

AVALIAÇÃO DO ERRO DE RETILINEIDADE, A PARTIR DA CALIBRAÇÃO DO ERRO ANGULAR, DE UMA MM3C.

Benedito Di Giacomo

Prof. Dr. do Dep. Engenharia Mecânica - Escola de Engenharia de São Carlos - USP.

e-mail: bdgiacomo@sc.usp.br

Alessandro Marques

Doutorando;

e-mail: amarques@sc.usp.br

Denise P. V. Sato

Prof^ª. Dr. Associação de Escolas Reunidas de São Carlos – ASSER;

e-mail: pepo@cdcc.sc.usp.br

Resumo. *Fabricantes e usuários de Máquinas de Medir à Três Coordenadas tem grande interesse em desenvolver metodologias que permitam determinar e melhorar o desempenho dessas máquinas. Dentre essas metodologias podem ser destacados os procedimentos de calibração, os sistemas de compensação de erros e os métodos numéricos para tratamento de erros. Atualmente, no modelamento de erros, adota-se a independência entre os erros individuais, entretanto, se analisada a geometria estrutural da máquina, verifica-se a dependência entre os erros de retilineidade e os angulares. Face ao exposto acima é objetivo deste trabalho avaliar o erro de retilineidade em todo o eixo de movimentação da máquina a partir do erro de retilineidade levantado (numa pequena faixa) e o erro angular correspondente. Uma Máquina de Medir a Três Coordenadas da marca Brown & Sharp do tipo Ponte Móvel foi utilizada para a avaliação experimental. Tal formulação além de minimizar o número de calibrações necessárias para o levantamento metrológico da MM3C, permite avaliar o erro de retilineidade numa extensão da guia maior que a faixa permitida pela calibração.*

Palavras-chave: *Máquina de medir a três coordenadas, Erro de retilineidade e Erro angular.*

1. INTRODUÇÃO

Na competição por maiores parcelas de mercado e com o advento do processo de globalização, as empresas tem procurado cruzar fronteiras com seus produtos. Tais produtos devem ter preços competitivos, promoções de vendas e sobretudo qualidade competitiva em mercados internacionais. Dentre muitos aspectos da qualidade um dos importantes é o produto estar de acordo com as especificações técnicas, o que garante a intercambiabilidade e a funcionalidade do mesmo. Para isto existem as especificações técnicas e as normas nacionais e internacionais para garantir a precisão durante a fabricação.

O conceito de precisão de máquinas está mudando juntamente com o desenvolvimento tecnológico. Antes considerada uma característica geométrica da máquina, agora é definida como a capacidade de produzir peças dentro de limites definidos, sem a intervenção substancial do operador e em diferentes condições de trabalho.

As Máquinas de Medir a Três Coordenadas (MM3Cs) neste novo contexto, tornam-se necessárias ao ambiente das indústrias que procuram sistemas de medição flexíveis, rápidos e confiáveis, para a execução do controle dimensional de peças manufaturadas (Sosa Cardoza, 1995).

Entretanto, estas máquinas são instrumentos fundamentalmente mecânicos, e estão sujeitas a erros (Hocken, 1980; Di Giacomo, 1986). Estes erros são inerentes à sua estrutura e nas Máquinas de Medir a Três Coordenadas afetam a qualidade da medição. Os movimentos indesejáveis de cada um dos componentes da máquina são conhecidos como erros geométricos.

Os erros geométricos são divididos em dois grupos, os erros de translação e os erros de rotação de corpo rígido. São considerados erros de translação os erros de posicionamento propriamente dito e de retilineidade, os erros de rotação são os erros conhecidos como *Pitch*, *Yaw* e *Roll*. Se esses erros forem medidos, pode-se, através de um modelo matemático prever o erro total da máquina em todo o seu volume de trabalho (Donmez, 1986; Viera Sato, 1998).

No modelamento das componentes dos erros volumétricos de máquinas adota-se a independência entre os erros de retilineidade e os angulares. Mas, se analisada a sua geometria e o comportamento dos seus erros, pode-se verificar que eles são dependentes. Conhecida essa correlação, o número de calibrações necessárias para levantar o comportamento metrológico da máquina pode ser minimizado.

A calibração do erro de retilineidade com a ajuda do interferômetro laser, em particular, utiliza uma ótica que pode restringir sua avaliação em determinadas faixas na direção do eixo de movimentação, prejudicando assim, a previsão do erro volumétrico da máquina.

Face ao exposto acima é objetivo deste trabalho avaliar o erro de retilineidade em todo o eixo de movimentação da máquina a partir do erro de retilineidade levantado (numa pequena faixa) e o erro angular correspondente.

Para atingir o objetivo proposto foram calibrados os erros de retilineidade de “X” devido ao movimento em “Z” e o erro de *Yaw* “Z” de uma Máquina de Medir a Três Coordenadas do tipo Ponte Móvel do Laboratório de Metrologia da USP - São Carlos.

2. CALIBRAÇÃO DOS ERROS DE RETILINEIDADE “X” E YAW “Z” DEVIDO AO MOVIMENTO “Z”

A calibração do erro de retilineidade “X” ao longo do eixo “Z” e do erro angular *yaw* “Z” foi executada utilizando-se um interferômetro laser. Para a realização das medições observou-se: o alinhamento do sistema laser acima de 90%, tempo de equilíbrio térmico do conjunto de $12 \pm 0,5$ horas, as condições do meio ambiente permaneceram em $20 \pm 1^\circ$ C, umidade relativa do ar em $40 \pm 10\%$ e pressão atmosférica em 693 ± 3 mmHg (Marques, 1999).

A calibração, de cada erro, foi efetuada passo a passo, sendo o erro coletado a cada 25 mm no eixo "Z" de medição. Foram realizados 5 (cinco) ciclos de medição, sendo cinco trajetos no sentido de ida e cinco trajetos no sentido de volta. Para determinar a interferência dos erros de folga e histerese, antes da inversão do sentido de deslocamento, foi realizado o que na literatura é conhecido como “correção de backlash”, isto é, avança-se com o carro pouco além da última posição de leitura no sentido da medição e retorna-se a ele novamente iniciando a leitura no sentido contrário (French & Humphries, 1967).

2.1. Erro de retilidade na direção “X” devido ao movimento no eixo “Z”

A configuração utilizada na calibração do erros de retilidade é mostrada na Fig. 1. Na montagem, um Interferômetro específico para medição de retilidade, o qual contém um “Prisma de Wollaston”, é fixado na parte móvel da máquina entre o canhão laser e os espelhos refletoras que estão fixos à mesa da máquina.

O canhão laser emite um feixe de luz composto pela combinação de dois feixes de frequência muito próximas f_1 e f_2 . O “Prisma de Wollaston” separa os dois feixes que percorrem caminhos diferentes e incidem perpendicularmente nos espelhos inclinados que os refletem com o mesmo ângulo de incidência, retornando ao Interferômetro. Os feixes são então reagrupados e retornam ao ponto de partida no canhão laser. Eventuais variações Δf_1 e Δf_2 indicam mudanças proporcionais ao movimento lateral relativo entre o Prisma de Wollaston e os espelhos. A referência para o erro de retilidade é a bissetriz do ângulo entre os espelhos (Hewlett-Packard, 1996).

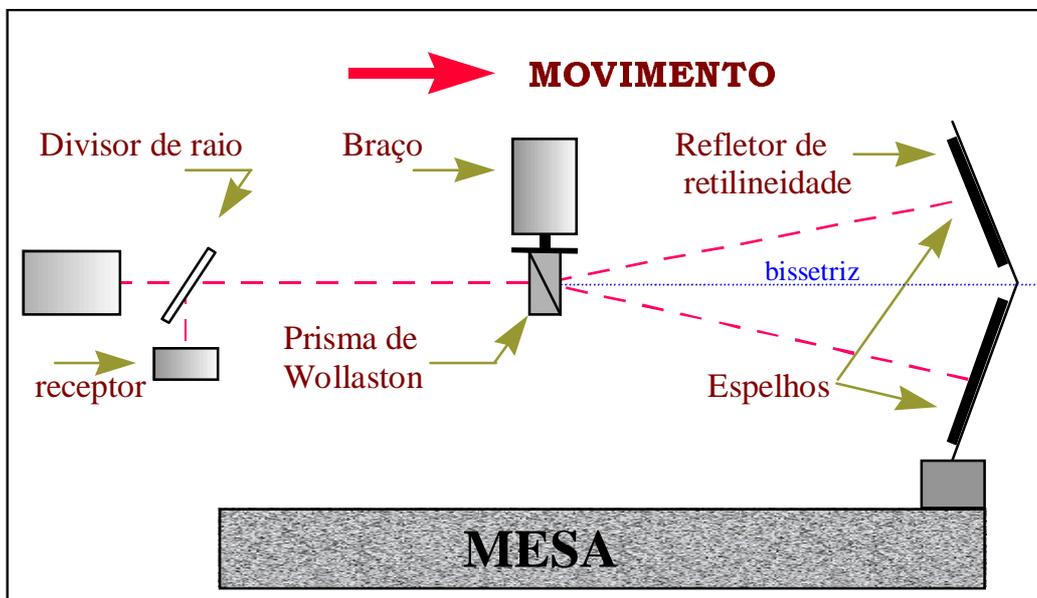


Figura 1 – Princípio interferométrico da medição de erro de retilidade.

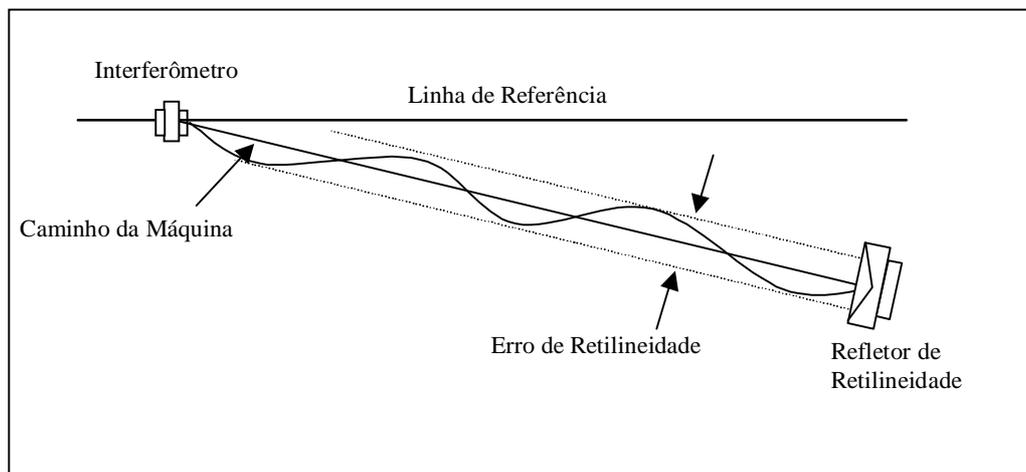


Figura 2: Efeito de desalinhamento na medição de erros de retilidade

Os valores indicados pelo mostrador do laser não correspondem aos valores reais do erro de retilidade. Tais valores tem neles incluídos o desalinhamento entre o feixe de luz laser e a direção de movimentação, Fig. 2. Através do método dos mínimos quadrados ou do método dos pontos extremos, ajusta-se uma curva, que é denominada como equação do desalinhamento. Assim sendo, o erro de retilidade é calculado utilizando a equação dada em (1).

$$\text{Erro de Retilidade} = \left(\begin{array}{l} \text{valor encontrado através da} \\ \text{equação do desalinhamento} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} \text{Valor indicado} \\ \text{na instrumentação} \end{array} \right) \quad (1)$$

O erro de retilidade “X” devido ao movimento em “Z” foi, então, levantado. Devido ao tamanho do conjunto das óticas, aproximadamente 200 mm, necessários para execução da medição, a faixa de calibração não ultrapassou 100 mm. O erro de retilidade foi coletado para as posições Z no intervalo 150 a 250 mm. O gráfico da Fig. 3 mostra o comportamento deste erro, onde as parcelas devido ao desalinhamento já foram eliminadas. Esse gráfico apresenta na abscissas as posições do carro de movimentação Z, em milímetros (mm), onde os valores dos erros foram lidos. Na ordenada estão os valores dos erros, em microns do metro (µm), para os sentidos de ida e de volta e os desvios padrões do sentido de ida.

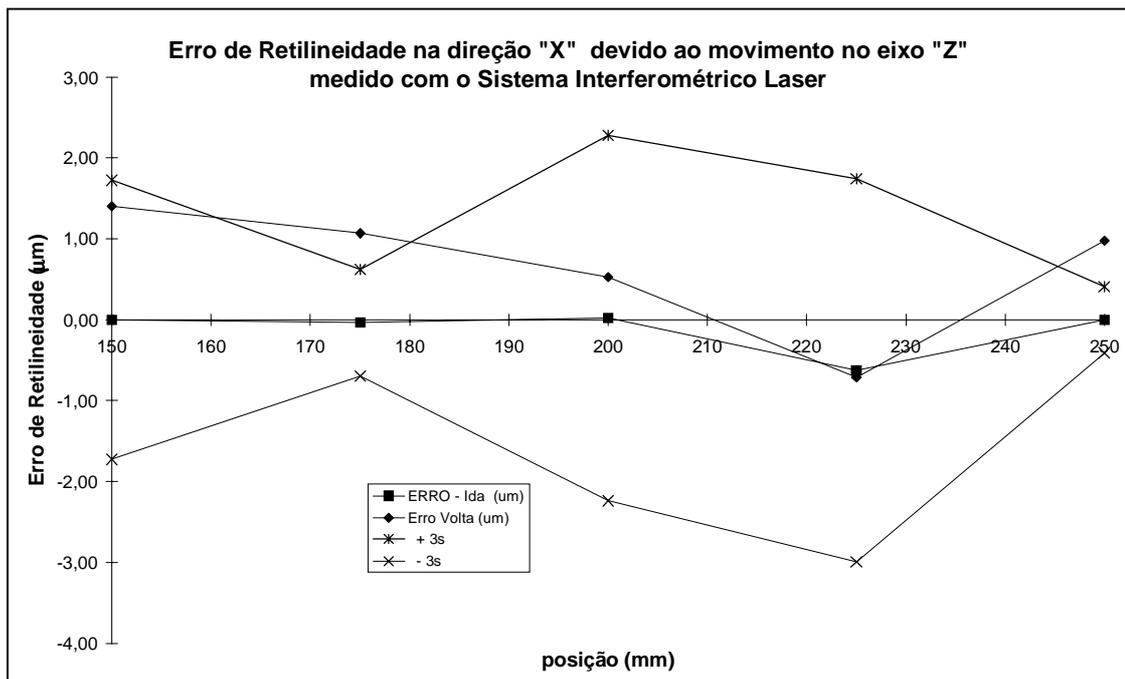


Figura 3–Erro de retilidade em “X” devido ao movimento no eixo “Z”

Analisando o gráfico da Fig. 3 pode-se observar que os erros médios de retilidade no sentido de ida e de volta são extremamente pequenos. No entanto, o erro aleatório é relativamente grande quando comparado com os valores médios. A histerese também é grande.

2.2. Calibração do erro de *Yaw* do eixo “Z”

O erro de rotação em torno do eixo “Y” devido ao movimento no eixo “Z”, *Yaw* “Z”, foi medido na mesma posição de calibração do erro de retlineidade. A calibração foi efetuada posicionando o carro “Z” no intervalo de 0 mm a 250 mm, isto porque, o tamanho do conjunto das óticas para medição angular, aproximadamente 80 mm, é menor do que aquele utilizado na calibração do erro de retlineidade como pode ser observado na Fig. 4.

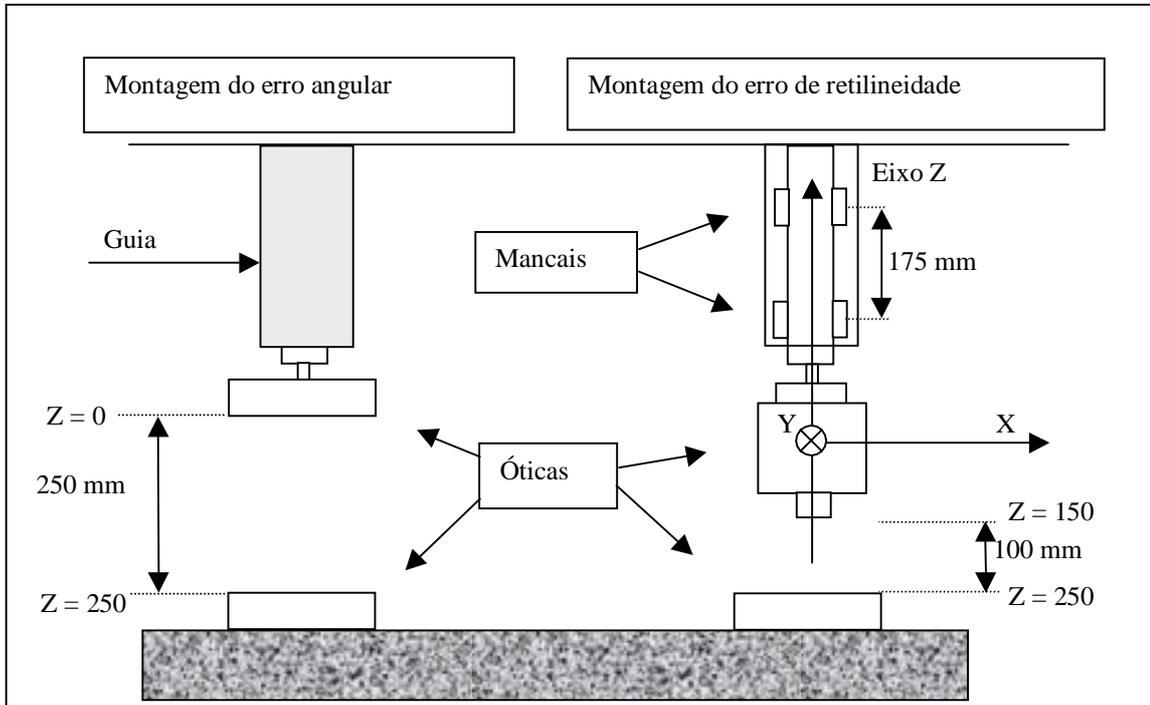


Figura 4 – Esquema das montagens do erro angular e do erro de retlineidade para o eixo “Z” da MM3C.

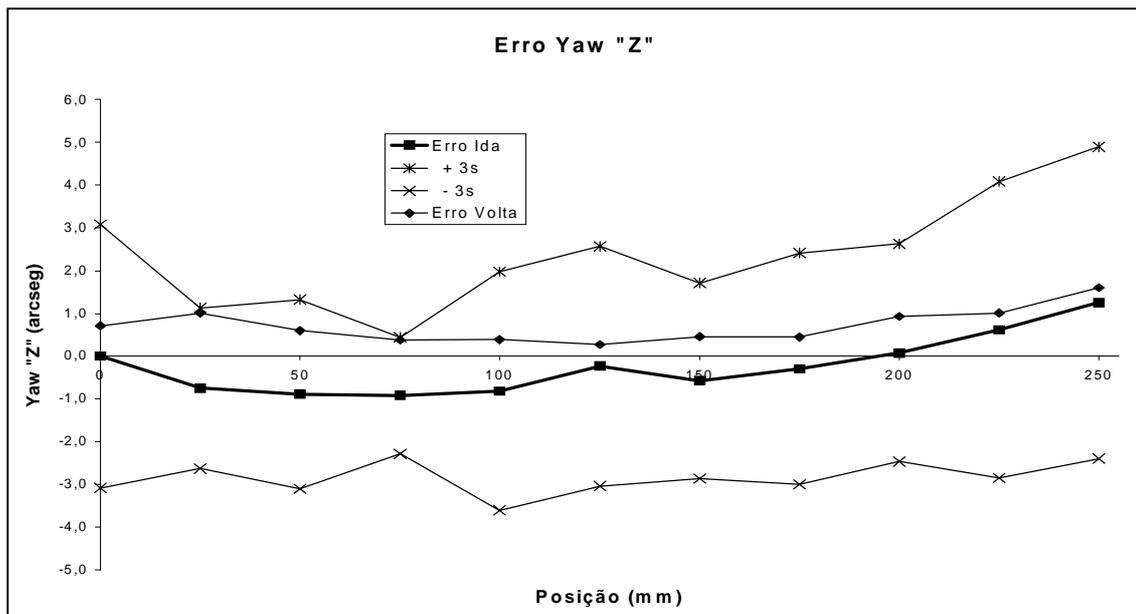


Figura 5 – Erro angular *Yaw* do eixo “Z”

O gráfico da Fig. 5 apresenta o comportamento do erro *Yaw* “Z” da MM3C. Analisando esse gráfico pode-se notar que os valores dos erros são pequenos para os dois sentidos de medição. A histerese também é pequena atingindo um valor próximo de 2 arcsegundos. Além disso, a curva que representa o comportamento do erro no sentido de volta está contida entre as curvas que representam os erros aleatórios de ida. Desta forma, o comportamento do erro angular yaw do eixo “Z” pode ser descrito pelo comportamento do erro de um dos sentido de medição.

3. MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DO ERRO DE RETILINEIDADE EM TODO O EIXO DE MEDIÇÃO

O erro de retilineidade na direção “X” em quase toda a dimensão da guia “Z” foi determinado a partir dos valores obtidos com a calibração do erro angular *Yaw* “Z” e dos dados levantados durante a calibração do próprio erro de retilineidade na direção “X”, na faixa de 0 mm a 100 mm. Para tanto, utilizou-se princípios simples de geometria.

Considere uma posição de medição “p” no intervalo de 150 a 250 mm. O erro de retilineidade e o erro angular em p, podem ser calculados através das curvas de calibração. Sabendo-se que a distância entre os mancais da MM3C avaliada, *b*, é de 175 mm, pode-se então determinar o erro de retilineidade na posição “p±175” utilizando o seno do ângulo, isto é o seno do erro angular em “p”, vide Fig. 6.

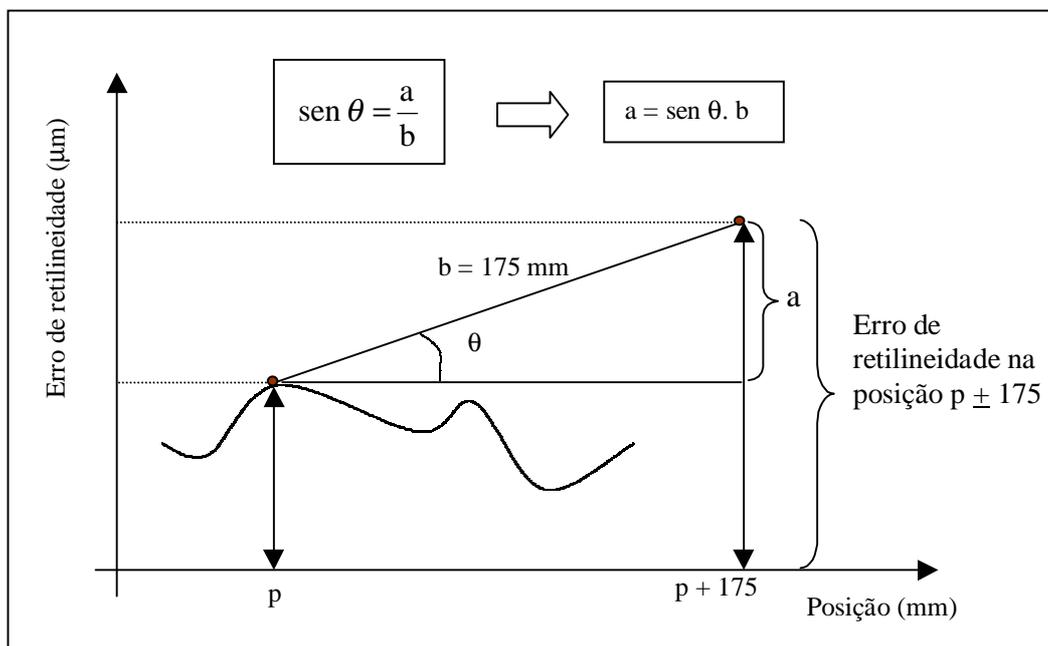


Figura 6 – Esquema para o cálculo trigonométrico

Procedendo desta forma para diversos pontos no intervalo 150 a 250 mm, pode-se então avaliar o erro de retilineidade em quase toda a guia de medição, guia “Z”. O gráfico da Fig. 7 mostra o erro de retilineidade do sentido de ida assim calculado. Analisando esse

gráfico pode-se verificar que o erro de retlineidade é extremamente pequeno em todo o eixo de movimentação. A avaliação no sentido de volta é análoga.

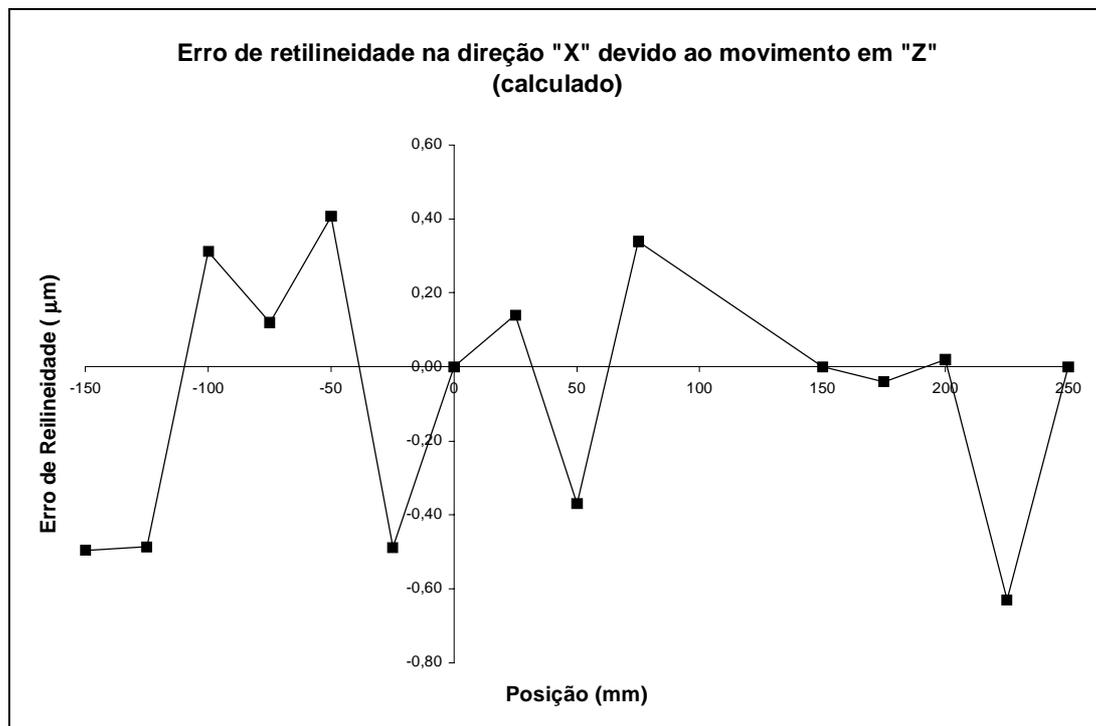


Figura 7 – Erro de retlineidade do eixo “Z”

4. CONCLUSÕES

Devido as óticas necessárias para calibrar o erro de retlineidade, em muitas máquinas não é possível levantar esse erro em toda a faixa de medição, prejudicando dessa forma a avaliação do seu erro volumétrico. O objetivo deste trabalho é levantar o erro de retlineidade “X” devido ao movimento em “Z” em todo o eixo de movimentação de uma Máquina de Medir a Três Coordenadas. Tal levantamento foi realizado utilizando os dados obtidos durante a calibração do próprio erro de retlineidade, numa pequena faixa de medição, e dos dados do erro *Yaw* “Z”. A metodologia utilizada é extremamente simples e possibilita a avaliação rápida do erro em todo eixo examinado.

REFERÊNCIAS

- DI GIACOMO, B. (1986). *Computer aided calibration and hybrid compensation of geometric errors in coordinate measuring machines*. MANCHESTER. 418p. PhD Thesis - THE VICTORIA UNIVERSITY OF MANCHESTER.
- DONMEZ, M. A. et al. (1986). *A general methodology for machine tool accuracy enhancement by error compensation*. Precision Engineering, v.8 n.4 p.187-196
- FRENCH, D. & HUMPHRIES, S. H.. (1967) *Compensation for the backlash and alignment errors in a numerically controlled machine tool by a digital computer programme*. Proceedings of 8th MTD Conference, p. 707-726.

- HEWLETT- PACKARD (1996). *Laser Measuring System Model 5528A- Users Guide: Parts 1 and 2* Santa Clara, USA.
- HOCKEN,R.J. & MACHINE TOOL TASK FORCE (1980). *Machine tool accuracy*. Technology of Machine Tools, vol. 5, Oct.
- MARQUES, A. (1999). *A correlação entre os erros de retilineidade e angulares nas Máquina de Medir a Três Coordenadas*. São Carlos. 131p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos - USP.
- SOSA CARDOZA, J.A. (1995). *Máquinas virtuais de medir a três coordenadas*. São Carlos. 209p. Tese (Doutorado) - EESC - USP.
- VIERA SATO, D. P. (1998). *Uma contribuição ao modelo de sintetização de erros em máquinas ferramentas*. São Carlos. 200p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos - USP.

STRAIGHTNESS ERROR EVALUATION THROUGH ANGULAR ERROR CALIBRATION

Abstract. *Makers and users of Three Coordinate Measuring Machines have great interest in developing methodologies that allow the determination of errors and the improvement of the performance of those machines. Among those methodologies, the calibration procedures, the error compensation systems and the numeric methods for the treatment and analysis of errors are some of the few lately studied. It is already know that it is necessary the previous knowledge of the behavior of the machine errors in order to built an error compensation system. The individual machine errors can be obtained through calibration procedures and they can be combined appropriately through a mathematical model, to generate the expressions of the volumetric errors of the machine. Usually, the independence among the individual errors is adopted when the machine error model is built. However, if the machine geometry is analyzed, the dependence between the straightness error and the angular error can be noted.*

The objective of this work is to evaluate the correlation between the Straightness Error in a certain direction due to the translation movement in another direction and the observed Pitch or Yaw Error. A Brown & Sharp Moving Bridge Coordinate Measuring Machine (CMM) was used for the experimental evaluation. The formulation proposed in this work to express this correlation minimizes the number of calibration necessary to evaluate the machine behavior. The measurement of the Straightness Error in the CMM studied, can only be performed in a range of approximately 100 mm, due to the optics used for the calibration. Our formulation allows to evaluate this guide error in a range larger than the permitted by the calibration procedures.

Keywords: *Three coordinate measuring machines, Straightness error and Angular error.*