

Contribuição na Avaliação do Desempenho Metrológico de uma MM3C na Medição de Circularidade

Vanessa Aparecida de Oliveira Rosa

Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil, vanessaproduc@hotmail.com

Leandro Carvalho Pereira

Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil, cp.leandro@hotmail.com

Mentor da Faculdade:

Rosenda Valdés Arencibia

Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil, arvaldes@mecanica.ufu.br

RESUMO

Este trabalho objetiva contribuir na avaliação do desempenho metrológico de uma máquina de medir a três coordenadas (MM3C), especificamente na medição do desvio de circularidade. Para tanto, foram propostas as seguintes etapas: i) medição do desvio de circularidade de quatro peças, fabricadas com diferentes níveis de exatidão, utilizando uma MM3C e uma máquina de medir desvios de forma (MMDF); ii) determinação dos valores de circularidade por meio de diferentes métodos de ajuste (mínimos quadrados, mínimo círculo circunscrito, máximo círculo inscrito e mínima zona); iii) avaliação da incerteza de medição; iv) análise e discussão dos resultados. Concluiu-se que para as medições realizadas em ambas as máquinas, a diferença entre os métodos de ajuste é mais evidente à medida que o desvio de circularidade das peças torna-se maior; o método mínima zona apresentou, em ambas as máquinas, os menores desvios de circularidade; quanto à análise do desempenho da MM3C, os resultados mostraram que este sistema de medição não possui capacidade metrológica para realizar a medição de desvio de circularidade em anéis-padrão, isto devido à limitação imposta pela sua resolução e pela incerteza de medição.

Palavras chaves: máquina de medir a três coordenadas, máquina de medir desvios de forma, desvio de circularidade, métodos de ajuste, incerteza de medição.

ABSTRACT

This work aims to contribute to the evaluation of the metrological performance of a tridimensional coordinates measuring machine, specifically in the measurement of the roundness deviation. For such, we propose the following steps: i) measuring of the roundness deviation of four pieces manufactured with different levels of accuracy, using a tridimensional coordinates measuring machine and form deviation measure machine; ii) determination of the roundness values by different fitting methods (least squares, minimum circumscribed circle, maximum inscribed circle and minimum zone); iii) evaluation of measurement uncertainty; iv) analysis and discussion of the results. It was concluded that for measurements on both machines, the difference between the fitting methods is more evident as the roundness deviation of the pieces becomes greater; the minimum zone method showed on both machines the smaller roundness deviation; regarding the performance analysis of tridimensional coordinates measuring machine, the results showed that the measuring system has no metrological capability to measure roundness deviation in standard rings due to limitations imposed by its resolution and the measurement uncertainty.

Keywords: tridimensional coordinates measuring machine, form deviation measure machine, roundness deviation, fitting methods, measurement uncertainty.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de fabricação modernos são baseados no conceito de intercambiabilidade e funcionalidade, o que requer que cada peça ou conjunto de um produto final seja feito de acordo com as especificações definidas quanto à dimensão, forma e acabamento da superfície (Agostinho et al., 1997).

Porém, mesmo com os avanços tecnológicos introduzidos nas últimas décadas, não é possível a obtenção de superfícies perfeitas. Deste modo, é necessário quantificar e indicar, no projeto das peças, tolerâncias dimensionais e geométricas e, conseqüentemente, desenvolver meios para verificá-las.

No âmbito da produção metal-mecânica as tolerâncias de circularidade são comumente especificadas, uma vez que a verificação desta característica é importante, por exemplo, no controle dos desgastes excessivos em conjuntos dinâmicos, nos problemas de vedação, podendo ainda indicar as possíveis causas de perda de rendimento. Por isto, este é um dos critérios mais adotados na avaliação da qualidade de furos, sendo seu estudo metrologicamente relevante. A circularidade também está envolvida como um elemento básico das medições de cilindridade (Schmidt, 2005). Destaca-se ainda sua importância durante a verificação da exatidão de padrões, tais como anéis-padrão, barra de furos, placa de furos e padrão de círculos.

De acordo com a NBR 6409 (ABNT, 1997), a circularidade é definida como a distância radial “ t ” entre dois círculos concêntricos que contém o perfil adquirido, como mostrado na Fig. 1.

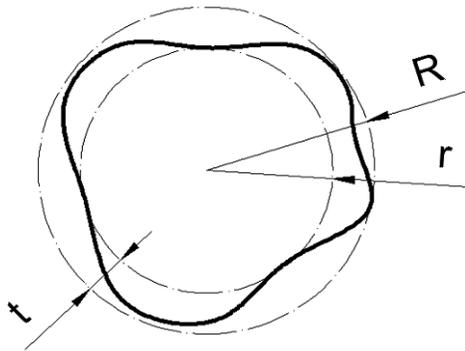


Figura 1: Representação do desvio de circularidade

Desta forma, o desvio de circularidade D pode ser determinado pela Eq. (1), onde R é o raio do menor círculo circunscrito e r o raio do maior círculo inscrito.

$$D = R - r \quad (1)$$

Dentre os sistemas de medição utilizados na determinação do desvio de circularidade, a máquina de medir a três coordenadas (MM3C) e a máquina de medir desvios de forma (MMDF) são os mais usuais na indústria. As MMDFs são sistemas robustos, que consistem basicamente de um fuso de alta precisão e um transdutor de deslocamento, podendo ser estacionário ou giratório. O sensor entra em contato com a superfície da peça coletando uma grande quantidade de pontos na seção de medição e fornece, por meio de um *software* dedicado, o perfil real da mesma com elevado poder de diagnóstico. Estas máquinas possuem excelente resolução, que pode chegar a $0,01 \mu\text{m}$. Dentre suas vantagens podem-se citar boa exatidão e precisão. As MMDFs são os meios preferidos para executar medições de circularidade com baixa incerteza, sendo comumente utilizadas para avaliar, por exemplo, a circularidade de anéis-padrões (Schmidt, 2005).

No entanto, no controle de processos industriais ou na avaliação de conformidade de peças, a medição do desvio de circularidade em MMDF não se mostra eficiente, devido ao elevado tempo de *set up* para a fixação e alinhamento do mensurando, de modo a garantir a concentricidade com o fuso da máquina, e também ao alto

custo destes equipamentos para controle de grandes mensurandos. Soma-se a isto o fato de sua aplicação ser limitada para peças com geometria complexa, uma vez que os ajustes de nivelamento e centralização são difíceis de serem realizados, requerendo para tanto o projeto e fabricação de dispositivos de fixação, o que não é justificável para uma inspeção unitária ou em pequenos lotes.

Neste contexto, as MM3Cs apresentam-se como alternativas eficazes em aplicações industriais, uma vez que permitem a medição da maioria das características dimensionais e geometrias nos mais variados tipos de peças (como engrenagens, revestimentos de aeronaves, módulos de satélite e turbinas) com extrema rapidez, reduzindo consideravelmente o tempo de medição. Ainda, a realização de medições dimensionais, de forma, de posição e orientação em um único equipamento reduz os tempos de fixação e posicionamento das peças (Valdés, 1999).

As MM3Cs representam fisicamente um sistema de coordenadas cartesiano, em que pontos discretos são apalpados na superfície da peça por meio de um sensor, e o programa computacional dedicado tem como principal função armazenar as coordenadas (X , Y e Z) destes pontos e, a partir delas, determinar as geometrias substitutas.

Os *softwares* comerciais dedicados tanto às MM3Cs quanto às MMDFs calculam os valores do desvio de circularidade com base em algoritmos de ajuste, sendo os mais empregados o ajuste pelo método dos mínimos quadrados (LSC), mínimo círculo circunscrito (MCC), máximo círculo inscrito (MIC) e mínima zona (MZC). É importante ressaltar que os diferentes critérios de ajuste produzem resultados consideravelmente distintos, principalmente quando se medem peças que apresentam desvios de forma significativos. Ainda, se estes algoritmos não forem implementados corretamente, podem gerar erros de ajuste e numéricos capazes de invalidar o resultado das medições (Phillips, 2011).

Dentre os métodos de ajuste, o algoritmo MZC é aquele que produz resultados de avaliação consistentes com a definição de circularidade que consta na NBR 6409 (ABNT, 1997). Porém, comumente, as MM3Cs utilizam como método de análise *default* o método LSC, uma vez que requer menor esforço computacional e possui baixa sensibilidade à presença de pontos extremos. Embora este algoritmo seja o mais utilizado na prática industrial, ao longo dos anos foram identificados problemas graves com o desempenho dos programas computacionais que utilizam este método, uma vez que não fornece os resultados adequados (Walker, 1988; Hopp, 1993).

Diante do exposto, este trabalho objetiva avaliar a confiabilidade metrológica de uma MM3C, especificamente na medição do desvio de circularidade. Para tanto, esta característica foi medida em peças fabricadas com diferentes níveis de exatidão, sendo os resultados comparados com aqueles encontrados na medição com MMDF.

2. METODOLOGIA

Os desvios de circularidade dos furos de quatro peças, com diferentes níveis de exatidão, foram medidos em uma MM3C. Como referência utilizou-se um anel-padrão, de diâmetro convencional igual a 15,996 mm. Este é do fabricante Mitutoyo, e possui certificado de calibração nº 8262/10, emitido pelo Laboratório de metrologia da Mitutoyo Sul Americana. A incerteza declarada é de 0,0010 mm. As demais peças foram identificadas como peça 1, peça 2 e peça 3 (Fig. 2). Foram efetuadas cinco repetições para posterior análise da precisão e da incerteza de medição.

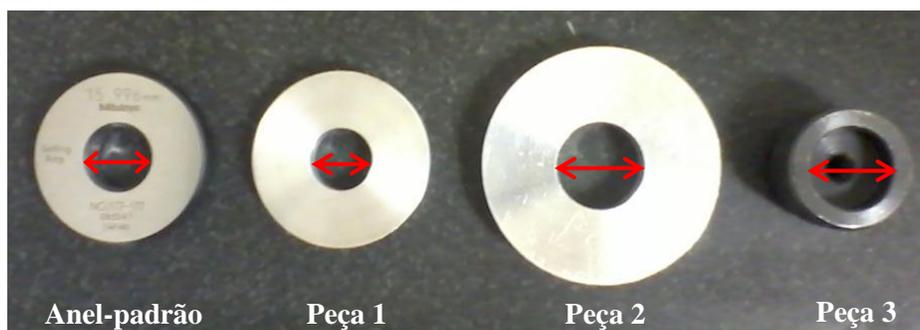
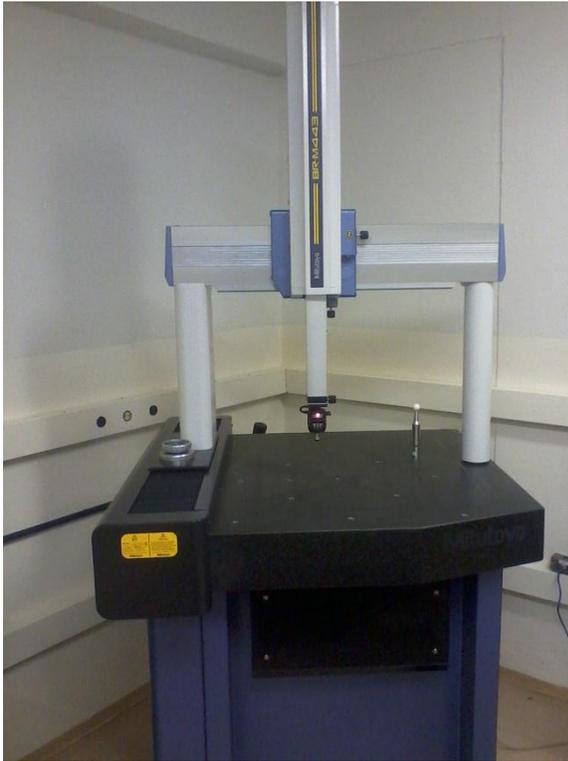


Figura 2: Peças para medição do desvio de circularidade

A MM3C é do fabricante Mitutoyo, modelo BR-M443, tipo ponte móvel, com resolução de 1 μm e volume de trabalho definido por 400 mm, 400 mm e 300 mm, para os eixos X, Y e Z, respectivamente (Fig. 3a). A máquina possui certificado de calibração n° 07081/13, emitido pelo Laboratório de metrologia da Mitutoyo Sul Americana. O erro de apalpação é $(1,9 \pm 1,2) \mu\text{m}$; a incerteza linear associada ao eixo X é $(0,8 + L/1500) \mu\text{m}$, para o eixo Y é $(0,8 + L/3000) \mu\text{m}$, enquanto que para o eixo Z é $(0,9 + L/2900) \mu\text{m}$, onde L representa o valor da coordenada correspondente. O *software* dedicado à máquina é o MCosmos 3.0[®]. Para as medições foi utilizada uma ponta única de esfera de rubi de 2 mm de diâmetro.

(a)



(b)



Figura 3: (a) máquina de medir a três coordenadas; (b) máquina de medir desvios de forma

Devido à particularidade do desvio de circularidade, que deve ser determinado em uma seção transversal do furo avaliado, o eixo Z da máquina foi travado, de forma que o apalpador se movimentou apenas no plano XY. Quanto à estratégia de medição, foram apalpados doze pontos em uma seção dos furos, distribuídos de forma a obter uma amostra representativa dos infinitos pontos da mesma. Para minimizar o erro de histerese o apalpação foi efetuado sempre no sentido horário.

Para efeito de comparação, os desvios de circularidade das peças foram medidos em uma MMDF, do fabricante Taylor Hobson, modelo Talyrond 131 (Fig. 3b). O apalpador é de ponta única, com esfera de rubi de 2 mm de diâmetro. A resolução deste equipamento é de 0,01 μm , e a faixa de medição no eixo vertical de 250 mm e no eixo horizontal de 180 mm. O desvio de excentricidade da mesa da máquina é de 0,035 μm , e a incerteza padrão da calibração é de 0,005 μm , sendo estes valores obtidos no certificado de calibração n° 018/13 emitido pela Taylor Hobson. Para fixação, centralização e nivelamento das peças, esta máquina possui um dispositivo tipo castanha. O *software* dedicado é o Ultra[®], e este fornece, além do valor numérico do desvio de circularidade, o gráfico do perfil de circularidade efetivo da peça.

Todas as medições foram efetuadas a temperatura ambiente de $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$, conforme recomendado pela NBR NM-ISO 1 (ABNT, 1997), sendo monitorada por meio de um termo-higrômetro, com resolução de 0,1 $^\circ\text{C}$ e faixa

nominal de (-20 a 60) °C. Este possui certificado de calibração nº R4996/13, emitido pela Elus Instrumentação. Tanto as peças quanto os dispositivos e sistemas de medição foram deixados doze horas à temperatura padrão para atingirem o equilíbrio térmico.

2.1 AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO

Para avaliação da incerteza associada às medições do desvio de circularidade foi aplicada a metodologia proposta no “Guia Para a Expressão da Incerteza de Medição” (INMETRO, 2012).

Nas medições efetuadas na MM3C foi considerado o modelo matemático expresso na Eq. (2) (Valdés et al., 2014).

$$D = \Delta s(L_{MM3C}) + \Delta R_{MM3C} + \Delta I_{MM3C} + \Delta E_A + L_0 \cdot \Delta T \cdot (\alpha_{Pe} + \alpha_{MM3C}) + L_0 \cdot \delta T \cdot (\alpha_{Pe} + \alpha_{MM3C}) \quad (2)$$

Em que D é o desvio de circularidade obtido na MM3C; $\Delta s(L_{MM3C})$ é a correção associada à variabilidade das indicações (desvio padrão) da MM3C; ΔR_{MM3C} é a correção associada à resolução da MM3C; ΔI_{MM3C} é a correção associada à incerteza padrão da calibração da MM3C nos eixos X , Y e Z ; ΔE_A é a correção associada ao erro de apalramento da MM3C; L_0 é o valor do mensurando; ΔT é o afastamento da temperatura ambiente em relação à de referência (20 °C); α_{Pe} é o coeficiente de expansão térmica linear do material da peça; α_{MM3C} é o coeficiente de expansão térmica linear do material das escalas da MM3C; δT é a variação da temperatura durante as medições.

Nas medições realizadas na MMDF foi considerado o modelo matemático expresso conforme a Eq. (3) (Souza et., 2011):

$$C = \Delta s(L_{MMDF}) + \Delta R_{MMDF} + \Delta I_{MMDF} + \Delta D_{EXC} + L_0 \cdot \Delta T \cdot (\alpha_{Pe} + \alpha_{MMDF}) + L_0 \cdot \delta T \cdot (\alpha_{Pe} + \alpha_{MMDF}) \quad (3)$$

Em que C é o desvio de circularidade obtido na MMDF; $\Delta s(L_{MMDF})$ é a correção associada à variabilidade das indicações (desvio padrão) da MMDF; ΔR_{MMDF} é a correção associada à resolução da MMDF; ΔI_{MMDF} é a correção associada à incerteza padrão associada à calibração da MMDF; ΔD_{EXC} é a correção associada ao desvio de excentricidade da mesa da MMDF; L_0 é o valor do mensurando; ΔT é o afastamento da temperatura ambiente em relação à de referência (20 °C); α_{Pe} é o coeficiente de expansão térmica linear do material da peça; α_{MMDF} é o coeficiente de expansão térmica linear do material das escalas da MMDF; δT é a variação da temperatura durante as medições.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 4 apresenta os valores medidos de desvio de circularidade, nas diferentes peças, obtidos na MMDF, enquanto que a Figura 5a-d mostra o perfil de circularidade da peça 3 ajustado pelos diferentes algoritmos, sendo possível visualizar a influência dos pontos apalpados na determinação do círculo de referência de cada método.

Observa-se, na Figura 4, que os valores obtidos do desvio de circularidade do anel-padrão são pequenos e muito próximos em relação aos diferentes métodos de ajuste, sendo de 0,21 µm para os métodos MCC e MZC, e de 0,23 µm para os métodos LSC e MIC. Em contrapartida, a diferença entre os resultados obtidos pelos quatro métodos de ajuste avaliados é mais evidente à medida que o desvio de circularidade das peças torna-se maior. Para as peças 1 e 2, os desvios de circularidade médios obtidos pelos diferentes métodos variaram entre 5,80 µm e 6,34 µm para o método MCC, sendo esta variação de 9%. Já para a peça 3 os valores observados variaram entre 11,16 µm, para o método MZC, e 13,83 µm para o método MIC, sendo esta diferença da ordem de 24%.

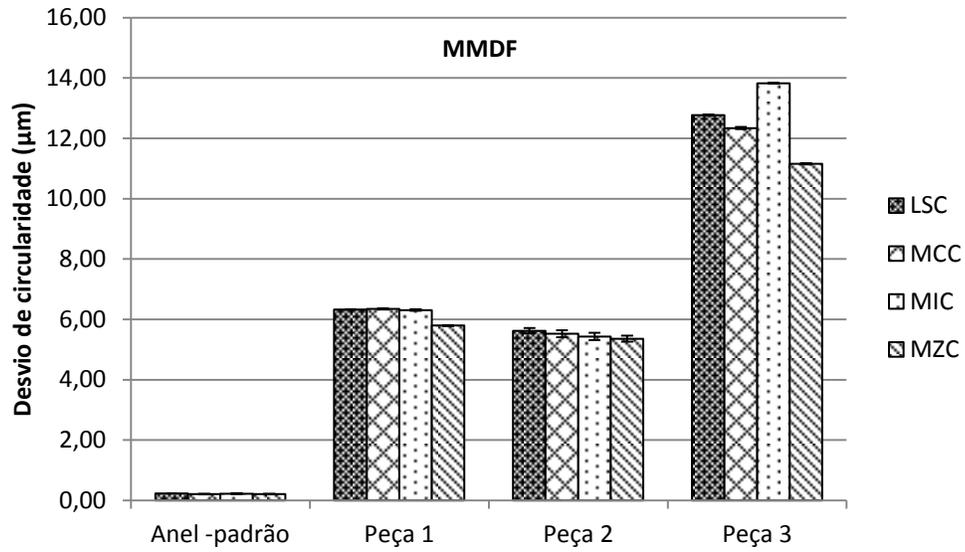
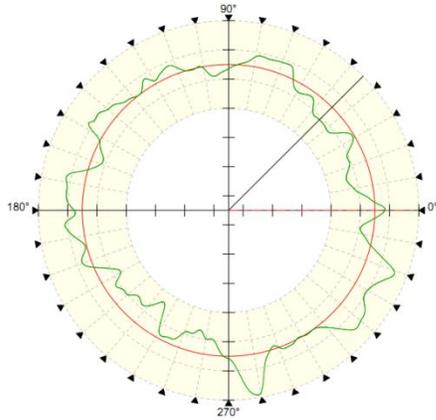
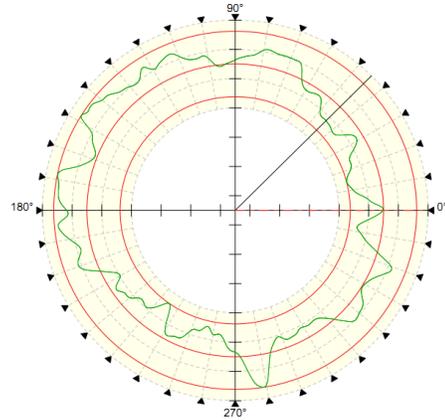


Figura 4: Valores de desvios de circularidade das diferentes peças obtidos na MMDF

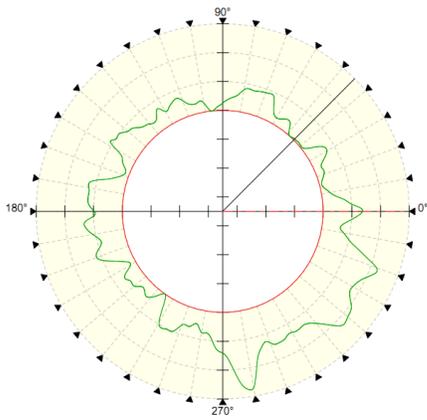
(a) LSC



(b) MZC



(c) MIC



(d) MCC

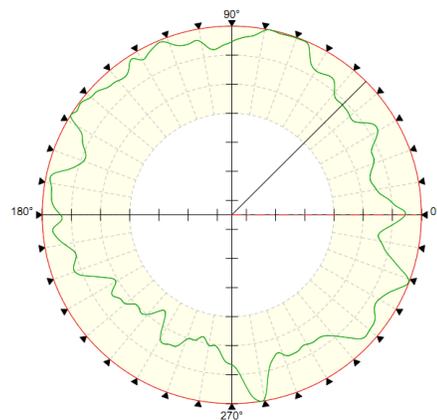


Figura 5: Perfil de circularidade da peça 3: (a) mínimos quadrados (LSC); (b) mínima zona (MZC); (c) máximo círculo inscrito (MIC); (d) mínimo círculo circunscrito (MCC). Escala: 5 µm/divisão

Para a peça 3, o ajuste pelo método MIC foi o que apresentou o maior desvio de circularidade, enquanto o menor valor foi obtido pelo ajuste MZC, concordando com o princípio matemático destes algoritmos. No método MIC, o algoritmo define quais pontos determinam a menor circunferência possível, sendo sensível a pontos extremos. Já no método MZC esta influência é minimizada, uma vez que este determina os círculos máximo e mínimo com a menor separação radial que limitam todos os pontos apalpadados.

Na Figura 5c observa-se que para o método MIC a maioria dos pontos estão mais afastados do círculo de referência, no entanto, o valor do desvio de circularidade é determinado em função dos pontos extremos mais próximos do mesmo, justificando assim os resultados encontrados.

A Figura 6 apresenta os valores de desvios de circularidade obtidos na MM3C, para as diferentes peças. Comparando estes resultados com aqueles apresentados na Fig. 4, observa-se que o comportamento dos métodos de ajuste no cálculo dos mensurandos foi similar para os valores encontrados na MMDF. Entretanto, a exatidão e precisão dos resultados são significativamente diferentes.

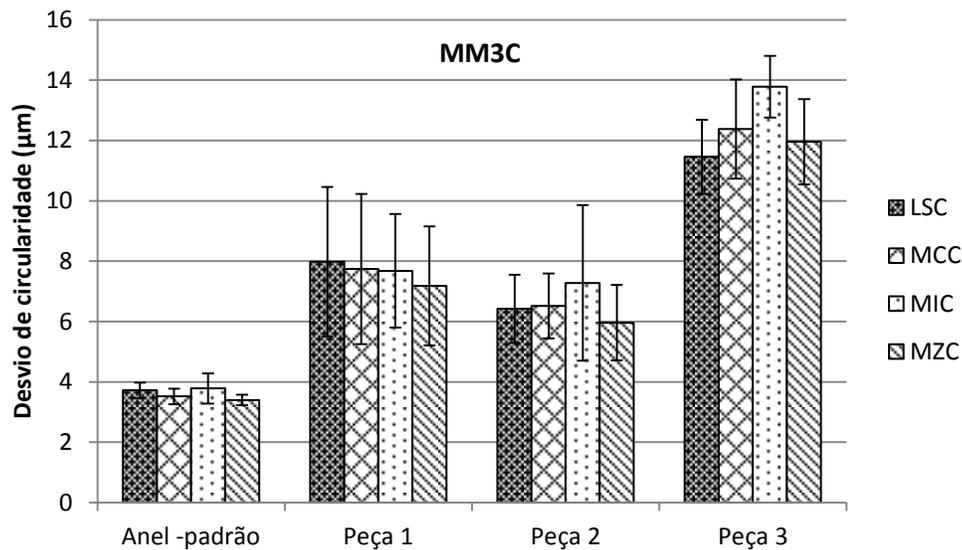


Figura 6: Valores de desvios de circularidade das diferentes peças obtidos na MM3C

Na medição do anel-padrão notam-se diferenças significativas entre os valores obtidos durante a medição com a MM3C e a MMDF. Tomando-se como valor convencional o desvio de circularidade medido na MMDF pelo método MZC, que é de $(0,21 \pm 0,06) \mu\text{m}$, o erro calculado para a MM3C é de $3,19 \mu\text{m}$. Assim, pode-se afirmar que a MM3C não possui capacidade metrológica para realizar a medição de desvio de circularidade em anéis-padrão, isto devido às limitações impostas pela sua resolução e pela incerteza volumétrica.

Com relação à precisão observa-se que a MMDF possui uma excelente repetitividade, indicada nos gráficos das Fig. 4 e 6 pela barra de desvio-padrão, com desvio-padrão entre $0,01$ e $0,10 \mu\text{m}$, para o método MZC, considerando todas as peças. Entretanto, a MM3C apresenta menor precisão, com valores de desvio-padrão entre $3,4$ e $12,0 \mu\text{m}$, nas mesmas condições. Dentre outros fatores, a menor precisão da MM3C pode ser devida à presença de erros aleatórios que agem no processo de medição, tais como variação na força de medição decorrentes da operação manual da máquina. Também, estatisticamente, os resultados obtidos na MM3C são menos consistentes que aqueles encontrados na medição em MMDF porque a amostra considerada é muito menor.

3.1. CÁLCULO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO

As Figuras 7 e 8 apresentam os valores de incerteza expandida, para 95,45% de probabilidade de abrangência, associados à medição do desvio de circularidade na MMDF e MM3C, respectivamente.

Como esperado, os valores de incerteza expandida dos resultados obtidos na MMDF, mostrados na Fig. 7, são pequenos e similares para o anel-padrão e as peças 1 e 3. Os maiores valores foram obtidos para a peça 2, seguindo a tendência do desvio padrão experimental. Neste caso, a máxima incerteza foi encontrada para os métodos MCC e MIC, sendo de 0,32 μm .

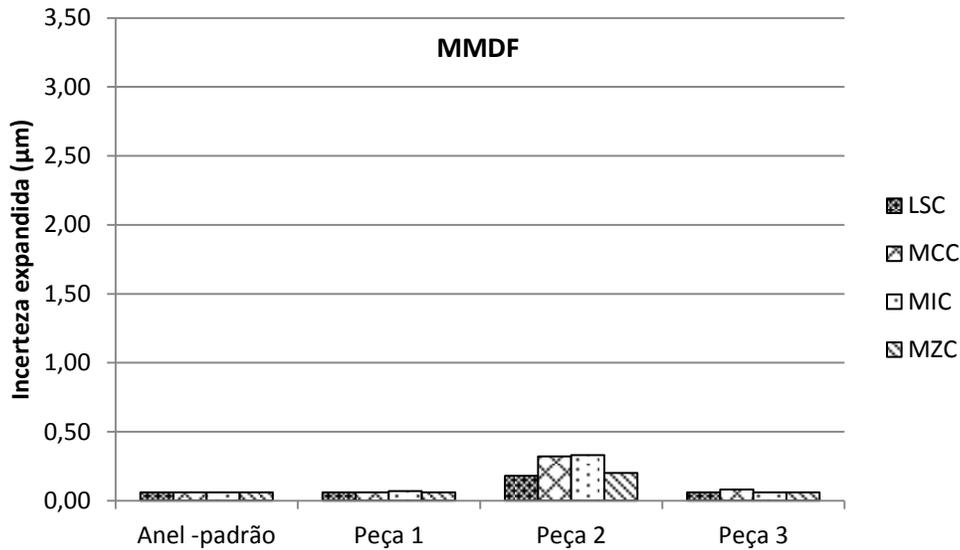


Figura 7: Valores de incerteza expandida para o desvio de circularidade utilizando a MMDF

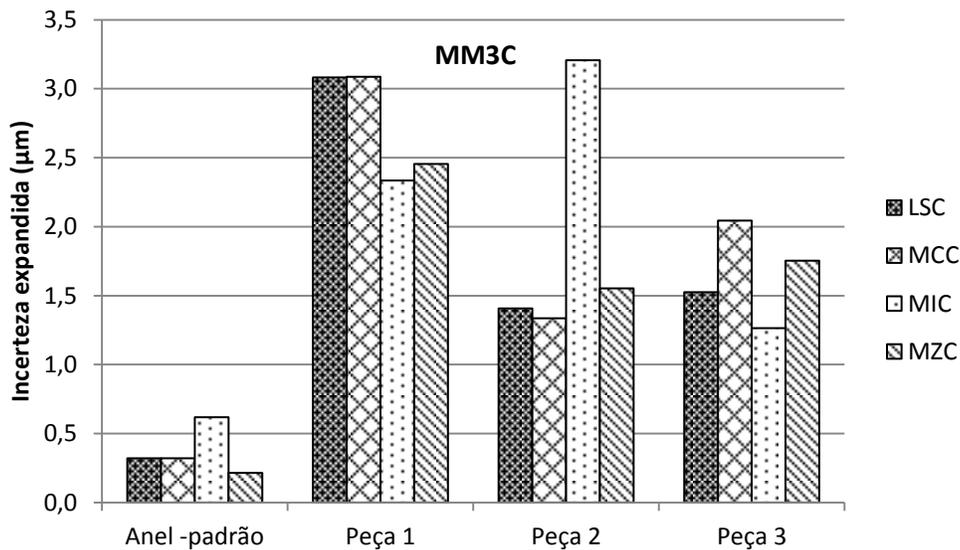


Figura 8: Valores de incerteza expandida para o desvio de circularidade utilizando a MM3C

Os valores de incerteza expandida associados à medição do desvio de circularidade na MM3C, apresentados na Fig. 8, são significativamente maiores que aqueles obtidos na medição com a MMDF (Fig. 7), para todas as peças e os diferentes métodos de ajuste. No caso particular da medição do anel-padrão, a incerteza obtida na medição com a MM3C mostrou seu menor valor para o método MZC, sendo de 0,2 μm , ou seja, 3,5 vezes maior que aquele calculado para a MMDF. Nas demais peças, as diferenças observadas entre os valores de incerteza foram significativamente elevados, sendo 51 vezes maior para a peça 1 no método de ajuste MCC.

A componente que mais contribuiu para a incerteza final de medição, em ambos os casos, foi a variabilidade das indicações. Para minimizar este efeito, pode-se aumentar o número de repetições.

4. CONCLUSÕES

Os métodos de ajuste forneceram resultados significativamente diferentes de desvio de circularidade quanto a repetitividade e incerteza de medição, para ambos os sistemas de medição utilizados.

Tanto para as medições realizadas na MMDF como na MM3C, a diferença entre os métodos de ajuste é mais evidente à medida que o desvio de circularidade das peças torna-se maior, de acordo com o apresentado na literatura.

O método MZC apresentou os menores desvios de circularidade para ambas as máquinas.

Na análise do desempenho da MM3C, na medição específica do desvio de circularidade para peças com diferentes níveis de qualidade, conclui-se que este sistema de medição não possui capacidade metrológica para realizar a medição de desvio de circularidade em anéis-padrão, isto devido à limitação imposta pela sua resolução e pela incerteza de medição.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, e às instituições CNPq, CAPES e FAPEMIG pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- Agostinho, O.L., Rodrigues, A.C.S., Lirani, J. (1997). *Tolerâncias, Ajustes, Desvios e Análise de Dimensões*, 8ª reimpressão, Edgard Blücher, São Paulo.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1997). “NBR 6409: Tolerâncias geométricas – Tolerâncias de forma, orientação, posição e batimento – Generalidades, símbolos, definições e indicações em desenho”. INMETRO, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1997). “NBR NM-ISO 1: Temperatura Padrão de Referência para Medições Industriais de Comprimento”. INMETRO, Rio de Janeiro.
- Hopp, H.T. (1993). “Computational Metrology”. *Manufacturing Review*. Vol. 6, No. 4, pp 295-304.
- Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (2012). “Guia para a expressão de incerteza de medição – GUM 2008”, 1ª edição brasileira, INMETRO, Rio de Janeiro.
- Phillips, S.D. (2011). “Performance Evaluation”. In: Hocken, R.J.; Pereira, P.H. *Coordinate Measuring Machines and Systems*. 2ª edição, CRC Press, New York.
- Schmidt, A. (2005). “Análise dos Efeitos da Filtragem na Medição de Circularidade em Máquinas de Medir por Coordenadas utilizando *Scanning*”, Disserta o de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Souza, C.C., Valdés, R. A., Costa, H. L., Piratelli-Filho, A. (2011). “A contribution to the measurement of cylindricity and circularity deviation”. Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Natal.
- Valdés, R. A. (1999). “Equacionamento das Componentes do Erro Volumétrico em Máquinas de Medir a Três Coordenadas”, Disserta o de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, Brasil.

- Valdés, R. A., Souza, C.C., Costa, H. L., Piratelli-Filho, A. (2014). “Simplified model to estimate uncertainty in CMM”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* (artigo aceito para publicação).
- Walker, R. (1988). “CMM Form Tolerance Algorithm Testing”, GIDEP Alert X1-A-88-01. Government-industry data exchange, DOD, Washington, D.C.

Autorização

Os autores autorizam o LACCEI a publicar o artigo nos anais da conferência. Tanto o LACCEI quanto os editores não são responsáveis pelo conteúdo expresso neste artigo ou suas implicações.