

# ERROS CÍCLICOS NAS MÁQUINAS DE MEDIR A TRÊS COORDENADAS

## **Benedito Di Giacomo**

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

## **Márcia Kimie Nakazato**

Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador São Carlense, 400 Centro - CEP 13566-590 - São Carlos - SP – Brasil, e-mail: marciakn@sc.usp.br

## **Roberto Hideaki Tsunaki**

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

**Resumo.** *O propósito deste trabalho é avaliar os erros cíclicos em Máquinas de Medir a Três Coordenadas (MM3Cs). Para atingir este objetivo, foi realizado um procedimento de medição de erros cíclicos e aplicação de Análise de Fourier. A análise dos dados confirmou a existência de um período cíclico de quatro milímetros. Além disso, observou-se que a amplitude da frequência 250 ciclos/m, apresenta tendência crescente a medida que o passo incremental diminui. Os resultados da medição da distância entre as linhas consecutivas da régua móvel comprovaram a existência dos erros de fabricação e sugeriram erros de subdivisão eletrônica.*

**Palavras-chave:** *erros cíclicos, Máquinas de Medir a Três Coordenadas, franjas de Moiré, análise de Fourier.*

## **1. INTRODUÇÃO**

Nos anos 50, a automação de máquinas ferramentas criou a necessidade de meios de medição mais rápidos e flexíveis. Na Escócia, em 1954, esta exigência fez com que a Ferranti desenvolvesse a primeira máquina de medir a coordenadas. Dessa forma, em 1959, a Ferranti introduziu a primeira Máquina de Medir a Três Coordenadas (MM3C) comercial. Essa nova tecnologia propiciou a criação de um amplo mercado no mundo industrial e conduziu o desenvolvimento de máquinas similares com capacidades maiores além de acuracidade e resolução melhores. Nos anos posteriores, os avanços tecnológicos neste campo continuaram bastante significativos e enormes progressos, em relação as MM3Cs, foram alcançados. Assim, nesta primeira década do século XXI, as MM3Cs são consideradas como um dos mais importantes instrumentos empregados na inspeção industrial e no controle de processos de manufatura.

As Máquinas de Medir a Três Coordenadas são sistemas complexos de medição, que possuem a capacidade de medir coordenadas, em um dado volume de trabalho delimitado por suas características físicas e geométricas. Elas são compostas na maioria das vezes por guias e mancais aerostáticos, além de escalas optoeletrônicas que simulam os eixos de um sistema de coordenadas cartesianas. A determinação dos pontos da superfície de uma peça a ser inspecionada é feita através de sondas de medição. Estas máquinas incorporam também programas computacionais responsáveis pelo cálculo das características geométricas e dimensionais das peças medidas.

Nota-se, portanto, que o advento das Máquinas de Medir a Três Coordenadas propiciou um grande avanço na Metrologia dimensional. Entretanto como toda máquina e instrumento de medição, as MM3Cs não têm precisão absoluta e apresentam erros.

O conhecimento dos erros presentes em uma MM3C é muito importante para avaliar o seu desempenho e introduzir sistemas de compensação (Di Giacomo, 1986). Deste modo, quanto ao comportamento, os erros podem ser classificados em aleatórios e sistemáticos. Os erros aleatórios resultam de influências externas e internas, não controladas, que provocam o aparecimento de erros não repetitivos. Os erros sistemáticos são aqueles que podem ser reproduzidos tanto em grandeza quanto em sinal, quando as condições de ensaios são mantidas constantes. Eles são compostos basicamente por erros cíclicos, erros progressivos e histerese. O erro cíclico é qualquer componente que se repete em pelo menos uma vez ao longo do eixo de uma máquina (Hemingray et al, 1971; Di Giacomo, 1986). O erro progressivo é um erro não cíclico, que pode ser crescente ou decrescente. A histerese é definida como sendo o valor da diferença entre os erros médios do trajeto de ida e do trajeto de volta (Hemingray et al, 1971; Di Giacomo, 1986).

Em relação aos erros cíclicos, poucos trabalhos têm sido publicados com o objetivo de conhecer as características, grandezas e fontes bem como formas de minimizar seus efeitos. Uma análise da literatura existente sobre esse tipo de erro, revela que o seu estudo têm sido mais direcionado aos erros de passo nos fusos de avanço das máquinas ferramentas. Neste caso, o projeto e a fabricação dos parafusos utilizados nos mecanismos de avanço dessas máquinas são fatores importantes na definição da acuracidade (Butterworth, 1984). Além disso, quando os “encoders” rotacionais são utilizados em conjunto com os fusos de movimento, o erro periódico é usualmente sincronizado ao passo do parafuso (ASME, 1997; Ioshimoto, 1979; Yamamoto e Otsuka, 1970). Recomenda-se que os erros cíclicos sejam medidos separadamente, em distâncias curtas e utilizando pequenos passos incrementais (Burdekin e Voutsadopoulos, 1982; Tlustý e Koenigsberger, 1970).

Portanto, o estudo dos erros cíclicos nas MM3Cs representa um tema de grande atualidade devido a pouca disponibilidade de trabalhos nesta área e quase nenhuma sugestão quanto ao tratamento para compensação.

## **2. SISTEMA DE MEDIÇÃO DE COORDENADAS DAS MÁQUINAS DE MEDIR**

O sistema de medição de coordenadas das MM3Cs utiliza escalas ópticas dispostas em cada uma de suas três guias ou eixos. Estas escalas utilizam o princípio das Franjas de Moiré que consiste de um sistema optoeletrônico composto de emissor, escala móvel, escala fixa e receptor. O movimento relativo da escala móvel em relação a escala fixa, proporciona uma variação de intensidade de luz no receptor que é medida pelo número de franjas de Moiré e interpretada como deslocamento.

Há uma forte relação entre o desenvolvimento da MM3C e seu sistema de leitura de coordenadas. Assim, uma das principais preocupações dos fabricantes se concentra na melhoria da fabricação das escalas. Recentemente, Israel et al (2003) apresentaram os resultados dos trabalhos interlaboratoriais do Japão e Alemanha feitos com escalas lineares ópticas da MITUTOYO Corporation e DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH, onde propõem a utilização desses artefatos como padrão de transferência.. Pode-se dizer que, a acuracidade do sistema de medição de uma MM3C depende principalmente da qualidade da régua e da graduação. Esta, por sua vez, depende da acuracidade e largura de suas linhas, qualidade das arestas, densidade e tamanho das imperfeições além da homogeneidade das características ópticas como grau de reflexão, transmissão e absorção.

Os erros cíclicos, diferentemente dos erros geométricos e os termicamente induzidos, exercem influência significativa nos resultados das medições efetuadas em comprimentos pequenos. Um dos fatores que contribuem para a ocorrência dos erros cíclicos é a acuracidade limitada dos métodos utilizados na fabricação de escalas. As MM3Cs utilizam escalas desenhadas e fabricadas por métodos fotográficos ou riscadas em máquinas tipo “step and repeat”. Ambos os métodos produzem um erro sistemático entre traços sucessivos. Desta forma, a medida que o número de

traços aumenta as parcelas do erro sistemático somam-se e quando atingem um determinado valor este erro é compensado. Esta correção é feita a cada distância cujo valor corresponde ao de um período cíclico de baixa frequência e o processo repete-se até que toda a escala seja totalmente riscada. Outro fator que contribui para a existência dos erros cíclicos origina-se da resolução exigida pela MM3C, que é sempre bastante alta e ultrapassa as capacidades existentes atualmente para fabricação de escalas. O que se faz para lidar com o problema da resolução é subdividir eletronicamente o espaço entre traços consecutivos da escala. Esta divisão eletrônica está associada a um sinal seno gerado pela observação das franjas de Moiré. A digitalização e subdivisão deste sinal geram erros periódicos, também conhecidos como erros cíclicos de alta frequência.

Como pode ser observado nas máquinas de medir estão presentes dois tipos de erros cíclicos. O primeiro tipo, decorrente do processo de fabricação, é denominado erro cíclico de baixa frequência. O outro tipo, ocasionado pela subdivisão eletrônica é chamado de erro cíclico de alta frequência.

### 3. TESTES EXPERIMENTAIS, RESULTADOS E DISCUSSÕES

A investigação sobre erros cíclicos apresentada neste trabalho foi dividida em três etapas: medição dos passos da escala, levantamento do erro cíclico de baixa frequência e análise do erro cíclico de baixa frequência.

#### 3.1 Medição dos Passos da Escala

Na Fig. (1) está apresentada uma foto da escala móvel da MM3C, sendo as linhas localizadas na parte retangular indicada pela seta.

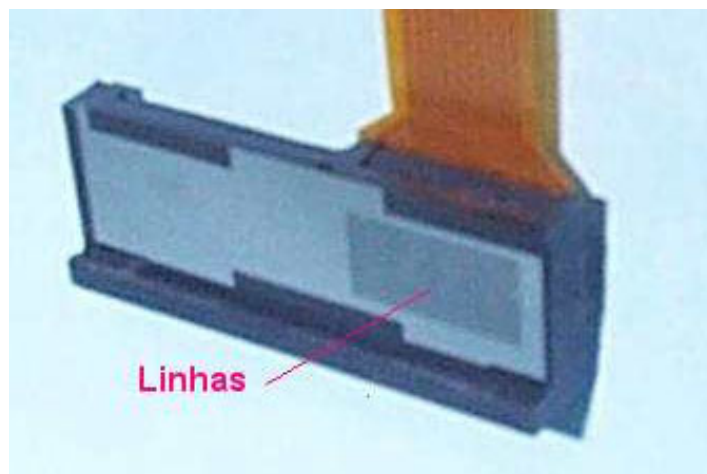


Figura 1. Foto da escala móvel da MM3C

As linhas desta escala foram amplificadas e uma das fotografias está apresentada na Fig. (2). Observa-se a presença de linhas claras e escuras. Deste modo, a distância entre uma linha escura e uma linha clara adjacente compõe um ciclo e denomina-se passo. O passo também está indicado na Fig. (2).



Figura 2. Linhas da escala da MM3C

Com base na resolução da MM3C, o valor esperado para o passo é de aproximadamente  $16\mu\text{m}$ . Porém, observou-se que o valor do passo não é constante e há trechos em que as linhas escuras tornam-se mais grossas e as claras mais finas, ou seja, sugerem a existência de compensação.

Desta forma, foi realizada a medição do passo em aproximadamente 10mm da escala móvel da MM3C. As medições foram feitas sobre a mesa de deslocamento de um microscópio digital BUEHLER. O gráfico contendo os resultados das medições dos passos da escala da MM3C está apresentado na Fig. (3).

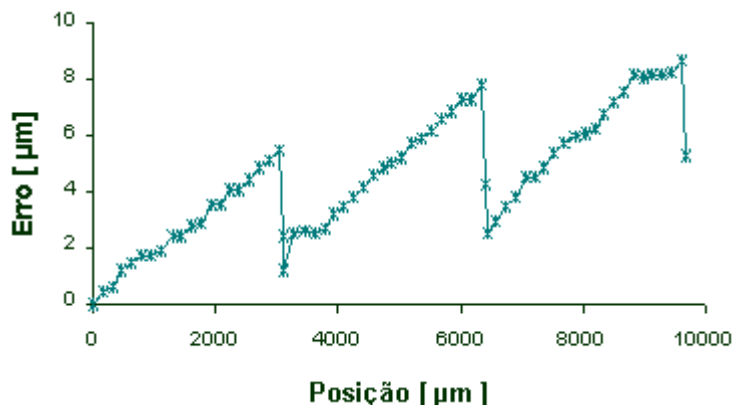


Figura 3. Gráfico resultante da medição do passo

Por meio deste gráfico, foi possível verificar que a compensação do erro cíclico, decorrente do processo de fabricação das linhas da escala, ocorre realmente, a cada distância de aproximadamente 4mm, mas não isenta a máquina de grandes erros dentro do período. Além disso, notou-se a presença de um erro progressivo originado dos resíduos de compensação.

### 3.2 Levantamento do Erro Cíclico de Baixa Frequência

Os experimentos necessários para o levantamento dos erros cíclicos foram conduzidos em uma MM3C do tipo Ponte Móvel, pertencente ao Laboratório de Máquinas Ferramentas da Escola de Engenharia de São Carlos - USP. O instrumento utilizado na determinação dos erros cíclicos foi um interferômetro laser.

No levantamento dos erros cíclicos de baixa frequência os pulsos do encoder da máquina serviram como posição referência capacitando a execução de medidas “on- the-fly”, em que a máquina não pára e a medição é feita quando a posição programada, com passos igualmente espaçados, é atingida. Na Fig.(4), está apresentado o esquema do sistema utilizado para o levantamento do erro cíclico de baixa frequência. Inicialmente, os sinais analógicos das réguas X, Y, Z da MM3C entram na CPU da máquina onde são transformados em sinais digitais e depois passam pela saída AquadB. Em seguida, eles entram na caixa de sinais dos “encoders” pela entrada da régua. O sinal da régua de interesse, no caso Y, é selecionado eletronicamente e prossegue pela saída AquadB do “encoder” Y. Por meio da placa HP 10887 PC Calibrator Board, conectada ao microcomputador, este sinal é introduzido na CPU do laser. Nesta mesma placa também entra o sinal do canhão laser. A função desta placa é o gatilhamento e congelamento dos sinais (AquadB e canhão laser) para que posteriormente o computador possa ler e armazenar os dados. As leituras da máquina e do laser são comparadas e a diferença entre elas é apresentada pelo “software” HP 10747A, instalado no microcomputador. Os dados da medição podem ser transferidos para uma pasta de arquivos e analisados através de planilhas eletrônicas ou arquivos de texto.

O teste referente ao comprimento de 20mm com passo incremental de 0,048mm foi feito no modo bidirecional com cinco trajetos de ida e cinco de volta, na parte central da régua Y. Foi obtido

um arquivo de dados contendo valores da posição, em milímetros, e erros de posicionamento, em micrometros.

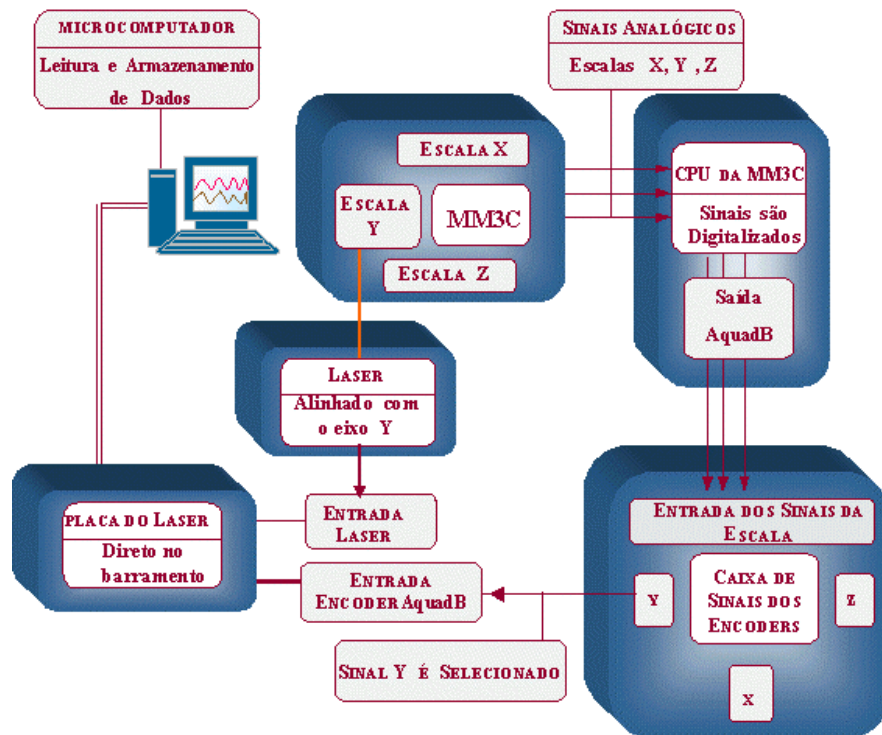


Figura 5. Representação do sistema utilizado no levantamento dos erros cíclicos de baixa frequência.

### 3.3 Análise do Erro Cíclico de Baixa Frequência

O gráfico construído no domínio do espaço, Fig.(5), mostra o comportamento do erro, contendo períodos de aproximadamente 4mm e histerese de 3,5 $\mu$ m.

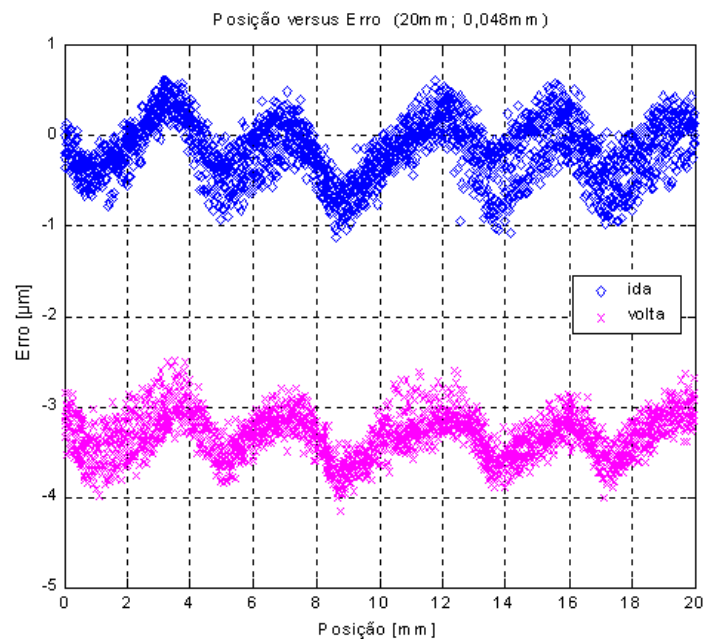


Figura 5. Gráfico Posição versus Erro

Para verificar exatamente quais frequências compõem o fenômeno medido, foi calculada a transformada de Fourier discreta dos valores do erro por meio do algoritmo “Fast Fourier Transform” (FFT) e em seguida construído o gráfico Frequência versus Amplitude, Fig.(6).

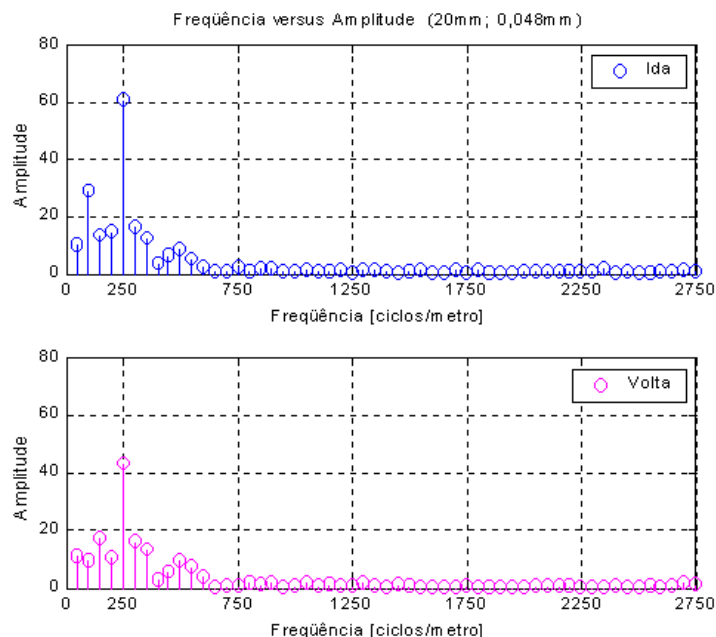


Figura 6. Gráfico Frequência versus Amplitude

De acordo com o gráfico Frequência versus Amplitude, a frequência 250 ciclos/m apresenta maior amplitude. Além disso, o período correspondente a esta frequência, ou seja, 4mm, encontra-se presente no gráfico Posição versus Erro, Fig. (5). Portanto, este teste confirma a existência do período cíclico de 4mm com amplitude de aproximadamente  $1,8\mu\text{m}$ , no trajeto de ida, e  $1,6\mu\text{m}$  no trajeto de volta.

Outros testes foram executados com o mesmo comprimento, isto é, 20mm, e passos incrementais de 0,064mm, 0,032mm, 0,024mm e 0,016mm. Resultados similares foram obtidos de modo que as amplitudes das frequências observadas nos cinco testes foram normalizadas e comparadas. As amplitudes normalizadas de algumas frequências estão apresentadas na Fig. (7).

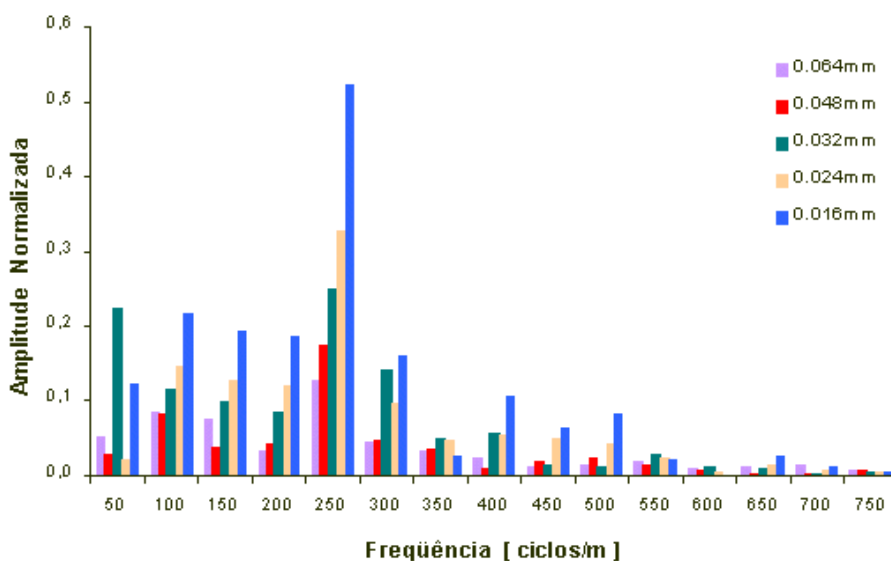


Figura 7. Amplitudes frequenciais normalizadas para alguns incrementos

O “aliasing” em relação a maioria das frequências, foi confirmado pela tendência indefinida em algumas amplitudes, Fig. (7). Por outro lado, observou-se que a amplitude normalizada da frequência 250 ciclos/m teve comportamento crescente conforme a redução do passo incremental. Na Fig. (8) está apresentada a visualização do comportamento de algumas amplitudes normalizadas.

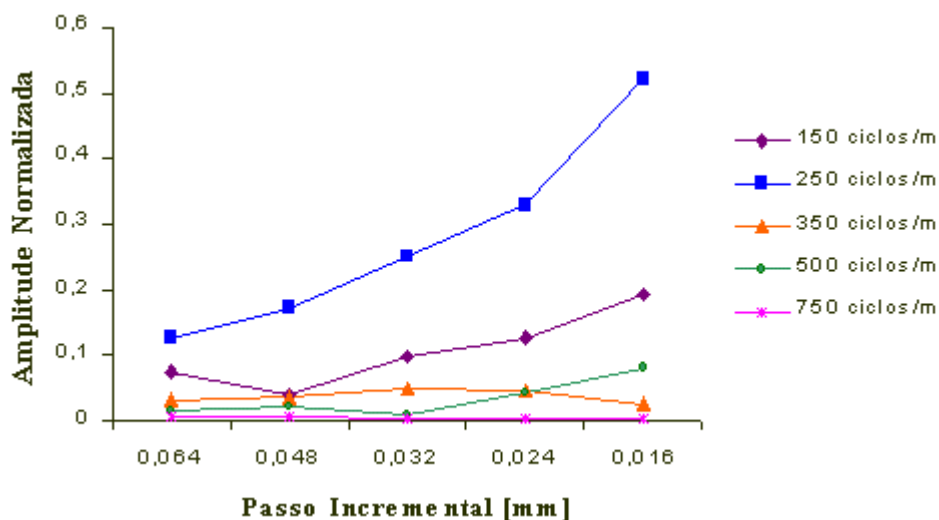


Figura 8. Tendência de algumas amplitudes frequenciais normalizadas

Assim, essa análise também comprova a existência do período cíclico de 4mm. Além disso, a tendência de crescimento nas amplitudes frequenciais normalizadas, conforme o decréscimo do passo, pode ser considerado um critério eficiente na confirmação da presença de componente cíclica.

#### 4. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos neste trabalho, as seguintes conclusões podem ser apresentadas.

O sistema utilizado para o levantamento dos erros cíclicos de baixa frequência permite que as medições sejam feitas de modo simples. Pouco tempo nos testes de medição é necessário e assim menor o custo desta atividade. O limite mínimo de passo incremental, nesse sistema, é 0,016mm.

A distância entre as linhas da escala varia em torno de 16 $\mu$ m. Assim, a compensação do erro cíclico decorrente do processo de fabricação das linhas da escala ocorre realmente, mas não isenta a máquina de grandes erros dentro do período.

A medição no eixo Y da MM3C, utilizando passo incremental de 0,048mm, possibilitou a comprovação do período cíclico de 4mm com amplitude de aproximadamente 1,8 $\mu$ m.

O “aliasing” em relação a maioria das frequências foi confirmado pelo comportamento indefinido em suas amplitudes, quando diversos passos incrementais foram considerados.

A frequência 250 ciclos/m apresenta amplitudes normalizadas com tendência crescente conforme a redução do passo incremental. Assim, a tendência de crescimento das amplitudes frequenciais, conforme o decréscimo do passo incremental, pode ser considerada um critério eficiente na confirmação de componente cíclica.

A análise do erro cíclico de baixa frequência por meio do gráfico espectral, gerado pelo algoritmo FFT, é bastante simples, rápida e eficiente.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Brasil (CNPq) pelo suporte financeiro para desenvolvimento desta pesquisa.

## 6. REFERÊNCIAS

- ASME B89.4.1/97, 1997, "Methods goes performance evaluation of Coordinate Measuring Machines", American Society of Mechanical Engineers, New York, pp.2-31.
- Burdekin, M., Voutsadopoulos, C., 1982, "Computer aided volumetric calibration of coordinate measuring machines", NELEX82, Department of Mechanical Engineering, UMIST, Manchester, pp.1-11.
- Butterworth, A., 1984, "Computer aided accuracy assessment", Master Degree, The Victoria University of Manchester, pp.7.
- Di Giacomo, B., 1986, "Computer aided calibration and hybrid compensation of geometric errors in coordinate measuring machines", PhD Thesis, The Victoria University of Manchester, pp.93-96.
- Hemingray, C.P., Cowley, A., Burdekin, M., 1971, "Positioning accuracy of numerically controlled machine tools", Proceedings of the International Machine Tool Design and Research Conference, Macmillan, London, pp.319-324.
- Ioshimoto, I., 1979, "Pitch error presentation and positional tolerancing", Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering, Vol.13, No.1, pp.41-42.
- Israel, W. et al, 2003, "An international length comparison at an industrial level using a photoelectric incremental encoder as transfer standard", Precision Engineering, No.27, pp. 151-156.
- Yamamoto, A., Otsuka, J., 1970, "The study on precision thread grinding with numerically controlled compensation", Bulletin of the JSME, Vol.13, No.57, pp.447-453.
- Thusty, J., Koenigsberger, F., 1970, "Specifications and tests of metal cutting machine tools", Proceedings of the Conference Manchester, Manchester, Revell and George Limited, pp.34-49.

## CYCLIC ERRORS IN COORDINATE MEASURING MACHINES

### **Benedito Di Giacomo**

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

### **Márcia Kimie Nakazato**

Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador São Carlense, 400 Centro - CEP 13566-590 - São Carlos - SP – Brasil, e-mail: marciakn@sc.usp.br

### **Roberto Hideaki Tsunaki**

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

**Abstract.** *The purpose of this work is to evaluate the cyclic errors in Coordinate Measuring Machines (CMMs). In order to achieve this objective, a measuring procedure of cyclic errors and application of Fourier analysis were accomplished. A cyclic period of four millimeters was confirmed. Besides, it was observed that the amplitude of the frequency 250 cycles/m has increasing tendency as the increment step decreases. Results of measurements of distances between consecutive lines of the scale have shown the existent manufacturing errors and suggested errors of electronic division.*

**Keywords.** *cyclic errors, Coordinate Measuring Machines, Moiré fringes, Fourier analysis.*