

SISTEMA PARA COMPENSAÇÃO DE ERROS EM UMA MÁQUINA DE MEDIR A TRÊS COORDENADAS

Alessandro Marques

Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Trabalhador São-Carlense, 400 – Centro – São Carlos – SP – CEP: 13566-590

E-mail: amarques@sc.usp.br

Benedito Di Giacomo

Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Trabalhador São-Carlense, 400 – Centro – São Carlos – SP – CEP: 13566-590

E-mail: bgiacomo@sc.usp.br

Roberto Hideaki Tsunaki

Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Trabalhador São-Carlense, 400 – Centro – São Carlos – SP – CEP: 13566-590

E-mail: rtsunaki@sc.usp.br

Resumo. *Este trabalho apresenta os principais resultados da aplicação de uma estratégia de compensação de erros desenvolvida para Máquinas de Medir a Três Coordenadas (MM3Cs). O sistema de compensação de erros foi desenvolvido a partir de um modelo matemático denominado Modelo Reduzido de Sintetização de Erros (MRSE). O MRSE torna possível a correção dos pontos coordenados através da utilização de expressões algébricas para as componentes do erro volumétrico. Estas expressões foram desenvolvidas a partir de uma análise geométrica da MM3C e os dados utilizados na sintetização dos erros foram obtidos por calibração indireta. A calibração foi realizada utilizando barra de furos e esquadro. O modelo desenvolvido foi testado e validado medindo-se peças padrões: blocos e anéis padrões. Os resultados alcançados mostram uma correção efetiva dos erros acima de 60%. Este trabalho descreve em detalhes o desenvolvimento do modelo e dos ensaios realizados, além da análise dos resultados. A utilização da estratégia de compensação só foi possível através do desenvolvimento de uma interface eletrônica e computacional para uma MM3C pertencente ao Laboratório de Metrologia da EESC/USP.*

Palavras-chave: *Máquinas de Medir a Três Coordenadas (MM3C), compensação de erros, interface computacional, interface eletrônica.*

1. INTRODUÇÃO

O controle de processo e garantia de qualidade na fabricação moderna depende cada vez mais das Máquinas de Medir a Três Coordenadas (MM3Cs) que nos últimos anos têm substituído os equipamentos convencionais de inspeção. Com grande flexibilidade as MM3Cs podem reduzir o custo no controle de qualidade enquanto ao mesmo tempo aumenta a eficiência da inspeção. Na metrologia convencional os elementos geométricos são na maioria das vezes medidos independentemente uns dos outros, com diferentes instrumentos de medição, utilizando-se de diferentes montagens e diferentes sistemas de referência. Por outro lado, na metrologia a três coordenadas, as medições são feitas através de ajustes de pontos coordenados, em um sistema de coordenadas que pode ser colocado na peça, por esse motivo geralmente não é necessária mais de

uma montagem e as medições podem ser feitas utilizando apenas o apalpador de medição e varias características podem ser medidas durante o mesmo processo de medição (HOCKEN⁽¹⁾, 1977; NI e WÄLDELE⁽²⁾, 1995).

As MM3Cs são sistemas complexos de medição, que possuem a capacidade de medir coordenadas cartesianas em determinado volume de trabalho. A máquina simula mecanicamente um sistema de coordenadas cartesianas capaz de gerar as coordenadas de um ponto no espaço. As MM3Cs não têm a ação natural de medição, na verdade elas apenas tomam pontos coordenados, através do apalpador, e enviam estes pontos ao microcomputador dedicado. Um programa computacional calcula as características da medição desejada. O programa computacional é uma das peças mais importante no processo de medição, pois é ele que ajusta os pontos coordenados obtidos através do toque do apalpador, a um modelo matemático em termos de parâmetros específicos de dimensão, forma e localização.

O sistema eletrônico e os programas computacionais utilizados durante as medições são inacessíveis e rígidos. São exemplos clássicos desta rigidez as características pré-estabelecidas pelo programa, ou métodos de ajustes utilizados na definição das grandezas (KREJCI⁽³⁾, 1995; KUNZMANN e WÄLDELE⁽⁴⁾, 1985). Para quebrar esta rigidez, foi confeccionada uma placa de aquisição para as réguas ópticas para capturar pontos coordenados da MM3C e desenvolvido um programa computacional para manipulação desses valores.

Além disso, no programa computacional, chamado de *MaqMed 2000*, foi desenvolvida sub-rotinas que utilizam as equações do Modelo Reduzido de Sintetização de Erros, apresentado por ZIRONDI⁽⁵⁾ em 2002, para a correção das coordenadas dos pontos. A calibração da MM3C foi feita utilizando uma barra de furos e um esquadro mecânico.

Para a validação do Sistema proposto foi feita a medição de peças-padrão e análises dos resultados obtidos, através da utilização do *MaqMed 2000* em situações práticas.

O sistema proposto foi aplicado e testado em uma Máquina de Medir a Três Coordenadas, tipo “Ponte Móvel”, do Laboratório de Metrologia, da Escola de Engenharia de São Carlos – USP.

Os itens a seguir mostram: como foi desenvolvido o interfaceamento entre a Máquina de Medir e o microcomputador para aquisição dos sinais; o programa computacional *MaqMed 2000*; a modelagem matemática que combina os erros de maneira adequada; além da calibração e resultados obtidos.

2. INTERFACEAMENTO

Os programas computacionais que são utilizados pelas MM3Cs não podem ser modificados pelo usuário. Por isso, foi preparado um sistema cujo esquema pode ser visto na Figura 1. Nessa Figura pode-se observar a MM3C, sua Unidade Central de Processamento (CPU) e as ligações que foram necessárias para a aquisição dos valores das réguas e do apalpador de medição.

O sistema implementado tem como função capturar, através de uma saída *A quad B*, e enviar para um microcomputador, o sinal das três escalas da MM3C, antes que este sofra qualquer influência da CPU da MM3C.

Ainda na Figura 1, pode-se ver dois cabos entrando no microcomputador, um possui os sinais *A quad B* das réguas ópticas e o outro, o sinal de *trigger* do apalpador de medição.

Os sinais, tipo *A quad B*, das réguas ópticas são enviados para a CPU da MM3C, e são A_x e B_x , A_y e B_y e A_z e B_z referentes as coordenadas X, Y e Z respectivamente. Uma saída *A quad B* foi construída na CPU da MM3C para adquirir esses sinais.

O microcomputador equipado com a placa de aquisição, e o programa computacional *MaqMed 2000* recebe os sinais *A quad B*. O sinal do apalpador de medição (sinal de *trigger*) passa por uma interface comercial da Renishaw, *Probe Interface PI4-2*, e é enviado para um controlador que ajusta a largura de pulso.

O sinal de *trigger*, depois de ajustado pelo controlador de largura de pulso, percorre dois caminhos: um que vai até a CPU da MM3C e outro que vai para um isolador óptico e para o

microcomputador. O isolador óptico é utilizado para que haja uma proteção elétrica entre a MM3C e a placa.

Com os sinais X, Y e Z das réguas ópticas e o sinal de *trigger* do apalpador de medição disponíveis no microcomputador, pode-se fazer qualquer tipo de manipulação numérica ou computacional.

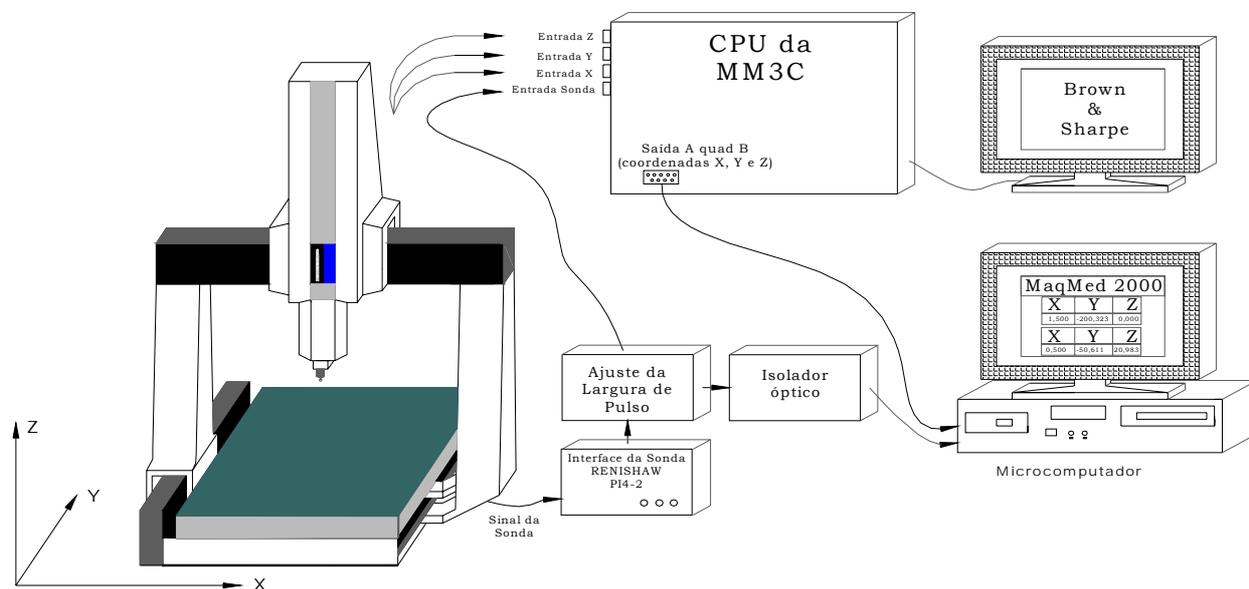


Figura 1. Descrição do Sistema

A placa de aquisição que recebe os sinais da régua óptica é composta por dois dispositivos principais, um CPLD (Dispositivo Programável para Lógica Complexa) da marca Altera tipo EPF7128, e um microcontrolador PIC 16C64 (ENCINAS e MOREIRA⁽⁶⁾, 1999). Tal placa foi confeccionada pela T&S Equipamentos Eletrônicos projetada para a leitura dos sinais em quadratura das escalas dos três eixos da MM3C, além do “congelamento” destas leituras quando um sinal do apalpador for enviado. Esta placa é conectada ao barramento ISA de um microcomputador, responsável pelo controle do sistema e visualização da leitura, através de um programa desenvolvido em *Borland Delphi™* versão 6.0.

O microcomputador que hospeda a placa deverá ler a posição dos três eixos, simultaneamente e em qualquer instante. Tal leitura deverá ser realizada com mínimo atraso, a partir do sinal de *trigger* externo que é gerado pelo apalpador de medição.

A principal vantagem desta placa é o seu projeto otimizado especificamente para esta máquina e para o desenvolvimento dos programas computacionais, objetivos deste trabalho. Para tanto, o projeto da placa também envolve a especificação de bibliotecas de vínculo dinâmico (DLLs) com todas as funções necessárias para a implementação e programação dos algoritmos aqui desenvolvidos, testados e validados experimentalmente.

3. O PROGRAMA COMPUTACIONAL MAQMED 2000

O programa computacional utilizado na MM3C foi desenvolvido em ambiente *DELPHI™*. A programação visual *DELPHI™* é apropriada para a manipulação de dados e possui fácil implementação. Isso deve-se ao fato de existir uma biblioteca de componentes visuais (VCL) disponível, ou seja, o programador não precisa implementar rotinas para a construção de botões, janelas, gráficos e outros, para que o programa fique com visual agradável e de fácil utilização.

O aplicativo *MaqMed 2000* consiste em uma série de janelas e menus que convida o usuário a selecionar e desenvolver as tarefas de medição.

A Figura 2 apresenta o fluxograma do *MaqMed 2000*, onde pode ser visualizado os passos computacionais para medição a três coordenadas, que são: a escolha da medição, a coleta dos pontos através do apalpador, a compensação das coordenadas, o ajuste dos pontos e a apresentação dos resultados.

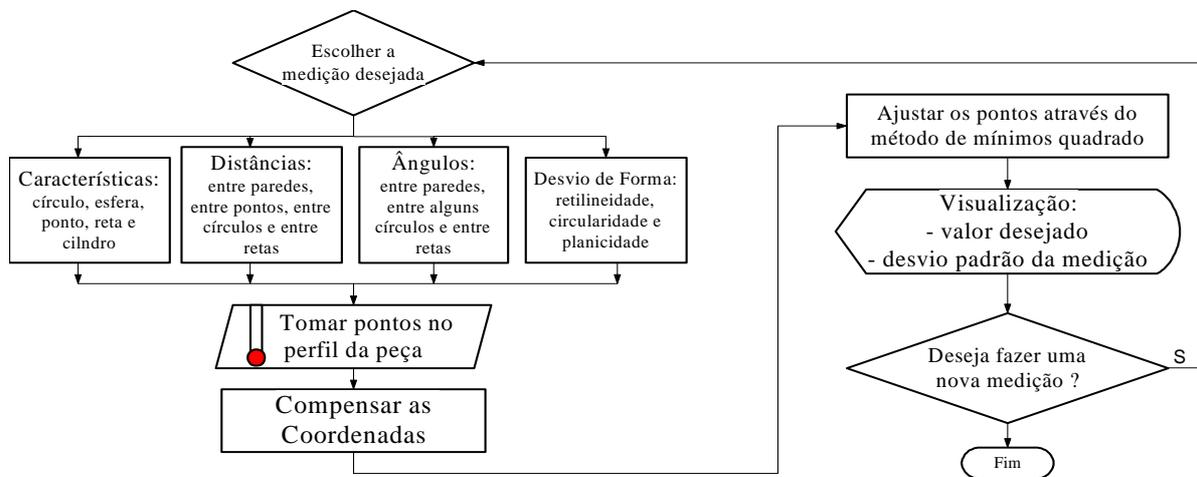


Figura 2: Fluxograma de medições

4. MODELAGEM MATEMÁTICA

Um modelo matemático, denominado Modelo Reduzido de Sintetização de Erros (MRSE), que combina as influências dos erros geométricos em cada direção preferencial da máquina será utilizado para determinar o erro de posicionamento da ponta do apalpador, em qualquer direção X, Y ou Z, de qualquer ponto coordenado. O MRSE é desenvolvido a partir de uma análise geométrica da máquina, e as expressões das componentes do erro volumétrico são determinadas através da soma do erro de posição e parcelas de correções (MARTINEZ ORREGO⁽⁷⁾, 1999; ZIRONDI⁽⁵⁾, 2002). Tais expressões são extremamente simples e requerem um número menor de calibrações, o que reduz o tempo dos ensaios. Uma das características interessantes desse modelo é a simplicidade da análise de propagação das incertezas dos pontos coordenados. O modelo, combinado com um método de calibração adequado, permite estabelecer uma cadeia de rastreabilidade para as medições efetuadas na MM3C analisada.

Tabela 1: Erros na direção Y

Componentes do Erro Volumétrico	Erro geométrico	Movimento em	Braço em
Y	Posição	Y	
	Retilidade X direção Y	X	
	Retilidade Z direção Y	Z	
	Erro angular <i>Yaw</i> do eixo Y	Y	X
	Erro angular <i>Pitch</i> do eixo Y	Y	Z
	Erro angular <i>Pitch</i> do eixo Z	Z	Z
	Erro angular <i>Roll</i> do eixo X	X	Z
	Ortogonalidade XY		X
	Ortogonalidade YZ		Z

O MRSE permite determinar o erro de posicionamento em qualquer direção: X, Y ou Z, de qualquer ponto coordenado, a partir de medições das barras de furos e do esquadro mecânico em 15 geratrizes.

A primeira providência a ser tomada para modelar a MM3C é definir a posição onde deve ser colocado o sistema de coordenadas de referência. Este sistema foi posicionado sobre o desempenho de granito, o mais próximo possível da guia do eixo Y.

Definida a posição do sistema de referência, uma análise geométrica da estrutura da máquina foi efetuada com o propósito de definir a contribuição de cada erro geométrico nas suas direções preferenciais.

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos com a análise geométrica da MM3C, na direção Y, a mesma análise foi feita para os eixos X e Z. As contribuições de segunda ordem foram desprezadas por serem consideradas insignificantes.

De posse das informações obtidas com a análise geométrica da máquina, formularam-se as equações reduzidas de sintetização para E_x , E_y e E_z .

4.1. Expressão da Componente Y do Erro Volumétrico

Considere duas geratrizes, denotadas por G_1 e G_i , no plano XY, paralelas ao eixo Y, com coordenadas X diferentes. A geratriz G_1 localizada o mais próximo possível da escala Y para que os efeitos dos braços de Abbé fossem minimizados. Desta forma, obtém-se o erro de posição do eixo Y, propriamente dito. A Figura 3 apresenta, esquematicamente, as geratrizes G_1 e G_i .

Na Figura 3, dois pontos P_1 e P_i pertencentes respectivamente, às geratrizes G_1 e G_i , têm coordenadas que diferem apenas na coordenada X.

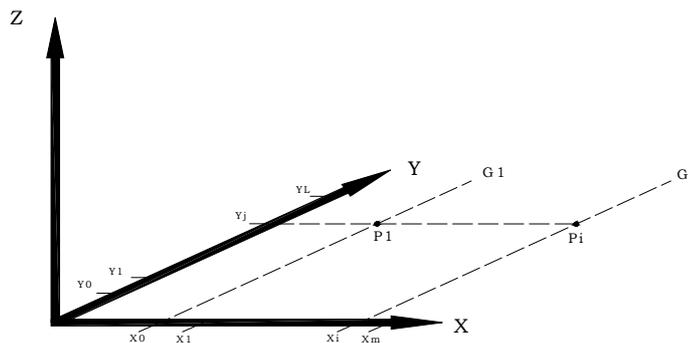


Figura 3: Representação das geratrizes G_1 e G_i no plano XY

Os valores medidos dos erros em P_1 e P_i são diferentes. Essas diferenças devem-se aos movimentos angulares cujas contribuições dependem da posição X (braços em X) e influências dos erros com a mudança da posição X_0 para a X_i . De acordo com a análise geométrica, Tabela 1, os erros que provocam diferenças no erro de posicionamento da ponta do apalpador na direção Y, no plano XY, são: *Yaw* do eixo Y, *Ortogonalidade XY*, *Roll* do eixo X e *Retilidade X* na direção Y. Assim sendo, supondo que seja conhecido o erro de posição, na direção Y, do ponto P_1 pode-se determinar o erro em P_i através da Equação (1).

$$E_Y(X_i, Y_j, Z_0) = E_Y(X_0, Y_j, Z_0) + \text{Retilidade Y}(X) + \text{Yaw}(Y) \cdot [\text{braço X}] + \text{Roll}(X) \cdot [\text{braço Z}] + \text{Ortogonalidade XY} \cdot [\text{braço X}] \quad (1)$$

onde: $E_Y(X_0, Y_j, Z_0)$ é o erro de posição do eixo Y em um ponto P_1 arbitrário pertencente à geratriz G_1 ; $E_Y(X_i, Y_j, Z_0)$ é o erro de posição do eixo Y em um ponto P_2 , localizado em uma geratriz G_i qualquer, paralela a G_1 no plano XY; e os braços X e Z são distâncias nas respectivas direções X e Z, entre o apalpador e o eixo Y.

Procedendo a análise de forma semelhante, pode-se avaliar E_Y em qualquer posição do volume de trabalho da MM3C. Para tanto, considere um ponto P_k pertencente a uma geratriz contida no plano YZ e paralelo a Y .

Observando-se a Figura 4, pode-se dizer que a diferença no posicionamento de P_i e P_k , na direção Y , se deve aos movimentos angulares que dependem de braços em Z e dos erros com movimentação na direção Z . De acordo com a Tabela 1, os erros que provocam diferenças no posicionamento relativo de P_2 e P_3 são: Retilidade Z direção Y , *Pitch* do eixo Y , *Pitch* do eixo Z , *Roll* do eixo X e Ortogonalidade YZ . Como o erro angular *Roll* do eixo X já foi considerado na Equação (1) tem-se que o valor de E_Y no ponto P_3 pode ser escrito em função do valor de E_Y no ponto P_2 pela Equação (2). Nessa expressão, $E_Y(X_i, Y_j, Z_k)$ é o valor da componente Y do erro volumétrico em um ponto (X_i, Y_j, Z_k) qualquer do volume de trabalho da MM3C.

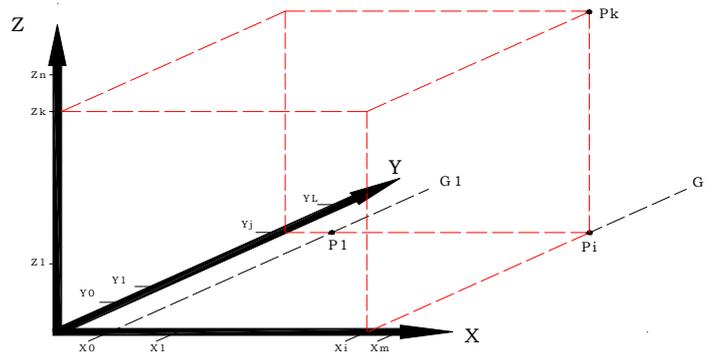


Figura 4: Representação de pontos pertencentes ao volume de trabalho da MM3C

$$E_Y(X_i, Y_j, Z_k) = E_Y(X_i, Y_j, Z_0) + \text{Retilidade } Y(Z) + \text{Pitch}(Y) \cdot [\text{braço } Z] + \text{Pitch}(Z) \cdot [\text{braço } Z] + \text{Ortogonalidade } YZ \cdot [\text{braço } Z] \quad (2)$$

Substituindo a Equação (1) na Equação (2) tem-se a equação de sintetização de E_Y , válida para qualquer ponto do volume de trabalho da MM3C, Equação (3). Nessa equação, o termo Ortogonalidade foi simplificado por Ort.

$$E_Y(X_i, Y_j, Z_k) = E_Y(X_0, Y_j, Z_0) + \text{Retilidade } Y(X) + \text{Retilidade } Y(Z) + \text{Yaw}(Y) \cdot [\text{braço } X] + \text{Pitch}(Y) \cdot [\text{braço } Z] + \text{Pitch}(Z) \cdot [\text{braço } Z] + \text{Roll}(X) \cdot [\text{braço } Z] + \text{Ort } XY \cdot [\text{braço } X] + \text{Ort } YZ \cdot [\text{braço } Z] \quad (3)$$

Para se determinar o valor de E_Y em qualquer posição do volume de trabalho da MM3C, é necessário quantificar a contribuição de todos os erros geométricos que aparecem na Equação (3).

De acordo com a Equação (3), a parcela que corresponde à contribuição do erro *Yaw* do eixo Y , na direção Y do erro volumétrico, é diferente e proporcional à coordenada X desses pontos.

A parcela de E_Y correspondente ao erro *Yaw* do eixo Y , em qualquer ponto (X_i, Y_j, Z_k) do volume de trabalho da MM3C pode ser obtida a partir de medições efetuadas em duas geratrizes distintas diferentes em um dado plano XY . Como os braços na direção Z não interferem nos resultados, o plano XY que contém as geratrizes pode estar em qualquer posição Z . Assim sendo, o erro *Yaw* do eixo Y em qualquer posição espacial pode ser calculado pela Equação (4), onde: $\delta(X_1, Y_j)$ é o posicionamento do ponto j medido na geratriz G_1 . Neste caso temos braço em X mínimo. $\delta(X_M, Y_j)$ é o posicionamento do ponto j medido na geratriz G_2 (geratriz paralela a G_1 , no

plano XY), localizado na posição X_M do eixo X (braço em X é máximo); $d_yawY(X_i, Y_j)$ é o erro *Yaw* do eixo Y no ponto (X_i, Y_j, Z_k) qualquer

$$d_yawY(X_i, Y_j) = \frac{\delta(X_M, Y_j) - \delta(X_1, Y_j)}{X_M - X_1} \cdot (X_i - X_1) \quad (4)$$

Esta mesma análise foi feita para os outros erros e a expressão do MRSE para sintetizar E_Y , é dada pela Equação (5).

$$E_Y(X_i, Y_j, Z_k) = E_Y(X_0, Y_0, Z_0) + d_yawY(X_i, Y_j) + d_pitchY(Y_j, Z_k) + d_YZ(Z_k) + d_XY(X_i, Z_k) \quad (5)$$

As equações para as componentes do erro volumétrico X e Z foram desenvolvidas da mesma forma e obtiveram-se as Equações (6) e (7).

$$E_X(X_i, Y_j, Z_k) = E_X(X_i, Y_0, Z_0) + d_pitchX(X_i, Z_k) + d_YX(Y_j, Z_k) + d_XZ(Z_k) \quad (6)$$

$$E_Z(X_i, Y_j, Z_k) = E_Z(X_0, Y_0, Z_0) + d_ZY(X_i, Y_j) + d_ZX(X_i) \quad (7)$$

5. CALIBRAÇÃO DA MM3C

O MRSE determina o erro de posicionamento em qualquer direção: X, Y ou Z, de um ponto do volume de trabalho da MM3C, a partir de erros medidos em 15 geratrizes. Estes erros ocorrem na direção do movimento ou perpendicular ao movimento.

Os erros que ocorrem na direção do movimento foram determinados a partir de medições efetuadas com uma barra de furos. São eles: os erros de posição dos eixos X, Y e Z e os erros $d_yawY(X_i, Y_j)$, $d_pitchY(Y_j, Z_k)$ e $d_pitchX(X_i, Z_k)$.

Os erros que ocorrem perpendicularmente à direção do movimento ($d_YZ(Z_k)$, $d_XY(X_i, Z_k)$, $d_YX(Y_j, Z_k)$, $d_XZ(Z_k)$, $d_ZY(X_i, Y_j)$ e $d_ZX(X_i)$) foram medidos com um esquadro de granito, também conhecido como esquadro mecânico, e um apalpador eletrônico do tipo LVDT.

Das quinze geratrizes onde são medidos os erros, em nove são utilizados o esquadro mecânico e o apalpador eletrônico LVDT e em seis a barra de furos.

Tanto a Barra de Furos quanto o esquadro mecânico são, convenientemente, posicionados no volume de trabalho da MM3C. Estas posições são determinadas analisando-se a influência dos braços de Abbè sobre os erros individuais.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para validar todo o Sistema (interfaces máquina/computador/operador) foram feitas medições de um bloco padrão e de um anel padrão, em diversas posições e orientações no volume de trabalho da MM3C. Os pontos coordenados foram tratados no programa computacional que possui as rotinas de medição. Os resultados obtidos foram comparados aos valores dos cálculos com os pontos coordenados sem a influência da compensação.

O programa computacional *MaqMed 2000* utiliza-se das equações do MRSE para compensar os erros da MM3C analisada, no programa tem sub-rotinas que calculam, por exemplo, diâmetro de um furo ou distância entre paredes, utilizando valores sem e com compensação de erros. Foram feitas medições utilizando um artefato padrão em várias posições da MM3C.

Na primeira etapa foram feitas medições lineares de distâncias entre paredes. Foi utilizado um bloco padrão de 100 mm de comprimento nominal, posicionado no volume de trabalho da máquina com as fases de medição no plano YZ e no plano XZ. O bloco padrão foi colocado ainda em duas posições diferentes em Z.

As posições ocupadas pelo bloco padrão durante o experimento podem ser verificadas no esquema da Figura 5. Foram tomados vários pontos em uma das faces do bloco e calculada a equação de uma reta através do Método dos Mínimos Quadrados, na outra face tomou-se um ponto coordenado, então foi calculada a distância entre a reta e o ponto.

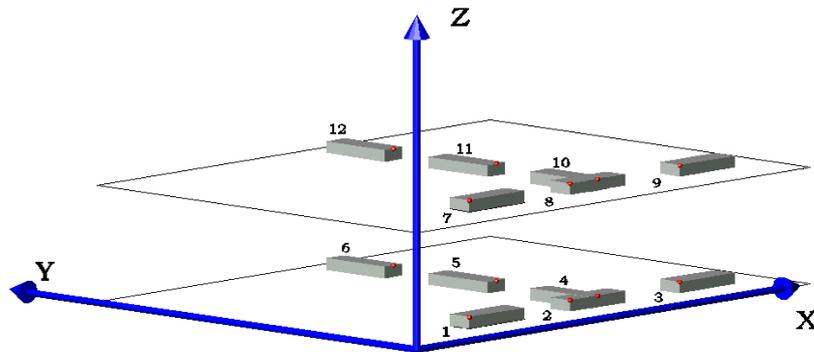


Figura 5: Posições ocupadas pelo bloco padrão durante o experimento

Os pontos vermelhos que podem ser visualizados na Figura 5 são os pontos coordenados onde foram medidos os blocos.

Nos valores obtidos pôde-se verificar que as distâncias calculadas sem compensação variam para as medições na posição e de uma posição para outra, enquanto os resultados utilizando os valores compensados mostraram alta acuracidade nos resultados. O desvio padrão encontrado para todas as medições em todo volume de trabalho diminuíram de 9,1 μm e 5,3 μm para 3,6 μm e 2,7 μm respectivamente.

Foi verificado através do certificado de calibração do bloco padrão, da caixa de grau 0 da TESA, que o valor nominal do bloco é de 100,001 mm e adotado este valor como valor verdadeiro. Calculou-se então os resíduos dos valores encontrados para cada posição analisada, ou seja, fez-se a diferença entre o valor calculado com compensação e sem compensação com o valor verdadeiro.

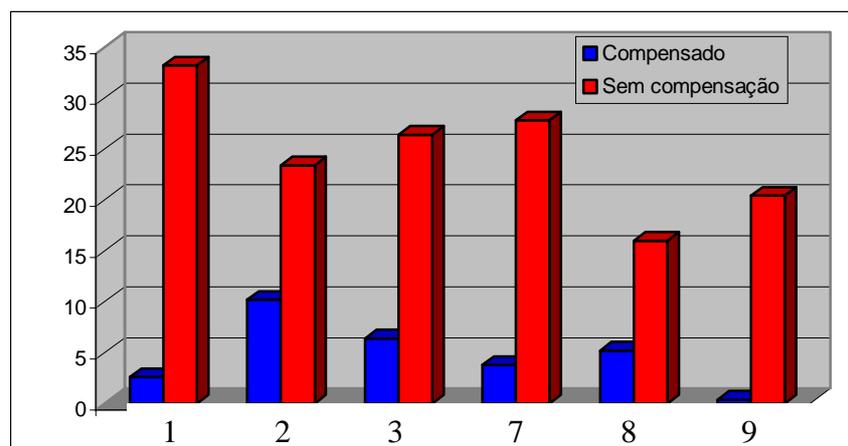


Figura 6: Resíduos na medição da distância na direção X (μm)

Na abscissa do gráfico da Figura 6 tem-se os números das posições ocupadas pelo bloco padrão durante o experimento e na ordenada os resíduos. Verifica-se que os valores dos resíduos sem compensação são iguais ou menores que 33,2 μm , enquanto após a compensação, na pior dos casos,

não ultrapassam 10,2 μm . Nesta direção de medição o *MaqMed 2000* permitiu uma ótima redução dos erros, no melhor dos casos de 98% e no pior de 65%.

Nos valores obtidos pode-se verificar, que as distâncias que foram calculadas sem compensação variam para as medições na posição e de uma posição para outra, enquanto os resultados utilizando os valores compensados também variam, mais possuem maior acuracidade. O desvio padrão encontrado para todas as medições em todo volume de trabalho variam de 4,9 μm e 2,8 μm para 3,4 μm e 2,9 μm respectivamente.

No gráfico da Figura 7 pode-se verificar que os valores dos resíduos calculados com compensação são iguais ou menores a 3,4 μm , e sem a compensação, a tendência dos erros foram aumentar chegando a -11,5 μm . Na direção de medição Y o *MaqMed 2000* não proporcionou uma redução dos erros tão acentuada chegando a no máximo 80%, e em média 60%.

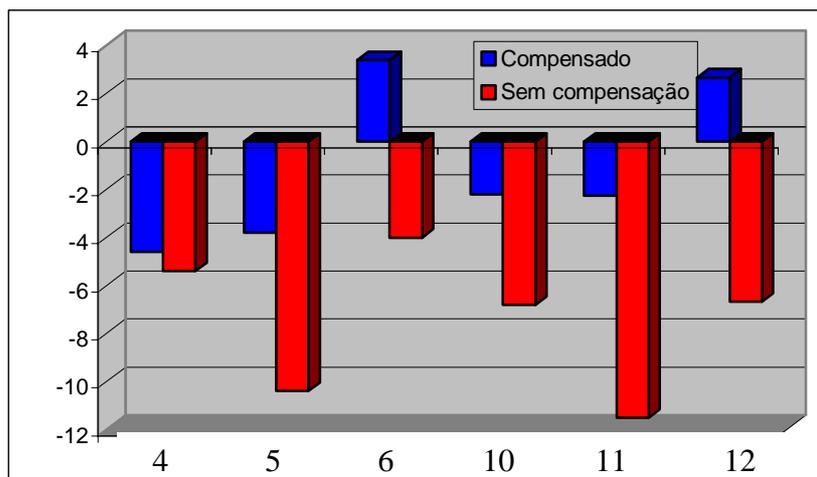


Figura 7: Resíduos na medição da distância na direção Y (μm)

Após uma análise minuciosa em relação aos resíduos observados nas posições 6 e 12, chegou-se a conclusão que, estes valores não refletem qualquer problema no modelo proposto, isto ocorreu devido às extrapolações lineares adotadas. Por serem posições de final de curso da máquina, não foi possível a medição dos erros, por impossibilidade de colocação da barra de furos e do esquadro mecânico, foi feita então a extrapolação dos valores seguindo o modelo proposto. Esse problema pode ser resolvido através de um ajuste fino do modelo.

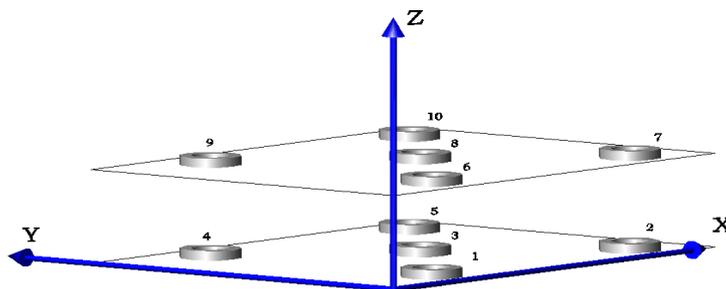


Figura 8: Posições ocupadas pelo anel padrão durante o experimento

Na medição do anel padrão, as posições que foram ocupadas pelo artefato durante o experimento, podem ser visualizadas na Figura 8. O anel padrão utilizado é de 120 mm de diâmetro nominal, foi medido a 20°C depois de estabilizado.

Nos valores obtidos pode-se verificar que os diâmetros que foram calculados sem compensação variam para as medições na mesma posição e de uma posição para outra, enquanto os resultados utilizando os valores compensados não há grandes variações em nenhum dos dois casos. O desvio padrão encontrado quando verificadas todas as medições em todo volume de trabalho diminuiram

de 3,2 μm e 3,5 μm para 1 μm e 1,3 μm respectivamente. O que mostrou-se muito bom em relação ao modelo de sintetização de erros e os ensaios realizados.

Na medição com anel padrão pode-se aleatorizar os efeitos dos erros pois as medições são feitas na direção X e Y e nos sentidos de ida e volta.

O anel padrão foi pré-calibrado na SIP, e o valor nominal encontrado foi de 120,0112 mm e esse valor foi adotado como valor verdadeiro. Os cálculos dos valores dos resíduos foram feitos através das médias das cinco posições e do valor verdadeiro.

No gráfico da Figura 9 pode-se verificar que os valores calculados sem compensação têm amplitudes de 6,6 μm , e após a compensação, as amplitudes caem para aproximadamente 2,0 μm . Pode-se verificar que na medição de diâmetros, onde a medição é feita em todas as direções e sentidos o *MaqMed 2000* permitiu uma redução dos erros que pode ser considerada ótima, na média de 85%.

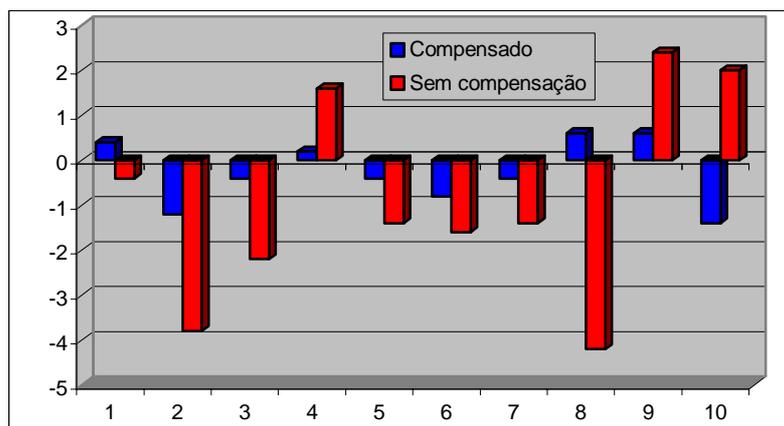


Figura 9: Resíduos na medição do diâmetro (μm)

7. CONCLUSÕES

A estratégia de compensação e o modelo de erros utilizados mostraram um alto grau de eficiência, compensando os erros dentro de uma margem entre 60% a 95%, dependendo do elemento geométrico medido e da posição de medição.

A calibração necessária para a sintetização do MRSE pôde ser realizada utilizando artefatos relativamente simples, como a barra de furos e o esquadro de precisão, e não foi necessária a realização de um número elevado de ensaios.

A utilização da barra de furos e do esquadro mecânico trouxe várias vantagens, entre elas a possibilidade de utilização do sistema de apalamento e da estratégia de medição, podendo assim inserir as incertezas relacionadas a esse sistema. Outra vantagem é que os artefatos foram calibrados com instrumentos pertencentes à cadeia de rastreabilidade, assim os erros medidos e calculados são rastreáveis a unidade fundamental.

O modelo e os artefatos utilizados reduzem sensivelmente os conjuntos de dados utilizados para a compensação dos erros da máquina.

O Sistema proposto pode ser aplicado em outras máquinas e outras configurações de máquinas. O MRSE também pode ser aplicado em outras máquinas, no entanto deve ser feita uma análise minuciosa de sua estrutura, devido a alterações em vetores de erros e na formação dos grupos de erros.

8. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo suporte financeiro para desenvolvimento desta pesquisa e à Escola de Engenharia de São Carlos pela infra-estrutura oferecida.

9. REFERÊNCIAS

1. HOCKEN, R. et al “Three Dimensional Metrology”. CIRP Annals, v.26, p. 403-408, 1977.
2. NI, J.; WÄLDELE, F. (1995). “Coordinate Measuring Machine” in: BOSCH, J.A. “Coordinate Measuring Machines and systems”. p.39-74. New York, Marcel Dekker, Inc.
3. KREJCI, J.V. (1995). “Application software” in: BOSCH, J.A. “Coordinate Measuring Machines and systems”. p.103-122. New York, Marcel Dekker, Inc.
4. KUNZMANN, H.; WÄLDELE, F. (1985). “Software correction of coordinate measuring machines”. NPL, Sept.
5. ZIRONDI, R.B. (2002). “Modelo reduzido de sintetização de erros para Máquinas de Medir a Três Coordenadas”. 162p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos-USP, São Carlos.
6. ENCINAS, W. S.; MOREIRA, E. “Hardware and Software Partition With Microcontrollers and CPLDs: A Case Study”, Proc. International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications - PDPTA'99, pp. 3002-3008, Las Vegas, NV, 1999.
7. MARTINEZ ORREGO, R.M. (1999). “Método de calibração direta para máquinas de medir a três coordenadas”. 154p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos-USP, São Carlos.

A SYSTEM FOR ERROR COMPENSATION ON A COORDINATE MEASURING MACHINE

Alessandro Marques

Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Trabalhador São-Carlense, 400 – Centro – São Carlos – SP – CEP: 13566-590
E-mail: amarques@sc.usp.br

Benedito Di Giacomo

Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Trabalhador São-Carlense, 400 – Centro – São Carlos – SP – CEP: 13566-590
E-mail: bgiacomo@sc.usp.br

Roberto Hideaki Tsunaki

Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Trabalhador São-Carlense, 400 – Centro – São Carlos – SP – CEP: 13566-590
E-mail: rtsunaki@sc.usp.br

Abstract: *This work presents the main results of an error compensation strategy developed for Coordinate Measuring Machines (CMMs). The error compensation strategy was based on the development of a mathematical model, namely Modelo Reduzido de Sintetização de Erros (MRSE). MRSE allows coordinate points correction by means of algebraic expressions for volumetric error components. These expressions were synthesized after geometric analysis of the CMM and fitted using indirect calibration. Calibration was achieved using a hole bar and a mechanical square. In order to test and validate the developed model, metrological standards were measured: gauge blocks and rings. Achieved results showed effective error correction above 60%. This work describes the development of both the model and the experimental set-up in detail, as well as the analysis of the attained results. Compensation error strategy could only be applied as a result of the development of an electronic and computational interface for a CMM located at the Laboratory of Metrology at EESC/USP. This work concisely describes the referred interface.*

Keywords: *Coordinate Measuring Machines (CMMs), error compensation, computational interface, electronic interface.*