	0,0006	infinito
$U_{DifTemp}$	Diferença de Temp. entre Paraf. e Escala CMM	****	****	****	****	****	****
U_{BP10}	Incerteza do Bloco Padrão de 10 mm	****	****	****	****	****	****
U_{Flut}	Flutuação do Zero	0,0002	Retangular	1,7321	1	0,0001	infinito
$U_{Fix.BP}$	Estabilidade de fixação do BP	0,0001	Retangular	1,7321	1	0,0001	infinito
U_{Fix}	Estabilidade da Fixação do Padrão Escalonado	****	****	****	****	****	****
u_A	Incerteza Padrão Tipo A	0,0005	Normal	1,000	1	0,0005	2
u_c	INCERTEZA COMBINADA		NORMAL			0,00092	22
U	INCERTEZA EXPANDIDA		NORMAL K= 2,12			0,0020	

OBSERVAÇÕES:
A incerteza de medição apresentada é a maior da faixa de medição, calculada no ponto 27 mm.
**** : Fonte Desprezível.

O valor da flutuação (estabilidade) do zero (U_{Flut}) foi estimado experimentalmente em $\pm 0,2 \mu\text{m}$ e a estabilidade de fixação do bloco padrão ($U_{Fix.BP}$) foi estimado em $\pm 0,1 \mu\text{m}$. Portanto, considerando as fontes de incerteza, tem-se a Incerteza Combinada (u_c):

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2} = 0,92 \mu m$$

E a Incerteza Expandida (U), para 27 mm, sendo $v_{eff} = 22$, $k = 2,12$:

$$U = k \cdot u_c = 2 \mu m$$

4.2 ESTIMATIVA DA INCERTEZA NA COLUNA DE RESSALTOS

O fuso micrométrico foi posicionado em 25 mm, de modo que o ressalto inferior ocupasse essa posição. As alturas do padrão escalonado foram medidas em relação à face superior do primeiro ressalto (50 mm, face de referência). A posição de cada face foi determinada pela apalpação de um ponto aproximadamente em seu centro e foram realizados três ciclos de medição. A identificação e a contribuição das fontes de incerteza estão apresentadas na tabela 2 para 250 mm.

Considerando a diferença de temperatura entre o padrão escalonado e o bloco Padrão ($U_{Dif.Temp.}$) de 0,15 K, tem-se:

$$U_{Dif.Temp.} = \Delta L = L \Delta \alpha \Delta T, \text{ para o aço } \Delta \alpha = 11,5 \cdot 10^{-6} K^{-1}.$$

Para a maior incerteza da faixa de medição (250 mm):

$$U_{Dif.Temp.} = 0,0004 \text{ mm}$$

Tabela 2 - Avaliação das incertezas de medição da coluna de ressaltos – face superior do padrão escalonado para a posição 250 mm

Símbolo	COMPONENTES DE INCERTEZA		DISTR. DE PROBABILIDADES		C i	u i ± [mm]	v i ou v eff
	FONTES	VALOR ± [mm]	TIPO	DIVISOR			
U_{CMM}	Incerteza da CMM	0,0010	Normal	2	1	0,0005	50
$U_{Dif.Temp.}$	Diferença de Temp. entre BP e Padrão Esc.	0,0004	Retangular	1,7321	1	0,0002	infinito
U_{BP10}	Incerteza do Bloco Padrão de 10 mm	****	****	****	****	****	****
U_{BP}	Incerteza do Bloco Padrão de 350 mm	****	****	****	****	****	****
$U_{Flut.}$	Flutuação do Zero	0,0002	Retangular	1,7321	1	0,0001	infinito
$U_{Fix.BP}$	Estabilidade de fixação do BP	0,0001	Retangular	1,7321	1	0,0001	infinito
U_{Fix}	Estabilidade da Fixação do Padrão Escalonado	****	****	****	****	****	****
U_A	Incerteza Padrão Tipo A	****	****	****	****	****	****
u_c	INCERTEZA COMBINADA		NORMAL			0,00057	82
U	INCERTEZA EXPANDIDA		NORMAL K= 2,03			0,0012	

OBSERVAÇÕES:
A incerteza de medição apresentada é a maior da faixa de medição, calculada no ponto 250 mm.
**** : Fonte Desprezível.

Portanto, considerando as fontes de incerteza, tem-se a Incerteza Combinada (u_c) para 250 mm:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2} = 0,57 \mu m$$

E a Incerteza Expandida (U) para $v_{eff} = 82$, $k = 2,03$:

$$U = k \cdot u_c = 1,2 \mu m$$

A avaliação das fontes de incerteza da coluna de ressaltos – face inferior do padrão escalonado pode ser feita de forma semelhante ao item anterior.

4.3 CORREÇÃO E INCERTEZA DE MEDIÇÃO EM TODA FAIXA DE MEDIÇÃO

Nas tabelas 3 e 4 tem-se o resultado da calibração do padrão escalonado, apresentando-se as correções das indicações e as incertezas de medição expandidas (U) para os fatores de abrangências (k) associados a toda faixa de medição para a coluna de ressaltos e para o fuso micrométrico. As referências para os ressaltos são 50 mm para a face superior e 25 mm para a face inferior. Um sinal negativo na correção indica que a face de referência (superior ou inferior) da coluna de ressaltos está posicionada abaixo do valor nominal, em relação à base. Um sinal positivo indica o inverso.

Tabela 3 - Correção e incerteza de medição para a coluna de ressaltos

INDICAÇÃO NO SMC [mm]	CORREÇÃO [mm]	U +/- [mm]	k
Coluna de Ressaltos - Face Superior			
50	0,0000	0,0011	2,04
100	-0,0015	0,0011	2,04
150	-0,0040	0,0011	2,04
200	-0,0056	0,0011	2,04
250	-0,0060	0,0012	2,03
Coluna de Ressaltos - Face Inferior			
25	0,0000	0,0011	2,04
75	-0,0013	0,0011	2,04
125	-0,0036	0,0011	2,04
175	-0,0048	0,0011	2,04
225	-0,0055	0,0012	2,04
275	-0,0059	0,0012	2,03

Onde: SMC - Sistema de medição a calibrar - Padrão Escalonado

Tabela 4 - Correção e incerteza de medição para o fuso micrométrico

INDICAÇÃO NO SMC [mm]	MÉDIA DAS INDICAÇÕES NO SMP [mm]	CORREÇÃO [mm]	U +/- [mm]	k
2,0	2,0012	0,0012	0,0016	2,00
4,5	4,5003	0,0003	0,0016	2,00
7,1	7,1042	0,0042	0,0016	2,00
9,6	9,6042	0,0042	0,0016	2,00
12,2	12,1918	-0,0082	0,0016	2,00
14,7	14,6914	-0,0086	0,0016	2,00
17,3	17,2851	-0,0149	0,0017	2,03
19,8	19,7847	-0,0153	0,0017	2,02
22,4	22,3858	-0,0142	0,0017	2,02
24,9	24,8846	-0,0154	0,0017	2,03
27,0	26,9987	-0,0013	0,0020	2,12
27,0	26,9983	-0,0017	0,0016	2,00
24,9	24,8864	-0,0136	0,0016	2,00
22,4	22,3863	-0,0137	0,0016	2,00
19,8	19,7865	-0,0135	0,0016	2,00
17,3	17,2867	-0,0133	0,0016	2,00
14,7	14,6928	-0,0072	0,0016	2,00
12,2	12,1931	-0,0069	0,0016	2,00
9,6	9,6041	0,0041	0,0017	2,02
7,1	7,1044	0,0044	0,0016	2,00
4,5	4,4982	-0,0018	0,0016	2,00
2,0	1,9989	-0,0011	0,0016	2,00

Onde: SMP – Sistema de medição padrão – CMM

5. AVALIAÇÃO E CONCLUSÃO

Devido à flexibilidade, a calibração de padrões escalonados na Máquina de Medir por Coordenadas - CMM pode ser executada num menor tempo de preparação, execução e processamento (redução de até uma hora) em relação aos métodos convencionais, tendo como vantagem ainda a calibração simultânea de mais de um padrão escalonado.

A incerteza da CMM, a resolução do fuso micrométrico e as influências de temperatura contribuem de forma significativa para o resultado final da calibração. As influências de temperatura podem comprometer a calibração em situações onde as condições laboratoriais não são adequadas. O controle destas fontes de incerteza é recomendado pois através dele pode-se melhorar a qualidade do resultado da calibração.

O procedimento de avaliação da incerteza de medição adotado seguiu as recomendações do Guia para Expressão da Incerteza de Medição da ISO e através dele obteve-se um resultado confiável possibilitando comparações com valores de referência de normas e especificações. Na calibração do padrão escalonado com CMM pelo método da comparação obteve-se um resultado com incerteza expandida de 1,1 a 1,2 μm para a coluna de ressaltos e de 1,6 a 2,0 μm para o fuso micrométrico, que são admissíveis para este padrão.

O método da comparação nas CMMs é vantajoso pois reduz a incerteza de medição da CMM, possibilitando utilizá-la com vantagens operacionais e econômicas sobre métodos convencionais para a calibração de padrões escalonados.

6. REFERÊNCIAS

- Abackerli, A. J.; Cauchick Miguel, P. A., 1997, "Máquina Virtual: boa para estimar as incertezas na medição por coordenadas" - Máquinas e Metais, pp. 78-87.
- ISO, 1993, "Guide to the expression of uncertainty in measurement", First Edition, International Organization for Standardization, Switzerland, 101 pages.
- ISO 7863, 1984, "Height setting micrometers and riser blocks"- International Organization for Standardization.
- Link, W., 1997, "Metrologia Mecânica - Expressão da Incerteza de Medição" - Programa RH - Metrologia e Sociedade Brasileira de Metrologia, 67 p.
- NBR ISO 9001, 1994, "Sistemas da qualidade - Modelo para garantia da qualidade em projeto, desenvolvimento, produção, instalação e serviços associados".
- NBR ISO 9002, 1994, "Sistema da qualidade - Modelo para garantia da qualidade em produção, instalação e serviços associados".
- NBR ISO 9003, 1994, "Sistema da qualidade - Modelo para garantia da qualidade em inspeção e ensaios finais".
- NBR ISO 9004-1, 1994, "Gestão da qualidade e elementos do sistema da qualidade" - Parte 1: Diretrizes.
- QS – 9000, 1998, "Requisitos do Sistema da qualidade" - 2ª Edição Brasileira, ANFAVEA.

- PTB; NPL; TU Eindhoven; Feinmess; Brown and Sharp; Zeiss, 1998, "Traceability of Coordinate Measurements According to the Method of Virtual Measuring Machine" - Proposed Guideline State: August 1997, Part 2 of the Draft Final Report, Project MAT1-CT94-0076, PTB.
- Trapet, E. - "Introduction to Traceability with the Virtual CMM" - Workshop on Traceability of Coordinate Measuring Machines, PTB, October 9-10, 1997.
- Valente de Oliveira, J. C., Pires Alves, J.A., 1997, "INMETRO's Performance in Calibration of Ball Bars", XIV IMEKO World Congress, Volume V, Topic 8, Tampere, Finland, pp. 1-6.
- VDI/VDE/DGQ 2618 - Blatt 16 - "Prüfanweisung für Höhenmessschrauben" - Verein Deutscher Ingenieure; Januar, 1991.