



UM MODELO HÍBRIDO PARA O CÁLCULO DAS COMPONENTES DO ERRO VOLUMÉTRICO EM MÁQUINAS DE MEDIR A TRÊS COORDENADAS

Di Giacomo B.*, Valdés, A. R. Souza, V. A.*****

*Professor, **Estudante de Doutorado. ***Estudante de Mestrado, Universidade de São

Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Mecânica.

CEP. 13560-970. São Carlos, SP, Brasil.

e-mail: bgiacomo@sc.usp.br *** arvaldes@sc.usp.br

Resumo. *As Máquinas de Medir a Três Coordenadas (MM3Cs) estão sujeitas a erros inerentes a sua estrutura que afetam a repetibilidade e a acuracidade das medições, nelas feitas. Este trabalho propõe uma metodologia geral para equacionar as componentes do erro volumétrico em função das coordenadas dos pontos medidos "X", "Y" e "Z". A adequabilidade do modelo foi avaliada estatisticamente e através da comparação com os resultados obtidos na calibração utilizando um artefato padrão (barra de esferas), demonstrando uma boa adequabilidade do modelo e uma excelente capacidade na previsão do erro total da máquina. Quando comparado com o método de sintetização o novo modelo apresenta resultados muito similares, mostrando-se superior, pois as equações obtidas foram polinômios quadráticos, de maior simplicidade de aplicação, além de, não precisar da calibração dos 21 erros geométricos.*

Palavras-chave: Barra de Bolas, Modelo Quadrático, Calibração.

1. INTRODUÇÃO

A época contemporânea caracterizada por grandes descobertas científicas, um acelerado desenvolvimento tecnológico e uma economia cada vez mais globalizada, trouxe consigo a evolução dos processos produtivos. O carácter global das relações comerciais, a competitividade e a luta por maiores parcelas no mercado, levaram os países a investirem na procura de novas tecnologias com o objetivo de aumentar a produtividade e qualidade dos produtos. Como consequência, máquinas modernas de usinagem foram sendo incorporadas ao mundo industrializado onde os produtos são fabricados com tolerâncias cada vez mais estreitas e em maiores quantidades. Surgindo assim, a necessidade integração a estes sistemas formas de controle de qualidade mais rápidos, precisos, flexíveis e confiáveis.

As Máquinas de Medir a Três Coordenadas são as encarregadas de satisfazer esta necessidade, representando o que de mais avançado há em equipamentos, utilizados no campo da metrologia moderna. Em consequência de sua simplicidade de operação, flexibilidade e

acuracidade, permitem a medição de estruturas complexas com extrema rapidez e precisão, assim como, o controle simultâneo de diversas características metrológicas de uma peça Kunzmann, (1988).

No entanto, o desempenho das MM3Cs fica limitado devido a presença dos braços de Abbé, da dificuldade de montagem de três eixos, teoricamente ortogonais e das imperfeições decorrentes dos processos de usinagem que se apresentam nos diversos componentes mecânicos que compõem o sistema. Estes fatores atuam de maneira conjunta, combinando-se de forma complexa por todo o volume de trabalho da máquina, gerando os denominados erros volumétricos. Toda leitura resultado de uma medição, terá envolvida esse erro volumétrico, sendo necessário o desenvolvimento de metodologias para a minimização de esses erros e assim alcançar melhor desempenho durante a medição.

O objetivo do presente trabalho é equacionar as componentes do erro volumétrico em uma MM3C do tipo “Ponte Móvel”, fabricada pela Brown & Sharpe Mfg. Co., modelo Micro Validator, através de técnicas de regressão múltipla. Tal equacionamento permitirá prever o erro volumétrico em um ponto qualquer do volume de trabalho da máquina.

2. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS E SISTEMA DA MM3C

A estrutura da MM3C serve de suporte e permite o movimento de um sensor em três eixos ortogonais “X”, “Y” e “Z” de comprimentos 457 x 610 x 381 mm, respectivamente. Estas dimensões são denominadas cursos de operação e caracterizam esta Máquina de Medir como de pequenas dimensões e de peso moderado quando comparadas às demais existentes.

A posição dos pontos das superfícies das peças no espaço fica determinada por três coordenadas “X”, “Y” e “Z”. A MM3C foi intencionalmente desenhada para medir estas grandezas. No entanto, resulta impossível a obtenção das coordenadas verdadeiras ou reais dos pontos, porque muitos outros fatores interferem no processo de medição.

Para determinar a relação entrada-saída do sistema Máquina de Medir, deve-se definir e classificar as variáveis envolvidas no processo de medição sendo que, para isto, é necessário efetuar uma análise preliminar da mesma.

Segundo Valdés (1999), as coordenadas dos pontos podem ser consideradas como sendo as entradas desejadas do sistema ou entradas preliminares. Cada um destes pontos apresenta 21 erros geométricos que afetam o resultado da medição. Esses erros geométricos constituem as entradas interferentes do sistema. Também, merece ser destacado que as entradas modificantes, neste caso, temperatura, umidade e vibrações são mantidas sob controle e portanto não há necessidade de inclui-las no modelo.

A combinação dos erros geométricos em cada um dos eixos coordenados é denominada componente do erro volumétrico. Estas três componentes são consideradas as saídas do sistema e podem ser descritas em função da posição. Desta forma, ficam definidas as entradas e saídas do sistema Máquina de Medir “Fig. 1”.

Observe na “Fig. 1” que para a determinação da função de transferência, o sistema Máquina de Medir, pode ser considerado como sendo três subsistemas. Cada um deles com três entradas e uma única saída.

Uma vez definidas as entradas e saídas do sistema, pode-se fazer uma classificação do mesmo. Segundo a teoria exposta em Ogata (1982) e Harris (1996), o sistema “MM3C tipo “Ponte Móvel” é:

- Invariável no tempo: a grandeza do erro volumétrico em qualquer instante de tempo depende somente dos valores das coordenadas “X”, “Y” e “Z” e não do instante do tempo no qual o erro esta sendo medido.
- Contínuo com relação à posição: o erro volumétrico é uma função matemática de uma variável contínua, neste caso, da posição.

- Instantâneo: a magnitude do erro volumétrico em qualquer posição depende somente da posição presente e não dos valores passados ou futuros. A memória do sistema MM3C “Ponte Móvel” é nula.
- O sistema pode ser classificado como MISO: o sistema apresenta múltiplas entradas e uma única saída.

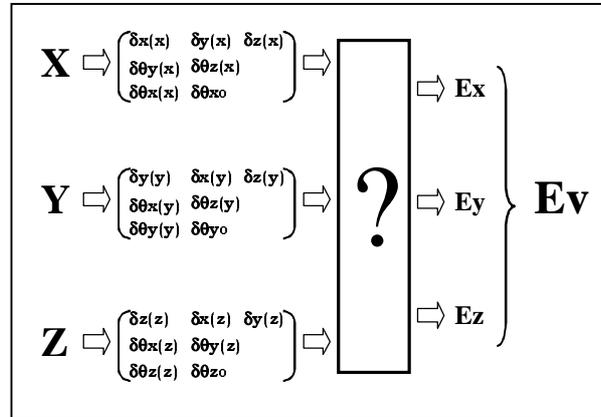


Figura 1 – Representação do sistema Máquina de Medir.

Dada a classificação anterior, a relação entrada-saída do sistema “Máquina de Medir” pode ser expressa através de um modelo matemático que descreve as componentes do erro volumétrico em função da posição “X”, “Y” e “Z”, representado no sistema de “Eq.(1)”.

$$\begin{cases} E_x = f_1(x, y, z) \\ E_y = f_2(x, y, z) \\ E_z = f_3(x, y, z) \end{cases} \quad (1)$$

3. EQUACIONAMENTO MATEMÁTICO

Hoffmann, R. & Vieira, S. (1977); Box et al. (1978); Draper & Smith (1981) e Achcar (1993), falam da possibilidade que as técnicas de regressão oferecem para a determinação da relação existente entre as variáveis envolvidas num determinado experimento. Desta forma, utilizando técnicas de regressão é possível determinar a relação existente entre as coordenadas dos pontos medidos “X”, “Y”, “Z” e as componentes do erro volumétrico E_x , E_y , E_z , usando os dados resultados da calibração direta.

A primeira tentativa na determinação da relação entrada-saída do sistema Máquina de Medir foi propor uma equação de regressão linear múltipla para cada um dos eixos coordenados. Desta forma, para o eixo “X” tem-se:

$$E_{xi} = \beta_0 + \beta_1 X_i + \beta_2 Y_i + \beta_3 Z_i + \varepsilon_i \quad (2)$$

onde

E_{xi} - componente do erro volumétrico na direção “X”, em micrometros.

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ - coeficientes da regressão.

X_i, Y_i, Z_i - coordenadas do ponto i, em milímetros. $i=1, 2, \dots, n$

ε_i - resíduos da regressão.

A “Eq. (2)” é denominada equação de regressão linear múltipla por apresentar múltiplas variáveis independentes. Os estimadores de mínimos quadrados são determinados de forma tal que a soma dos quadrados dos resíduos seja minimizada, ou seja,

$$S(\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3) = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (E_{xi} - \beta_0 - \beta_1 X_i - \beta_2 Y_i - \beta_3 Z_i)^2 \quad (3)$$

neste caso resulta conveniente escrever a regressão múltipla na forma vetorial, “Eq.(4)”.

$$E_x = H\beta + \varepsilon \quad (4)$$

$$\text{onde } H = \begin{bmatrix} 1 & X_1 & Y_1 & Z_1 \\ 1 & X_2 & Y_2 & Z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & X_n & Y_n & Z_n \end{bmatrix}, \quad E_x = \begin{bmatrix} E_{x1} \\ E_{x2} \\ \vdots \\ E_{xn} \end{bmatrix}, \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{bmatrix}; \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

Para o modelo dado na “Eq.(4)” as estimativas dos parâmetros de acordo com o método dos Mínimos Quadrados, os valores previstos e os resíduos podem ser determinados pelas “Eq. (5)”, (6) e (7)”, respectivamente. Para tanto é preciso que $(H'H)$ seja uma matriz invertível.

$$\hat{\beta} = (H'H)^{-1} H'E_x \quad (5)$$

$$\hat{E}_x = H\hat{\beta} \quad (6)$$

$$\hat{\varepsilon} = E_x - \hat{E}_x = E_x - H\hat{\beta} \quad (7)$$

De posse dos dados da calibração do erro volumétrico estes são substituídos no sistema de equações proposto e introduzidos no programa “Estatística”. Como resultado é obtida uma equação para cada componente do erro volumétrico. Embora as três equações encontradas possuam coeficientes de correlação relativamente altos e com um bom comportamento dos resíduos tanto na ordem temporal quanto em relação a cada uma das variáveis independentes, decidiu-se melhorar as mesmas com a inclusão de novos termos independentes. Isto é, incluindo X^2 , Y^2 , Z^2 , XY , XZ e YZ .

$$E_{xi} = \beta_0 + \beta_1 X_i + \beta_2 Y_i + \beta_3 Z_i + \beta_4 X_i^2 + \beta_5 Y_i^2 + \beta_6 Z_i^2 + \beta_7 X_i Y_i + \beta_8 X_i Z_i + \beta_9 Y_i Z_i + \varepsilon_i \quad (8)$$

Como pode ser notado a “Eq. (8)” é não linear, denominada quadrática. Assim, considera-se importante fazer uma transformação nas variáveis independentes com o objetivo de facilitar o cálculo dos coeficientes de regressão. Neste caso, recomenda-se a substituição direta das variáveis, como segue:

$$Z_1=X; \quad Z_2=Y; \quad Z_3=Z, \quad Z_4=X^2; \quad Z_5=Y^2; \quad Z_6=Z^2, \quad Z_7=XY; \quad Z_8=XZ; \quad Z_9=YZ$$

Como resultado desta transformação obtém-se a “Eq. (9)”.

$$E_{xi} = \beta_0 + \beta_1 Z_{1i} + \beta_2 Z_{2i} + \beta_3 Z_{3i} + \beta_4 Z_{4i} + \beta_5 Z_{5i} + \beta_6 Z_{6i} + \beta_7 Z_{7i} + \beta_8 Z_{8i} + \beta_9 Z_{9i} + \varepsilon_i \quad (9)$$

A “Eq. (9)” é uma equação de regressão linear múltipla, com nove variáveis independentes, uma variável dependente e dez coeficientes. Antes de fazer o cálculo dos coeficientes, foram testadas as significâncias de cada um deles. Somente foram calculados os coeficientes das variáveis independentes que estão altamente correlacionadas com a resposta ou variável dependente, obtendo-se assim, a melhor equação de regressão. O procedimento utilizado para selecionar as variáveis significativas na regressão foi o chamado “stepwise” Draper & Smith (1981). Posteriormente, procede-se ao cálculo dos mesmos com a conseguinte substituição no modelo proposto. Desta forma, é obtida a equação matemática que descreve a relação entrada-saída do sistema Máquina de Medir” na direção preferencial “X”.

De forma similar foram propostas equações de regressão para equacionar as componentes do erro volumétrico em “Y” e “Z”. A seguir estão dadas estas equações.

$$\begin{cases} E_x = 0,0875*Z - 0,03428*Y + 0,00003*X^2 + 0,00006Z^2 + 0,00031*Y^2 - 0,00015*XZ \\ E_y = 0,08204*X - 0,70775*Z + 0,00011*Y^2 + 0,00011*Z^2 - 0,00005*YX \\ E_z = 0,10429*Z - 0,06733*X + 0,01186*Y + 0,00015*Z^2 - 0,00008*Y^2 - 0,00002*ZX \end{cases} \quad (10)$$

4. LEVANTAMENTO DAS COMPONENTES DO ERRO VOLUMÉTRICO NA MÁQUINA DE MEDIR A TRÊS COORDENADAS

Através do método de calibração direta, volume dividido, foram levantadas as componentes do erro volumétrico da MM3C. Inicialmente foi efetuada uma análise da máquina para definir a posição onde seria colocado o sistema de referência ou sistema 0 (zero). O sistema de referência foi colocado no ponto (0, 0, -260mm) com relação ao zero da máquina.

O volume a modelar foi dividido por linhas retas paralelas a cada um dos eixos, formando uma rede com um total de 308 geratrizes “Fig. 2”. Os pontos de medida foram definidos a partir do sistema de referência na intercepção das geratrizes, obtendo-se assim, 2145 pontos.

Os valores do erro de posição foram levantados ao longo de cada uma das geratrizes utilizando o interferômetro laser da Hewlett Packard modelo HP5528A. O processo de medição foi passo a passo e a coleta de dados automática.

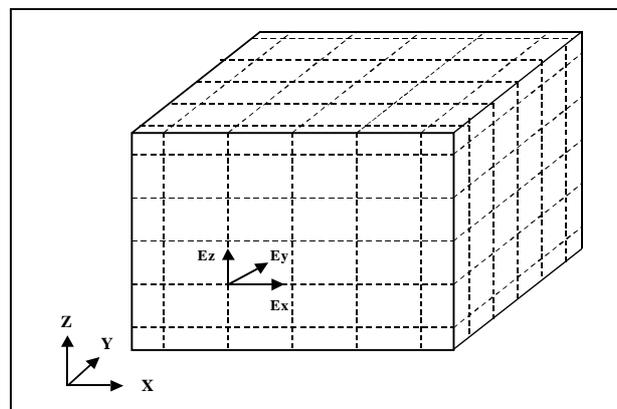


Figura 2 - Representação dos diferentes planos de medição.

Nos planos “XZ”, definidos por valores constantes da coordenada “Y”, foram levantadas as componentes E_x para diferentes valores da coordenada “Z”.

Nos planos “YZ”, definidos por valores constantes da coordenada “X”, foram levantadas as componentes E_y para diferentes valores da coordenada “Z”.

Nos planos “XY”, definidos por valores constantes da coordenada “Z”, foram levantadas as componentes E_z para diferentes valores da coordenada “Y”.

O procedimento de calibração “volume dividido” permite a medição direta das componentes do erro volumétrico E_x , E_y e E_z , como sendo erros de posição. Estes erros são medidos ao longo de linhas retas, paralelas a cada um dos eixos coordenados e os resultados destas medições levam em consideração a influência de todas as fontes de erros, dentre elas, os braços de Abbé. O erro de posição, propriamente dito, é calculado como sendo a diferença entre o valor indicado pela máquina e o valor indicado pelo laser, “Eq. (11)”. Onde E_i representa as componentes E_x , E_y ou E_z , segundo o caso.

$$E_i = \text{Erro de posição} = \text{Indicação da máquina} - \text{Indicação do laser} \quad (11)$$

Cada geratriz foi medida 5 vezes no sentido de ida e cinco vezes no sentido de volta. A partir destes dados foram construídas as superfícies de erros para cada plano de medição. Como resultado da calibração foram obtidos três conjuntos de dados ou amostras, a partir dos quais determinou-se as equações matemáticas que descrevem as componentes do erro volumétrico.

5. ANÁLISE DOS DADOS.

Para cada componente do erro volumétrico foram apresentados sete gráficos que contém as superfícies do erro medido nos sete planos de medição. Estes gráficos apresentam informações para uma avaliação da relação entrada-saída do sistema Máquina de Medir.

A “Fig. 3” apresenta um gráfico referente à componentes do erro volumétrico “ E_x ”, para um dos planos de medição.

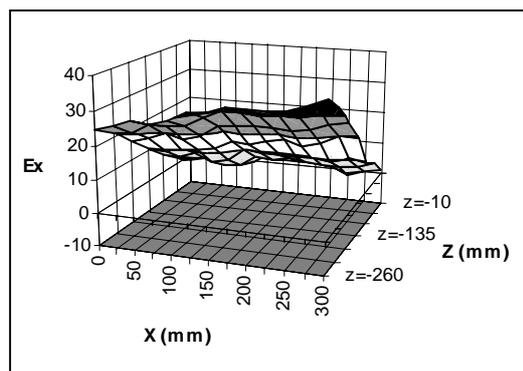


Figura 3 - Superfície de erro E_x para um plano de medição.

6. AVALIAÇÃO DO MODELO PROPOSTO.

O modelo proposto, obtido através do uso de técnicas de regressão, exige uma avaliação estatística. No entanto, o referido modelo, foi avaliado, também, comparando os resultados previstos pelo modelo com o método normalizado ANSI/ASME B89.4.1 (1995).

6.1. Avaliação estatística do modelo.

Na avaliação estatística do modelo o primeiro passo consiste no cálculo do coeficiente de correlação amostral “ r^2 ”. Em seguida foi efetuada uma análise completa dos resíduos, isto é, verificada a independência dos mesmos e a constância da variância. De acordo com este critério, é efetuada uma análise dos gráficos dos resíduos em função de cada uma das variáveis independentes x_i , dos resíduos em função dos valores previstos \hat{y} e dos resíduos em função do tempo. A normalidade dos resíduos foi verificada através de gráficos de probabilidade normal e de histogramas. A caracterização das possíveis tendências da distribuição dos resíduos foi efetuada através dos valores da média, do desvio padrão e dos coeficientes de Kurtosis e de Skewness.

6.2. Avaliação através da comparação com o método normalizado ANSI/ASME B 89.4.1 (1995).

Uma outra verificação do modelo proposto foi efetuada através da comparação dos resultados previstos pelo modelo com os resultados obtidos na calibração da máquina utilizando-se uma barra de esferas. A norma ANSI/ASME B 89.4.1, (1995) especifica a medição de uma barra de esferas não calibrada em 20 posições e orientações diferentes no volume de trabalho da máquina. No entanto, decidiu-se utilizar uma barra de esferas com comprimento nominal conhecido e efetuar a calibração em 12 das 20 posições recomendadas. Os posicionamentos selecionados da barra envolvem posições paralelas às direções dos eixos, nas diagonais dos planos “XY”, “XZ” e “YZ” e nas diagonais volumétricas. Estas posições selecionadas permitem avaliar o modelo proposto satisfatoriamente.

A calibração com barra de esferas consiste na determinação da distância entre os centros das esferas da barra. Envolve a medição dos diâmetros das esferas e o cálculo de seus centros.

Para as distintas posições, as esferas foram medidas 4 vezes, em 4 pontos diferentes e coletadas as coordenadas X, Y e Z. É requisito indispensável que estes pontos sejam linearmente independentes.

Utilizando a equação da esfera e o método dos Mínimos Quadrados foram calculadas as coordenadas dos centros das esferas e suas respectivas médias em cada posição, fazendo uso das coordenadas dos pontos medidos. Em seguida calculou-se a dimensão real da barra (D_{BR}), como a diferença entre a dimensão da barra medida (D_{BM}) e o erro volumétrico, “Eq. (12)”.

$$D_{BR} = D_{BM} - E_V \quad (12)$$

Como é sabido para os distintos pontos, pertencentes ao volume de trabalho da máquina, os vetores dos erros volumétricos podem apresentar direções diferentes entre si e diferentes da direção na qual a barra foi medida. Portanto, antes do cálculo da dimensão real da barra os erros volumétricos devem ser projetados na direção de medição, ou seja, na direção da barra.

Para isto, através das equações de regressão obtidas e fazendo uso do aplicativo “Excel”, foram sintetizados os valores numéricos das componentes do erro volumétrico nas coordenadas dos centros das esferas calculadas. De posse dos valores dos erros volumétricos, procede-se à projeção dos mesmos na direção de medição. Para tanto deve-se calcular os cossenos diretores que definem a orientação da barra dentro do volume de trabalho da máquina e multiplicar cada componente pelo cosseno diretor correspondente.

Desta forma a distância entre os centros das esferas da barra, pode ser calculada pela “Eq. (13)”, onde D_{BMxi} , D_{BMyj} e D_{BMzk} representam as projeções da barra em cada um dos eixos coordenados.

$$D_{BM} = D_{BMxi} + D_{BMyj} + D_{BMzk} \quad (13)$$

Os ângulos diretores que definem a posição da barra com as direções OX, OY e OZ são designados por α , β e γ . Desta forma, a D_{BM} pode ser escrita conforme “Eq. (14)”, onde as quantidades $\cos\alpha$, $\cos\beta$ e $\cos\gamma$ são denominadas cossenos diretores da D_{BM} .

$$\begin{aligned} D_{BM} &= D_{BMi} + D_{BMj} + D_{BMk} \\ &= C_1 C_2 \cos\alpha i + C_1 C_2 \cos\beta j + C_1 C_2 \cos\gamma k \\ &= C_1 C_2 (\cos\alpha i + \cos\beta j + \cos\gamma k) \end{aligned} \quad (14)$$

Tem-se que: $\cos\alpha = D_{BMx}/D_{BM}$; $\cos\beta = D_{BMy}/D_{BM}$ e $\cos\gamma = D_{BMz}/D_{BM}$

Como dito anteriormente, as projeções das componentes E_x , E_y e E_z na direção da barra, denotadas por E_{Bx} , E_{By} e E_{Bz} , podem ser calculadas pelas seguintes expressões:

$$E_{Bx} = E_x \cos\alpha \quad (15)$$

$$E_{By} = E_y \cos\beta \quad (16)$$

$$E_{Bz} = E_z \cos\gamma \quad (17)$$

O erro volumétrico que a máquina comete na medição do comprimento da barra (E_B), na direção de medição é dado por:

$$\begin{aligned} E_{B1} &= E_{Bx1} + E_{By1} + E_{Bz1} \\ E_{B2} &= E_{Bx2} + E_{By2} + E_{Bz2} \\ E_B &= E_{B2} - E_{B1} \end{aligned} \quad (18)$$

O valor de E_B calculado é corrigido da D_{BM} obtendo-se a denominada D_{BR} .

Para se conhecer a eficácia do modelo proposto na previsão do erro volumétrico é preciso determinar a diferença entre os valores da distância real calculados e a dimensão padrão, denotada por D_{BP} . A dimensão padrão da barra de esferas determina-se através da calibração. Para tanto, foi utilizada uma máquina universal de medir, fabricada pela Societe Genevoise D’Instruments de Physique (SIP), tipo 302 M, cuja resolução e incerteza são 0,1 μm , e $\pm 0,1 \mu\text{m}$, respectivamente. Tanto a distância entre as extremidades das esferas quanto seus diâmetros foram medidos 9 vezes. Os valores das médias e dos desvios padrões foram calculados e usados para determinação da distância padrão entre centros das esferas. Como resultado tem-se que o comprimento ou dimensão padrão da barra é de $197,486 \pm 0,001 \text{ mm}$.

De posse da distância real e da distância padrão é determinada a diferença entre estes valores, “Eq. (19)”. Esta diferença é denominada “Erro Residual”.

$$\text{Erro Residual} = D_{BR} - D_{BP} \quad (19)$$

A partir dos resultados deste cálculo foi efetuada uma análise para avaliar a adequabilidade do modelo. Esta adequabilidade está condicionada a valores de “Erro residual” muito próximos de zero, distribuídos normalmente.

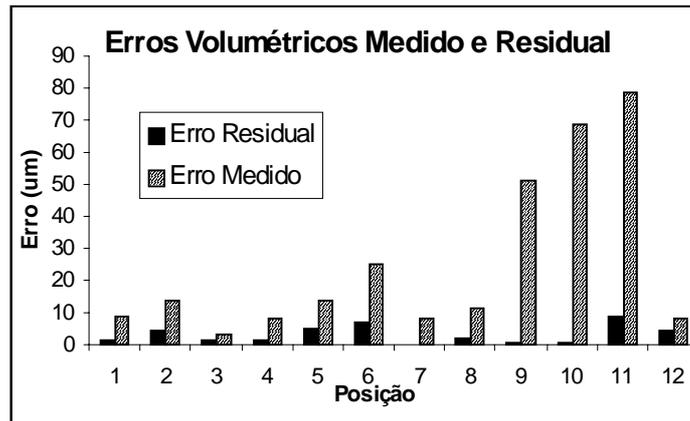


Figura 4. Resultados da Comparação com o método da Norma ANSI/ASME B89 4 1 (1995)

7. CONCLUSÕES

Através do presente trabalho foram obtidas equações matemáticas que descrevem a relação entrada-saída de uma Máquina de Medir a Três Coordenadas do tipo “Ponte Móvel”. Estas equações permitem determinar a grandeza do erro volumétrico num ponto qualquer do volume de trabalho da máquina avaliada. No final tem-se as seguintes conclusões:

- As equações de regressão que descrevem as componentes do erro volumétrico nas direções X, Y e Z, apresentam coeficientes de correlação de 99,19%, 99,93% e 98,15%, respectivamente.
- Os valores numéricos dos resíduos para cada uma das equações do modelo proposto são de $\pm 4\mu\text{m}$, $\pm 4\mu\text{m}$ e $\pm 2\mu\text{m}$, para cada uma das direções preferenciais “X”, “Y” e “Z”, respectivamente. Como consequência disto, caso seja implementado um sistema de compensação a partir do modelo, independentemente da posição de medição, o erro volumétrico cometido após a compensação, não ultrapassará $\pm 6\mu\text{m}$.
- A variável Z, que neste caso representa a coordenada Z dos pontos medidos é quem mais influência tem nos valores numéricos das componentes do erro volumétrico nas três direções.
- O método proposto pode ser estendido à totalidade das MM3Cs. Sendo sua aplicação mais adequada nas MM3Cs com maior grau de automação. Com isto o tempo de experimentação requerido na aplicação do método de calibração “Volume dividido” pode ser sensivelmente reduzido.
- Quando comparado com a sintetização o modelo proposto se mostra matematicamente mais simples e não precisa da calibração dos 21 erros geométricos.

REFERÊNCIAS.

- ACHCAR, J. A. “Planejamento de experimentos em engenharia e industria”. Notas de aula, ICMSC. EESC-USP, 1993.
- ANSI/ASME B 89.4.1 “Methods for performance evaluation of coordinate measuring machines. 1995.
- BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G. & HUNTER, J. S. “Statistic for experimenters – an introducing to desing, data analysis, and model building. John Wiley & Sons. New York. p. 1-653, 1978.
- DRAPER, N. R. & SMITH, H. “Applied regression analysis”, Charter 10: An introduction to Nonlinear Estimation, p. 458-529. 1981.

HARRIS, C. M., "Shock and vibration Handbook", Quarta edição, McGRAW-Hill, New York, p. 21.8; 21.21; 22.9; 23.9; 27.8, 1996.

HOFFMANN, R. & VIEIRA, S. "Análise de regressão". Editora HUCITEC, São Paulo, 1977.

KUNZMANN, H. & WALDELE, F. "Performance of CMMs", Annals of the CIRP, vol. 39/2, p. 633-640, 1988.

OGATA, K. "Engenharia de controle moderno". Editora prentice/hall do Brasil, Rio de Janeiro, 1982. Capítulo 4, Modelos matemáticos de sistemas físicos.

SNEDECOR & COCHRAN, "Statistical methods". Sixth edition, cap. 15, p. 447-471, USA, 1972.

VALDÉS. A. R. "Equacionamento das componentes do erro volumétrico em Máquinas de Medir a Três Coordenadas". Dissertação de Mestrado. EESC-USP. São Carlos. São Paulo. Brasil.

HIBRID MODEL FOR CALCULATION OF VOLUMETRIC ERRORS COMPONENTS OF CMM

Abstract. The accuracy and the repeatability of measurements of Three Coordinates Measuring Machines (CMM) are affected by several errors. Among them, geometrical errors are the most influents in the most experimental cases. The result of geometric errors combination in each of the preferentials directions is denominated of volumetric error components. Thus, its possible to know the existent relationship between coordinates of measured points and volumetric error components. Several methods have been proposed to model the behavior of the volumetric error in CMM as a function of the X, Y and Z coordinates. However, sofar from experimental measurements of the volumetric error no mathematical model for the descriptions and characterizations of errors has been proposed. In this work is presented a general methodology to obtain a mathematical equation and prediction of the components of the volumetric errors, using multiple regression. The methodology was applied at a of "Moving Bridge" CMM type. Were obtained three regression equations, one for each component of the error, starting from data collected by direct calibration, specifically by the divided volume method. The model was evaluated statistically. The simulated results were evaluated, discussed and compared with the results obtained through the ball bar calibration, showing an excellent capacity of the model in the prediction of the volumetric error of the machine.

Keyword: Quadratic model, Calibration, ball bar.