CÁLCULO DA INCERTEZA ASSOCIADA À MEDIÇÃO DOS ERROS GEOMÉTRICOS DE UMA MM3C

Rosenda Valdés Arencibia
Escola de Engenharia de São Carlos. Av. Trabalhador Sãocarlense N.400 Bairro Centro. São Carlos. SP. CEP: 13566-590 arvaldes@sc.usp.br

Benedito Di Giacomo
Escola de Engenharia de São Carlos. Av. Trabalhador Sãocarlense N.400 Bairro Centro. São Carlos. SP. CEP: 13566-590 bgiacomo@sc.usp.br

Denise Pizarro Vieira Sato
Fundação Educacional Inaciana Pe. Sabóia de Medeiros – UniFEI Av. Humberto de A. C. Branco, 3972 - São Bernardo do Campo - SP- CEP: 09850-901 denise@4all.com.br

Resumo. *O presente trabalho visa o cálculo da incerteza associada à medição dos erros geométricos de uma Máquina de Medir a Três Coordenadas do tipo Ponte Móvel, através da aplicação da lei de propagação de incertezas. Para atingir o objetivo proposto os erros geométricos foram medidos para a temperatura de referência, 20^{0}C, através da aplicação de um método direto de calibração. Foram utilizados instrumentos, tais como, o interferômetro laser e o esquadro mecânico. Em seguida foi escrito um modelo matemático para cada erro geométrico, sendo posteriormente, aplicada a lei de propagação de incertezas, conforme recomendado no ISO GUM, em cada uma das equações obtidas para determinação da incerteza. Como conclusão tem-se que os procedimentos descritos no ISO GUM mostraram-se eficientes e viáveis para determinação da incerteza associada aos erros geométricos da MM3C avaliada.*
Palavras-chave: *Incerteza padrão, erros geométricos, propagação de incertezas.*

1. INTRODUÇÃO

Todo resultado de medição é apenas uma estimativa do valor verdadeiro. Isto devido à influência de diversos fatores que interferem no processo de medição, tais como: variações associadas ao instrumento de medição, ao operador, às condições ambientes, e outros. A diferença entre o valor verdadeiro e o valor encontrado em uma medição é denominada erro de medição.

Na atualidade não é suficiente expressar o valor numérico dos erros medidos, surgindo assim, a necessidade de indicar quantitativamente a qualidade do resultado, ou seja, acrescentar ao resultado da medição uma declaração sobre a confiança associada a ele. Isto é, a incerteza de medição. Sem a indicação da incerteza, os resultados de medição não podem ser comparados, seja entre eles mesmos ou com valores de referência dados em uma especificação ou norma.

A incerteza de medição pode ser definida como sendo o parâmetro, associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que poderiam ser razoavelmente atribuídos à grandeza. Tal parâmetro pode ser o desvio padrão ou um múltiplo dele ou a metade de um intervalo correspondente a um dado nível de abrangência ISO GUM(1).

2. INCERTEZA DE MEDIÇÃO

O processo de medição é um conjunto de operações que têm por objetivo determinar o valor de uma grandeza. Esta grandeza, geralmente, pode ser medida diretamente ou, ainda, determinada a partir de N outras grandezas (X_1, X_2, ..., X_N), através de uma relação funcional f, equação (1).

$$Y = f\left(X_1, X_2, \cdots, X_N\right) \tag{1}$$

As grandezas de entrada, por sua vez, podem também ser consideradas mensurandos que dependem de outras grandezas. Assim sendo, a incerteza associada ao resultado da medição deve levar em consideração as incertezas individuais de todas as variáveis que afetam o processo de medição. De acordo com o método usado para avaliação do valor numérico das incertezas, estas podem ser classificadas em: avaliação tipo A e avaliação tipo B.

Avaliação tipo A: A avaliação tipo A é obtida estatisticamente a partir de medições ou observações repetidas de uma dada grandeza, assumindo uma distribuição normal ou outra qualquer.

Sabe-se que a média aritmética é a melhor estimativa disponível do valor esperado de uma grandeza X que varia aleatoriamente e para a qual n observações independentes foram obtidas sob as mesmas condições de operação. Porém as n observações da grandeza X diferem em valor devido a efeitos aleatórios. Assim sendo, a variabilidade dos valores observados é caracterizada pela estimativa da variância. Desta forma, para uma grandeza de entrada X_i determinada por n observações repetidas independentes $X_{i,k}$ a incerteza padronizada $u(x_i)$ de sua estimativa x_i é:

$$u(x_i) = s(\overline{x}_i) = \sqrt{\frac{s^2(x_i)}{n}} = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} \tag{2}$$

Neste caso, a média dos valores obtidos em um dado experimento é a estimativa do mensurando, enquanto que a raiz quadrada da variância é a incerteza padrão associada ao estimador. A incerteza padrão considera as flutuações aleatórias dos resultados do experimento e outras influências que são consideradas constantes BS 6808(2).

Avaliação tipo B: A avaliação tipo B da incerteza é estimada a partir de um julgamento científico baseado em todas as informações relevantes disponíveis sobre o instrumento e o processo de medição ISO GUM(1); Decker e Pekelsky(3),. O conjunto de informações pode incluir: dados de medições prévias; experiência ou conhecimento geral do comportamento e propriedades de materiais e instrumentos relevantes; especificações do fabricante; dados fornecidos em certificados de calibração e incertezas relacionadas a dados de referências extraídos de manuais.

Quando a estimativa de uma grandeza x_i for obtida de uma especificação do fabricante, certificado de calibração, manual técnico ou de outra fonte e a incerteza declarada como um múltiplo do desvio padrão, então, a incerteza padrão $u(x_i)$ é a incerteza citada dividida pelo multiplicador ISO GUM(1); NIST TECNICAL NOTE 1297(4).

Se a incerteza declarada de x_i é um parâmetro ao qual está associado um dado nível de confiança de 90, 95 ou 99 %, o cálculo da incerteza padrão só será efetuado se a distribuição de probabilidade caracterizada pela estimativa do mensurando e sua incerteza forem conhecidas. Neste caso, a incerteza padrão é a incerteza citada dividida pelo fator de abrangência apropriado para a distribuição adotada.

Em alguns casos é possível estimar apenas os limites superior e inferior para X_i e estabelecer que a probabilidade de que o valor X_i pertença ao intervalo (a_-, a_+) é um e a probabilidade para que o valor de X_i esteja fora desse intervalo é zero. Para tanto, pode-se assumir uma distribuição retangular, uma triangular ou trapezoidal, segundo o caso Link[5].

2.1. Incerteza Padrão Combinada

A incerteza padrão combinada pode ser calculada a partir das incertezas padrões individuais das variáveis que interferem no processo de medição, através de uma lei conhecida como "lei de propagação de incertezas". A incerteza, assim determinada, é definida pelo Comitê Internacional de Pesos e Medidas CIPM[6] como incerteza padrão combinada e é designada por u_c, equação (3).

$$u_C^2(y) = \sum_{i=1}^{N}\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i) + 2\sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=i+1}^{N}\frac{\partial f}{\partial x_i}\frac{\partial f}{\partial x_j}u(x_i)\cdot u(x_j)\cdot r(x_i, x_j) \tag{3}$$

onde y é a estimativa da variável resposta Y, x_i é a estimativa da variável X_i, $u^2(x_i)$ é a variância associada a x_i, para todo i variando de 1 até N, N é o número de variáveis que afetam a variável resposta Y, $u(x_i)$ é a incerteza associada à fonte de erro representada pela estimativa x_i e $r(x_i, x_j)$ é o coeficiente de correlação entre as estimativas x_i e x_j.

2.2. Incerteza Expandida

O CPIM propõe, ainda, descrever a incerteza de medição através de intervalos que representam os valores esperados para os erros de medição, com uma probabilidade conhecida. Além disso, usa o termo incerteza expandida (U_p) para descrever tal intervalo, equação (4).

$$U_p = k \cdot u_c \tag{4}$$

onde u_c é a incerteza padrão combinada e $k > 0$ é o fator de abrangência.

2.3. Incerteza Tridimensional

A avaliação do desempenho de instrumentos de medição tais como Máquinas de Medir a Três Coordenadas através da incerteza de medição é uma tarefa um tanto difícil, devido à quantidade de fatores que pode contribuir para a incerteza e aos diversos tipos de medições que podem ser feitas nestas máquinas. Durante um processo de medição a três coordenadas as características geométricas e dimensionais são determinadas a partir das coordenadas (Xi, Yi, Zi) dos pontos dispersos sobre a superfície da peça. A MM3C foi intencionalmente desenhada para medir estas grandezas. Entre tanto, resulta impossível a obtenção das coordenadas verdadeiras ou reais dos pontos porque muitos fatores interferem no processo de medição. Assim sendo, o resultado de qualquer medição na Máquina de Medir a Três Coordenadas estará afetado por uma combinação de erros, denominada erro volumétrico.

Para otimização do desempenho da MM3C, o conhecimento dos erros volumétricos presentes no processo de medição é de vital importância. Porém, estes erros são impossíveis de serem medidos de forma direta surgindo, assim, a necessidade de calcula-los em função das componentes do erro volumétrico (Ex, Ey e Ez). Estas componentes dependem de um conjunto de variáveis como, por exemplo, os erros geométricos. Estes erros têm origem nos desvios geométricos dos diferentes componentes da Máquina de Medir e se materializam durante a movimentação dos eixos coordenados, devido à interação entre os componentes.

Para o estudo dos erros geométricos, os elementos móveis da MM3C são considerados corpos rígidos. A posição de um corpo rígido no espaço pode ser definida através de seis graus de liberdade. Como a cada grau de liberdade pode ser associado um erro, associam-se seis erros geométricos para cada eixo preferencial da máquina. Isto é; um erro de posição, dois erros de retilineidade e três erros angulares ("pitch", "yaw" e "roll") totalizando dezoito erros geométricos.

Somam-se a estes erros outros três gerados pela impossibilidade de montagem de três eixos perfeitamente ortogonais, que são denominados erros de ortogonalidade, dependentes da relação entre componentes. Dessa maneira nas MM3Cs estão presentes vinte e um erros geométricos.

Várias metodologias foram desenvolvidas para quantificar a incerteza tridimensional, mas, nenhuma delas mostra, de forma explícita, o cálculo da incerteza de medição das diferentes inspeções realizadas em uma MM3C, nem a incerteza associada aos erros geométricos. Portanto, é objetivo deste trabalho estimar a incerteza associada aos erros geométricos em uma MM3C, visando calcular a incerteza associada ao erro volumétrico.

3. CALIBRAÇÃO DA MÁQUINA

Todos os experimentos foram conduzidos em uma Máquina de Medir a Três Coordenadas, do tipo Ponte Móvel. Os erros geométricos de posição, de retilineidade e angulares “pitch” e “yaw” de todos os eixos foram levantados com o interferômetro laser da Hewlett Packard modelo HP5528A, o erro angular “roll” utilizando-se do nível eletrônico da Rank Taylor-Hobson modelo Talyvel 3 e os erros de ortogonalidade através da utilização do esquadro mecânico e do apalpador LVDT. Os experimentos foram efetuados à temperatura de 20^0C. Todos os instrumentos e dispositivos utilizados na calibração, assim como a MM3C permaneceram, na sala de testes, o tempo necessário para que o equilíbrio térmico fosse atingido. Maiores informações em Valdés(7).

4. CÁLCULO DA INCERTEZA ASSOCIADA À MEDIÇÃO DOS ERROS GEOMÉTRICOS

Após a calibração da máquina efetuo-se um estudo detalhado com o objetivo de identificar as variáveis de influência e os fatores de correção que afetam cada um dos erros geométricos medidos.

4.1. Estimativa da Incerteza Associada à Medição dos Erros de Ortogonalidade.

A equação (5) permite estimar a incerteza associada a os erros de ortogonalidade. onde: D é o deslocamento medido; L_{LVDT} é a leitura feita no LVDT; C_{Esq} é a correção devido ao erro do esquadro; R_{LVDT} é a resolução do LVDT; L_{Med} é o valor lido; α_{Esq} é o coeficiente de expansão térmica do esquadro (granito); ΔT_E é a diferença entre a temperatura do esquadro e a temperatura de referência. Aplicando a lei de propagação de incertezas na equação (5) obtém-se a equação (6).

$$D = L_{LVDT} + C_{Esq} + R_{LVDT} + L_{Med} \cdot \alpha_{Esq} \cdot \Delta T_E \tag{5}$$

$$\begin{aligned} u(D)^2 = & \left(\frac{\partial D}{\partial L_{LVDT}}\right)^2 \left(u_{L_{LVDT}}\right)^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial C_{Esq}}\right)^2 \left(u_{C_{Esq}}\right)^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial R_{LVDT}}\right)^2 \left(u_{R_{LVDT}}\right)^2 + \\ & + \left(\frac{\partial D}{\partial L_{Med}}\right)^2 \left(u_{L_{Med}}\right)^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial \alpha_{Esq}}\right)^2 \left(u_{\alpha_{Esq}}\right)^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial \Delta T_E}\right)^2 \left(u_{\Delta T_E}\right)^2 \end{aligned} \tag{6}$$

A seguir é apresentado o roteiro para análise das incertezas padrões associadas às variáveis que influenciam a dimensão analisada.

Incerteza associada ao valor lido pelo LVDT, L_{LVDT}

Esta componente de incerteza foi obtida através de uma avaliação do tipo A, equação (7).

$$u\left(L_{LVDT}\right) = \sqrt{s^2 / N} \tag{7}$$

Incerteza associada ao coeficiente de correção do esquadro, C_{Esq}

Esta componente de incerteza foi determinada através de uma avaliação do tipo B, assumindo uma distribuição de probabilidade retangular, equação (8). O termo que aparece no numerador foi determinado a partir de informações de medições realizadas anteriormente no LAMAFE, Martinez Orrego[8].

$$u(C_{Esq}) = \frac{valor}{\sqrt{3}} \tag{8}$$

Incerteza associada à resolução do LVDT, R_{LVDT}

Assumindo uma distribuição triangular, essa componente de incerteza foi obtida através de uma avaliação do tipo B pela equação (9), onde o numerador R_{LVDT} é o valor da resolução do LVDT, de acordo com a característica da medição.

$$u(R_{LVDT}) = \frac{R_{LVDT}}{\sqrt{6}} \tag{9}$$

Incerteza associada ao coeficiente de dilatação térmica do esquadro, α_{Esq}

Se esta componente de incerteza for relevante para a análise pode ser obtida através de uma avaliação do tipo B, assumindo uma distribuição de probabilidade retangular. Considerando-se uma incerteza conservativa em torno de 10 %, seu valor seria calculado pela expressão (10).

$$u(\alpha_{Esq}) = \frac{0.01 \cdot \alpha}{\sqrt{3}} \tag{10}$$

Incerteza associada à diferença de temperatura com relação à temperatura padrão, ΔT_E

Esta componente de incerteza é a combinação das seguintes incertezas:

<u>Incerteza de calibração do sensor de temperatura</u>

Incerteza obtida através de uma avaliação do tipo B, assumindo uma distribuição de probabilidades retangular, equação (11). Sendo $u(Tam)$ o valor da incerteza do sensor que mede a temperatura ambiente, dado pelo fabricante.

$$u(sen\,sor) = \frac{u(Tam)}{\sqrt{3}} \tag{11}$$

<u>Variação da temperatura ambiente com relação à temperatura de referência</u>

Essa componente de incerteza foi obtida por uma avaliação do tipo B. Assumindo uma distribuição retangular e supondo que a variação de temperatura durante a medição seja $var\,T$, tal incerteza foi calculada por:

$$u(var\,Temp) = \frac{var\,T}{\sqrt{3}} \tag{12}$$

A incerteza padrão combinada associada a ΔT_E foi obtida pela expressão (13).

$$u(\Delta T_E) = \sqrt{[u(sen\,sor)]^2 + [u(var\,Temp)]^2} \tag{13}$$

A Tabela 1 mostra os dados referentes ao cálculo da incerteza do erro de ortogonalidade avaliado.

Tabela 1. Incerteza do Erro de Ortogonalidade XY, X_{275} para 20^0C.

Fonte de incerteza	Tipo de avaliação	Distribuição de probabilidade	Coeficiente de Sensibilidade	Graus de liberdade	Incerteza Padronizada (μm)
L_{LVDT}	A	Normal.	1	10	4.96*E-4
C_{Esq}	B	Retangular	1	∞	6.99*E-6
R_{LVDT}	B	Retangular	1	∞	4.08*E-5
Incerteza padrão combinada (u_c) em μm					4.98*E-4
Grau de liberdade efetivo (v_{eff})					10.14
Fator de abrangência (v_{eff}, 95 %)					k=2.23
Incerteza expandida (95 %) em μm					1.11*E-3

De forma análoga foram calculadas as incertezas associadas aos erros de ortogonalidade entre os eixos XZ e YZ, obtendo-se resultados similares. As pequenas diferenças encontradas podem ser atribuídas ao treinamento e meticulosidade do operador, pois os esforços produzidos na direção do deslocamento medido podem alterar o resultado e aumentar a variabilidades das medições.

4.2. Estimativa da Incerteza Associada aos Erros de Posição

A equação (14) permite determinar a incerteza associada à medição dos erros de posição.

$$E_{Pos} = M - P\left[1 + \alpha_P \Delta T_P + \alpha_E\left(\delta T + \Delta T_P\right)\right] + R_{Laser} \tag{14}$$

onde: E_{Pos} é o erro de posição; M é o valor indicado pela máquina; P é o valor utilizado como referência (Laser); α_E é o coeficiente de dilatação térmica da escala (vidro); α_P é o coeficiente de dilatação térmica do feixe laser; ΔT_P é a diferença entre a temperatura ambiente e a temperatura de referência; ΔT_E é a diferença entre a temperatura da régua e a temperatura de referência e R_{Laser} é a resolução do laser.

Aplicando a lei de propagação de incerteza em (14) obtém-se a equação (15).

$$\begin{aligned} u(E_{Pos})^2 = {} & \left(\frac{\partial E_{Pos}}{\partial M}\right)^2 (u_M)^2 + \left(\frac{\partial E_{Pos}}{\partial P}\right)^2 (u_P)^2 + \left(\frac{\partial E_{Pos}}{\partial \Delta T_P}\right)^2 \left(u_{\Delta T_P}\right)^2 + \\ & \left(\frac{\partial E_{Pos}}{\partial \alpha_E}\right)^2 \left(u_{\alpha_E}\right)^2 + \left(\frac{\partial E_{Pos}}{\partial \alpha_P}\right)^2 \left(u_{\alpha_P}\right)^2 + \left(\frac{\partial E_{Pos}}{\partial \Delta T_E}\right)^2 \left(u_{\Delta T_E}\right)^2 + \left(\frac{\partial E_{Pos}}{\partial \delta T}\right)^2 \left(u_{\delta T}\right)^2 \end{aligned} \tag{15}$$

Incerteza associada ao valor utilizado como referência, R_{LASER}

Essa componente de incerteza foi obtida através de uma avaliação do tipo B, com distribuição retangular e é calculada de acordo com as informações dadas no certificado de calibração, equação (9). A resolução do interferômetro laser é de 0.01 μm na faixa de 40 m para o erro de posição.

Incerteza associada ao valor indicado pela máquina (M)

A incerteza da variável M pode ser dada pela combinação das seguintes incertezas Vieira Sato[(9)].

<u>Incerteza associada à variabilidade das múltiplas medições</u> Rep_{MM3C}

Esta é uma componente de incerteza que pode ser obtida através de uma avaliação do tipo A, equação (7), com unidade dimensional μm.Geralmente possui uma distribuição t-Student.

Incerteza associada à resolução da MM3C, R_{MM3C}

A resolução da MM3C utilizada neste trabalho é de 0.002 mm. Assumindo uma distribuição retangular, esta parcela de incerteza foi obtida através de uma avaliação do tipo B, pela equação (9). Enquanto que a incerteza padrão combinada é dada pela equação (16), cuja dimensão é µm.

$$u(E_{Pos}) = \sqrt{[u(Rep_{MM3C})]^2 + [u(R_{MM3C})]^2} \quad (16)$$

Incerteza associada à diferença de temperatura com relação à temperatura de referência, ΔT_p

Esta componente de incerteza foi calculada pela equação (13). As parcelas presentes nesta expressão foram determinadas pelas equações (11) e (12).

Incerteza associada à δT

Esta parcela é composta das seguintes incertezas:

Incerteza de calibração do sensor de temperatura do padrão de comprimento e do sensor de temperatura da régua. Estas parcelas de incerteza foram calculadas pela expressão (11).

Incerteza da diferença nas temperaturas do padrão de comprimento de referência e régua

Se ΔT é a diferença de temperatura entre o padrão e a régua e assumindo uma distribuição retangular, tem-se que esta incerteza, pode ser obtida por uma avaliação do tipo B, equação (17).

$$u(dT) = \frac{\Delta T}{\sqrt{3}} \quad (17)$$

A incerteza padrão combinada foi calculada pela expressão (18) com unidade dimensional ^{0}C.

$$u(\delta T) = \sqrt{[u(sen\,sor)]^2 + [u(sen\,sorRégua)]^2 + [u(dT)]^2} \quad (18)$$

Incerteza associada aos coeficientes α_p **e** α_M

Estas componentes de incerteza foram obtidas através de uma avaliação do tipo B, assumindo-se uma distribuição de probabilidades retangular, equação (10).

A Tabela 2 apresenta os dados referentes ao cálculo da incerteza associada ao erro de posição do eixo X para 20^{0}C.

Tabela 2. Incerteza do Erro de Posição do eixo X_{275} para 20^{0}C

Fonte de incerteza	Tipo de avaliação	Distribuição de probabilidade	Coeficiente de sensibilidade	Graus de liberdade	Incerteza padronizada (µm)
M	A	Normal	1 µm	4	0.074
R_{MM3c}	B	Retangular	1 µm	∞	1.15*E-6
R_{laser}	B	Retangular	1 µm	∞	0.0058
α_E	B	Retangular	-0.0064 µm^{0}C	∞	-1.95 E-10
C_{laser}	B	Retangular	0.0064 µm^{0}C	∞	5.17 E-7
δT	B	Retangular	-0.53E-7µm/^{0}C	∞	-1.07 E-8
ΔT	B	Retangular	-0.139E-4µm/^{0}C	∞	-5.17 E-5
Incerteza padrão combinada (u_c) em µm					0.104
Grau de liberdade efetivo (v_{eff})					4.05
Fator de abrangência (v_{eff}, 95 %)					k=2.78
Incerteza expandida (95 %) em µµ					0.289

4.3 Incerteza Associada aos Erros de Retilineidade e Angulares "Pitch" e "Yaw"

A diferença dos erros de posição, os valores dos erros de retilineidade e angulares são obtidos diretamente com o interferômetro laser. Assim sendo, o modelo matemático que representa os erros de retilineidade e angulares "pitch" e "yaw" de todos os eixos é dado em (19).

$$E = e + R_{LASER} + \Delta T_{P/M} \tag{19}$$

onde: E é o erro em questão; e: valor indicado pelo laser; R_{LASER} é a resolução do laser e $\Delta T_{P/M}$ representam os efeitos térmicos, devido a variação da temperatura ambiente com relação à de referência. A incerteza de cada uma das parcelas é determinada de forma similar à apresentada para o erro de posição.

Aplicando a lei de propagação de incertezas em (19) obtém-se a equação (20).

$$u(E)^2 = \left(\frac{\partial E}{\partial e}\right)^2 (u_e)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial R_{LASER}}\right)^2 \left(u_{R_{LASER}}\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial \Delta T_{P/M}}\right)^2 \left(u_{\Delta T_{P/M}}\right)^2 \tag{20}$$

A seguir as Tabelas contendo os dados para cálculo da incerteza de medição associada aos erros de retilineidade do eixo X na direção Y (Tabela 3) e ao erro angular "pitch" do eixo X (Tabela 4).

Tabela 3. Incerteza do Erro de RXy, X_{275} para 20^0C

Fonte de incerteza	Tipo de avaliação	Distribuição de probabilidade	Coeficiente de Sensibilidade	Graus de liberdade	Incerteza Padronizada (µm)
e	A	Normal	1	4	0.234
R_{Laser}	B	Retangular	1	∞	0.0058
C_{Laser}	B	Retangular	1.76*E-6µm^{0}C	∞	4.61*E-5
$\Delta T_{p/M}$	B	Retangular	1.7*E-10µm/^{0}C	∞	1.18
Incerteza padrão combinada (u_c) em µm					0.234
Grau de liberdade efetivo (v_{eff})					4.0
Fator de abrangência (v_{eff}, 95 %)					k=2.78
Incerteza expandida (95 %) em µm					0.651

Tabela 4. Incerteza do erro angular PitchX, X_{275} para 20^0C

Fonte de incerteza	Tipo de avaliação	Distribuição de probabilidade	Coeficiente de Sensibilidade	Graus de liberdade	Incerteza Padronizada (µm)
e	A	Normal	1	4	1.60*E-7
R_{Laser}	B	Retangular	1	∞	1.39*E-7
C_{Laser}	B	Retangular	7.8*E-6µm^{0}C	∞	2.19*E-9
$\Delta T_{p/M}$	B	Retangular	5.93*E-6µm/^{0}C	∞	0.25
Incerteza padrão combinada (u_c)					2.13*E-7
Grau de liberdade efetivo (v_{eff})					12.4
Fator de abrangência (v_{eff}, 95 %)					k=2.19
Incerteza expandida (95 %)					4.65*E-7

Na Tabela 4 pode-se observar que a variação de temperatura é a parcela que mais contribui no valor de incerteza padrão combinada do erro angular "pitch" do eixo X.

4.4. Incerteza Associada à Medição dos Erros Angulares "Roll"

Os valores do erro angular "roll" também são obtidos de forma direta utilizando-se dos níveis eletrônico e de bolha. O modelo matemático para determinar a incerteza associada à medição destes erros é dado por:

$$E = e + R_{Nb} + R_{Ne} + \Delta T_{P/M} \tag{21}$$

onde: E é o erro; e é o valor indicado pelo nível; R_{Nb} é a resolução do nível de bolha; R_{Ne} é a resolução do nível eletrônico e $\Delta T_{P/M}$ é a parcela que representa os efeitos térmicos. Aplicando a lei de propagação de incertezas em (21) tem-se:

$$u(E)^2 = \left(\frac{\partial E}{\partial e}\right)^2 (u_e)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial R_{Nb}}\right)^2 (u_{RNb})^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial R_{Ne}}\right)^2 (u_{RNe}) + \left(\frac{\partial E}{\partial \Delta T_{P/M}}\right)^2 \left(u_{\Delta T_{P/M}}\right)^2 \tag{22}$$

Tabela 5. Incerteza do Erro angular RollX, X_{275} para 20^0C

Fonte de incerteza	Tipo de avaliação	Distribuição de probabilidade	Coeficiente de Sensibilidade	Graus de liberdade	Incerteza Padronizada (µm)
e	A	Normal	1	4	4.334E-07
R_{Ne}	B	Retangular	1	∞	2.798E-07
R_{Nb}	B	Retangular	1	∞	1.119E-05
$\Delta T_{p/M}$	B	Retangular	$\mu m/^0C$	∞	0.401
Incerteza padrão combinada (u_c) em µm					1.12*E-5
Grau de liberdade efetivo (v_{eff})					>100
Fator de abrangência (v_{eff}, 95 %)					k=2
Incerteza expandida (95 %) em µm					2.24*E-5

5. CONCLUSÕES

Ao finalizar este trabalho podem ser apresentadas as seguintes conclusões.

Os procedimentos descritos no ISO GUM[(1)] mostraram-se eficientes e viáveis para determinar a incerteza associada aos erros geométricos da MM3C avaliada.

Os erros de posição são afetados por um número maior de fontes de incerteza quando comparado com os demais erros geométricos.

A variação de temperatura apresentou os maiores valores de incerteza, entretanto, quando estes valores foram multiplicados pelos respectivos coeficientes de sensibilidade, pouco influenciaram na incerteza final do erro avaliado.

Os erros angulares apresentaram os menores valores de incerteza.

As incertezas associadas aos coeficientes de expansão térmica não foram relevantes por serem sensivelmente menores que as demais incertezas consideradas.

A metodologia apresentada permite estimar a incerteza associada às componentes do erro volumétrico para qualquer posição dentro do volume de trabalho. Basta para tanto combinar adequadamente as parcelas de incerteza calculadas através de um modelo adequado.

6. AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo suporte financeiro para desenvolvimento desta pesquisa. Processos N. 98/15436-7 e N. 03/00709-8.

7. REFERÊNCIAS

1. **ISO TAG 4/WG 3**. Guide to the Expression of Uncertainty in measurement, Geneva Switzerland, 1993.
2. **BS 6808**, Coordinate measuring machines. Parte III Code of pratice. British standards institution, 1989.
3. DECKER, J.E. PEKELSKY, J.R. Gauge Block Calibration and the expression of associated measurement uncertainties, **Anais III Seminário de Metrologia Aeroespacial**, Julho, 1999, p.1-10.
4. NIST TECNICAL NOTE 1297. **Guide lines for evaluating and expressing the uncertainty of NIST measurement results**. National Institute of standards and technology, 1994.
5. LINK, Walter. **Metrologia mecânica: expressão da incerteza de medição**, 1997. 174p.
6. **CPIM: COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES** Recomendação INC-1. 1980.
7. VALDÉS, A.R. **Modelo de sintetização de erros termicamente induzidos em Máquinas de Medir a Três Coordenadas.** 2003. 191p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
8. MARTINEZ ORREGO, R. **Método de calibração direta para Maquinas de Medir a Três Coordenadas**. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1999.
9. VIEIRA SATO, D.P. **Determinação da incerteza de medição a três coordenadas**. 2001. Relatório FAPESP - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.2001.

ESTIMATION OF MEASUREMENT UNCERTAINTY ASSOCIATED TO GEOMETRIC ERRORS OF A CMM

Rosenda Valdés Arencibia
Escola de Engenharia de São Carlos. Av. Trabalhador Sãocarlense N.400 Bairro Centro. São Carlos. SP. CEP: 13566-590 arvaldes@sc.usp.br

Benedito Di Giacomo
Escola de Engenharia de São Carlos. Av. Trabalhador Sãocarlense N.400 Bairro Centro. São Carlos. SP. CEP: 13566-590 bgiacomo@sc.usp.br

Denise Pizarro Vieira Sato
Fundação Educacional Inaciana Pe. Sabóia de Medeiros – UniFEI Av. Humberto de A. C. Branco, 3972 - São Bernardo do Campo - SP- CEP: 09850-901 denise@4all.com.br

Abstract. *This work aims to present the estimation of the uncertainty associated to geometric errors measurement of a moving bridge type coordinate measuring machine by means of the application the law of propagation of uncertainty. Applied methodology consisted of geometric errors measurement at reference temperature of 20°C using a direct calibration method. Instruments such as a laser interferometer and mechanical square were employed. Next, mathematical models referring to each geometric error were developed and the law of uncertainty propagation was applied accordingly to ISO GUM recommendations for each equation obtained for uncertainty estimation. The following conclusions could be observed: ISO GUM procedures were considered effective and practicable for the determination of uncertainty associated to geometric errors of the evaluated CMM; results obtained were similar to the ones presented by other authors.*
Keywords: *Standard uncertainty, geometric errors, uncertainty propagation.*