

ESTIMATIVA DA PARCELA DE ERRO DEVIDA AO DESBALANCEAMENTO DE PEÇAS EM UMA MÁQUINA DE MEDIR DESVIOS DE FORMA

**Vanessa Aparecida de Oliveira Rosa, Universidade Federal de Uberlândia, vanessaproduc@hotmail.com
Rosenda Valdés Arencibia, Universidade Federal de Uberlândia, arvaldes@mecanica.ufu.br**

Resumo. *As máquinas de medir desvios de forma apresentam-se como alternativas eficazes para a medição de desvios de circularidade e de cilindridade. No entanto, sua aplicação é limitada para a medição de peças com distribuição de massa não homogênea, uma vez que esta característica dificulta a operação de centralização, resultando muitas vezes em altos valores de desvio de excentricidade ou de coaxialidade. Estes desvios podem levar ao aparecimento de erros adicionais que alteram de forma considerável os valores indicados pela máquina. Neste sentido, este trabalho objetiva quantificar a parcela de erro devido ao desbalanceamento da peça durante a medição dos desvios de circularidade e de cilindridade em uma máquina de medir desvios de forma, especificamente um bloco de compressor cuja distribuição de massa não é homogênea. Para tanto, os blocos foram medidos em seu estado original e, posteriormente, o excesso de material foi retirado e novas medições foram realizadas. Concluiu-se que o erro sistemático decorrente do desbalanceamento altera de forma significativa os valores de circularidade e de cilindridade das peças medidas. Ainda, a distribuição não homogênea da massa das peças leva a diminuição da precisão de medição e ao aumento dos valores de incerteza expandida.*

Palavras chave: *circularidade, cilindridade, excentricidade, coaxialidade, incerteza de medição.*

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 indicar e quantificar, no projeto das peças, tolerâncias dimensionais e geométricas e, consequentemente, desenvolver meios para verificá-las.

No âmbito da produção metal-mecânica, as tolerâncias de circularidade e cilindridade são comumente especificadas, uma vez que a verificação destas características é importante, por exemplo, no controle dos desgastes excessivos em pares tribológicos, nas aplicações que requerem vedação, podendo ainda indicar as possíveis causas de perda de rendimento. Por isto, estes são critérios usualmente adotados na avaliação da qualidade de furos, sendo seu estudo metrologicamente relevante (Schmidt, 2005).

Dentre os sistemas de medição utilizados na determinação do desvio de circularidade e de cilindridade, as máquinas de medir desvios de forma (MMDF) mostram-se como uma alternativa eficaz. Estas máquinas são sistemas de medição robustos com excelente resolução, que pode chegar a 0,01 μm , e elevado poder de diagnóstico, sendo o meio preferido para executar medições de circularidade e cilindridade. As MMDFs são usualmente utilizadas para avaliar, por exemplo, a circularidade de anéis-padrões. Estas máquinas consistem basicamente de um fuso de alta exatidão 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 (Schmidt, 2005).

No entanto, apesar destas vantagens, sua aplicação é limitada para medição de peças com distribuição de massa não homogênea, uma vez que as operações de nivelamento e centralização são difíceis de serem realizadas. Em alguns casos, existe a necessidade de projetar e fabricar dispositivos de fixação. Esta tarefa pode, em diversas situações, constituir um desafio em termos de projeto e de tempo. No entanto, mesmo com o auxílio destes dispositivos, a distribuição não homogênea da massa da peça pode levar ao desbalanceamento da mesma. Em especial, se a operação de centralização não for bem executada, os altos valores de desvio de excentricidade ou coaxialidade (entre o furo da peça e mesa da máquina) podem levar ao aparecimento de erros adicionais que alteram de forma considerável os resultados das medições, podendo acarretar na reprovação de peças cujos desvios de forma atendem à tolerância especificada.

Assim sendo, o objetivo deste trabalho é quantificar a parcela de erro devido ao desbalanceamento da peça durante a medição dos desvios de circularidade e de cilindridade em uma MMDF, especificamente um bloco de compressor cuja distribuição de massa não é homogênea.

2. METODOLOGIA

Os desvios de circularidade e de cilindridade dos furos de cinco blocos de compressor foram medidos em uma MMDF, do fabricante Taylor Hobson, modelo Talyrond 131 (Fig. 1a). O apalpador do tipo ponta única possui esfera de rubi de 2 mm de diâmetro. A resolução deste equipamento é de $0,01 \mu\text{m}$, 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 $0,035 \mu\text{m}$, e a incerteza padrão da calibração é de $0,005 \mu\text{m}$, sendo estes valores obtidos no certificado de calibração nº 018/13 emitido pela Taylor Hobson. Para fixação, centralização e nivelamento das peças, esta máquina possui um dispositivo tipo castanha.

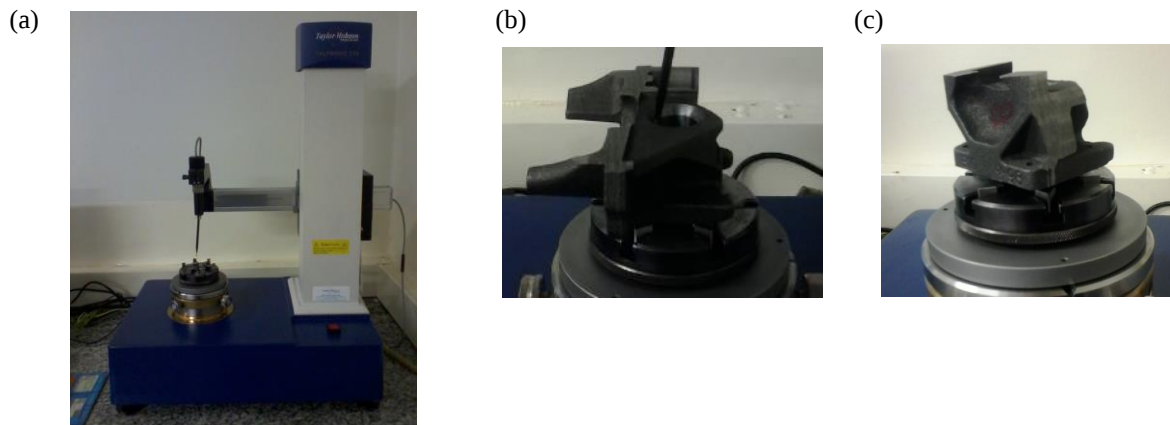


Figura 1. (a) MMDF. (b) Bloco para medição na Condição 1. (c) Bloco para medição na Condição 2.

Como pode-se observar na Fig. 1b, devido a sua geometria, a distribuição da massa desta peça não é homogênea, resultando no desbalanceamento da mesma. Para avaliar o efeito deste desbalanceamento no valor dos desvios de circularidade e de cilindridade, as peças foram medidas em seu estado original (Condição 1). Posteriormente, o excesso de material foi retirado (Fig. 1c) e realizaram-se novas medições (Condição 2). Em cada caso, foram efetuadas cinco repetições para posterior determinação da parcela de erro sistemático devido ao desbalanceamento, bem como para análise da precisão das medições. Cabe destacar que, em ambas as condições, todas as medições foram efetuadas pelo mesmo operador, seguindo o mesmo procedimento de medição.

O *software* dedicado a esta MMDF é o Ultra®, o qual fornece, além do valor numérico das características medidas pela máquina, o gráfico do perfil efetivo de circularidade e de cilindridade da peça (Fig. 2). Uma informação importante fornecida pelo *software* é o valor da excentricidade, no caso da medição do desvio de circularidade, e da coaxialidade, na medição do desvio de cilindridade. Estas informações são essenciais na avaliação da qualidade da medição, uma vez que altos valores de excentricidade ou de coaxialidade indicam que a operação de centralização não foi bem executada.

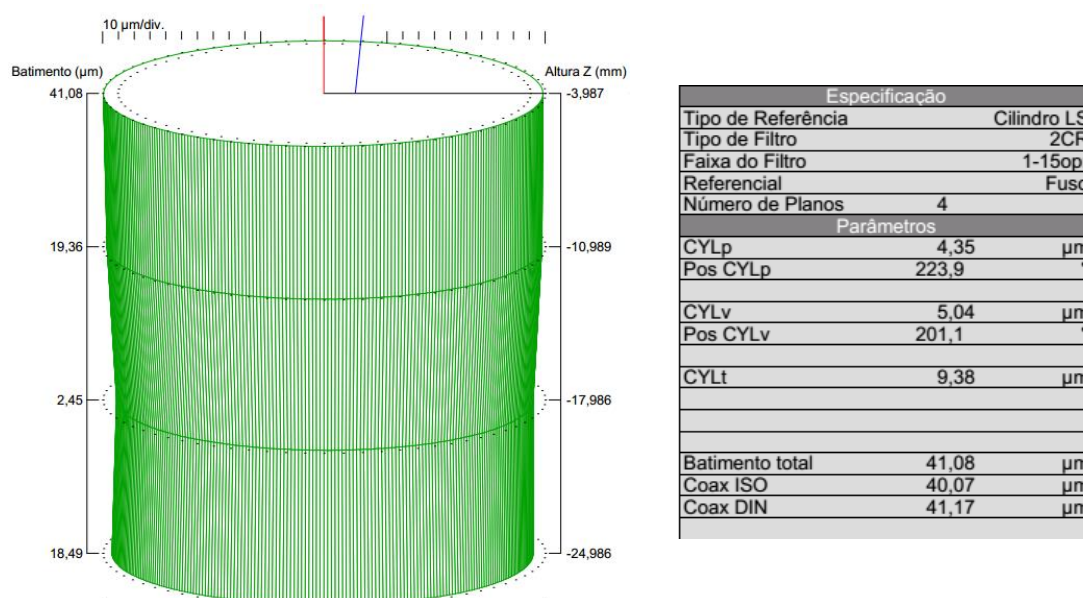


Figura 2. Perfil de cilindridade e valores de medição fornecidos pelo *software* Ultra®.

As medições foram efetuadas a temperatura ambiente de $(20,0 \pm 1,0)^\circ\text{C}$, conforme recomendado pela ABNT 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 $(-20 \text{ a } 60)^\circ\text{C}$. 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.

Para avaliação da incerteza associada às medições do desvio de circularidade e cilindridade foi aplicada a metodologia proposta no “Guia Para a Expressão da Incerteza de Medição” (INMETRO, 2012). Nas medições realizadas na MMDF foi considerado o modelo matemático expresso conforme a Eq. (1) (Souza et al., 2011):

$$C = \Delta s(L_{MMDF}) + \Delta R_{MMDF} + \Delta I_{CMMDF} + \Delta D_{EXC} + L_0 \cdot \Delta T \cdot (\alpha_{pe} + \alpha_{MMDF}) + L_0 \cdot \delta T \cdot (\alpha_{pe} + \alpha_{MMDF}) \quad (1)$$

Em que C é o desvio de circularidade (ou cilindridade) 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_{CMMDF} 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

Os valores médios do desvio de circularidade e de excentricidade obtidos nas duas condições durante a medição dos blocos são mostrados na Fig. 3a-b.

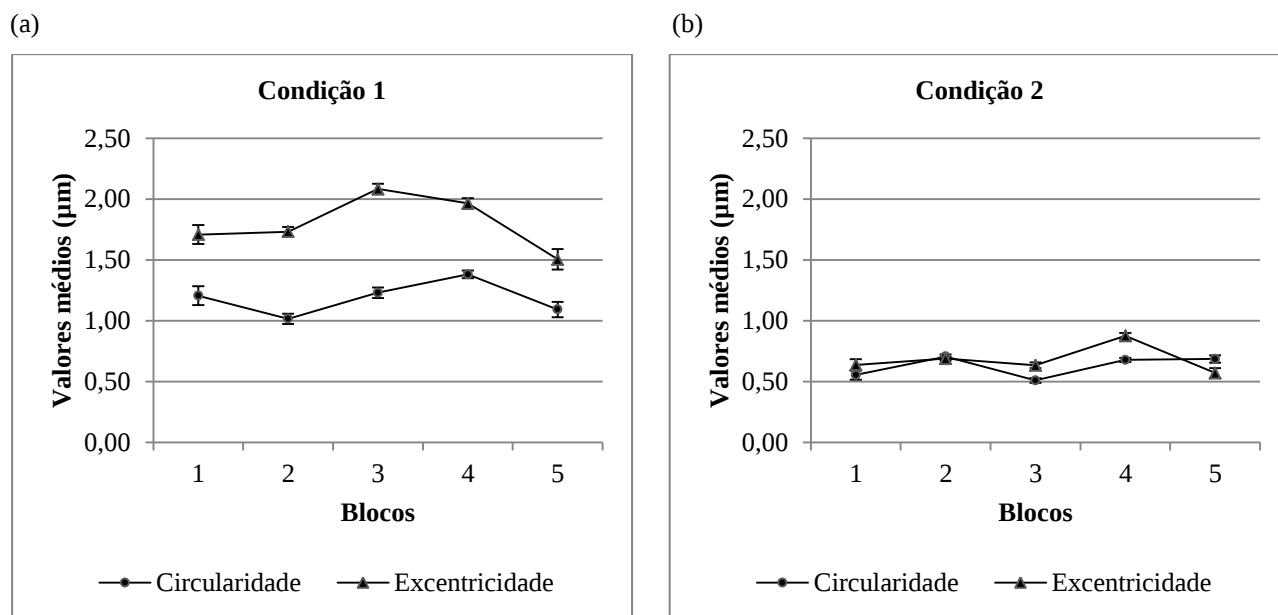


Figura 3. Valores médios de circularidade e excentricidade obtidos na medição dos blocos: (a) Condição 1; (b) Condição 2. Desvio-padrão apresentado pela barra de erro (95% de confiabilidade).

A partir da análise da Fig. 3, observa-se que os maiores valores de desvio de circularidade e de excentricidade foram obtidos na Condição 1, que refere-se àquela em que há o desbalanceamento da peça. As medições realizadas na Condição 2 tiveram redução média de 62,2% no valor do desvio de excentricidade, e de 46,6% no valor do desvio de circularidade dos blocos.

Na Condição 1, o valor médio do desvio de excentricidade é de $1,80 \mu\text{m}$, enquanto que o valor médio do desvio de circularidade é de $1,18 \mu\text{m}$. Por outro lado, na Condição 2, o valor médio do desvio de excentricidade é de $0,68 \mu\text{m}$, e o valor médio do desvio de circularidade é de $0,63 \mu\text{m}$. Neste caso, o erro sistemático na medição do desvio de circularidade, ocasionado pelo desbalanceamento da peça, assume o valor de $0,55 \mu\text{m}$. Portanto, observa-se que neste caso o desbalanceamento da peça constitui uma fonte significativa de erro sistemático. Ainda, no caso da medição de elementos tolerados, este erro pode levar à rejeição de peças com valores dentro da especificação de projeto.

Considerando uma confiabilidade de 95%, na medição do desvio de circularidade o valor máximo da precisão, em ambas as condições, foi obtida na medição do bloco 1, sendo de $\pm 0,08 \mu\text{m}$ e de $\pm 0,04 \mu\text{m}$ nas Condições 1 e 2, respectivamente. Logo, as medições realizadas na Condição 2 foram mais precisas.

Os valores de incerteza expandida associados à medição do desvio de circularidade, considerando a probabilidade de abrangência de 95%, seguem a tendência do desvio-padrão experimental. Tanto na Condição 1 como na Condição 2, a máxima incerteza foi obtida na medição do bloco 1, exibindo valores de $0,05 \mu\text{m}$ e $0,04 \mu\text{m}$, respectivamente. A componente que mais contribuiu para a incerteza final da medição, em todos os casos, foi o desvio de excentricidade da máquina.

A Figura 4 apresenta os valores de desvio de cilindridade e coaxilidade obtidos nas diferentes condições.

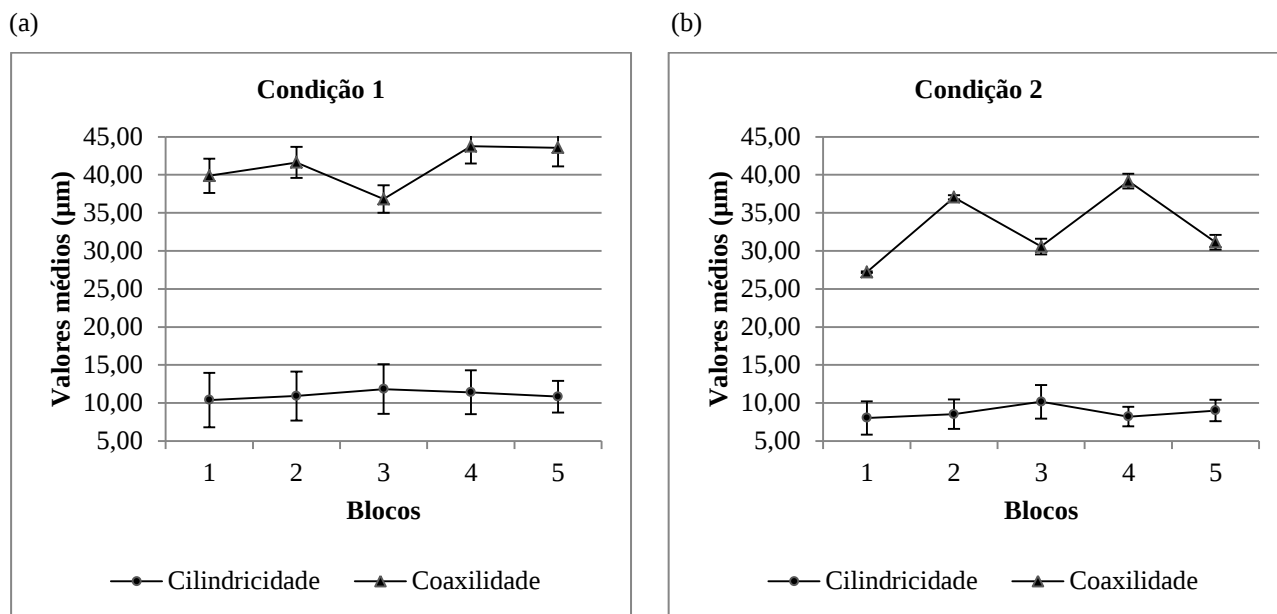


Figura 4. Valores médios de cilindridade e coaxilidade obtidos na medição dos blocos: (a) Condição 1; (b) Condição 2. Desvio-padrão apresentado pela barra de erro (95% de confiabilidade).

Como esperado, observa-se na Fig. 4 que a Condição 1 também foi aquela que resultou nos maiores valores de desvio de coaxilidade e de cilindridade. Nesta condição, o valor médio do desvio de coaxilidade é de $41,13 \mu\text{m}$, enquanto que o valor médio do desvio de cilindridade é de $11,08 \mu\text{m}$. Na Condição 2, o valor médio do desvio de coaxilidade é de $33,03 \mu\text{m}$, e o valor médio do desvio de cilindridade é de $8,80 \mu\text{m}$. Por sua vez, a parcela do erro sistemático na medição do desvio de cilindridade, devido ao desbalanceamento da peça, é de $2,28 \mu\text{m}$.

Considerando uma confiabilidade de 95%, na medição do desvio de cilindridade o valor máximo da precisão é de $\pm 3,57 \mu\text{m}$ na Condição 1 (Bloco 1), e de $\pm 2,21 \mu\text{m}$ na Condição 2 (Bloco 3).

Quanto à incerteza de medição do desvio de cilindridade, na Condição 1 o valor máximo de incerteza expandida foi obtido na medição do bloco 1, sendo de $4,43 \mu\text{m}$. Na Condição 2, este valor é de $2,21 \mu\text{m}$, na medição do Bloco 3. (95% de probabilidade de abrangência). A componente que mais contribuiu para a incerteza final da medição, em todos os casos, foi a variabilidade dos valores de desvio de cilindridade indicados pela máquina. Para minimizar este efeito pode-se aumentar o número de repetições.

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho efetuou um estudo para identificar a parcela de erro sistemático causada pelo desbalanceamento das peças, devido à distribuição não homogênea da massa das mesmas. Ao finalizar o trabalho, foi possível concluir que o erro sistemático decorrente do desbalanceamento altera de forma significativa os valores de circularidade e de cilindridade fornecidos pela MMDF, sendo este erro de $0,55 \mu\text{m}$ na medição do desvio de circularidade e de $2,28 \mu\text{m}$ para o desvio de cilindridade das peças avaliadas.

A peça com massa homogênea exibiu valores de incerteza expandida (95%) menores que aqueles encontrados na medição da peça desbalanceada, sendo esta redução de 20% para a circularidade e de 50% para a cilindridade.

5. 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 NM-ISO 1: Temperatura Padrão de Referência para Medições Industriais de Comprimento”. INMETRO, Rio de Janeiro.
- 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.
- Schmidt, A. (2005). “Análise dos Efeitos da Filtragem na Medição de Circularidade em Máquinas de Medir por Coordenadas utilizando *Scanning*”, Dissertação 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 Cilindricity and Circularity Deviation”. Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Natal.

6. AGRADECIMENTOS

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

7. ABSTRACT

The form deviation measure machine are shown as effective alternatives to measure circularity and cylindricity deviation. However, its application is limited to the measurement of piece with inhomogeneous mass distribution, since this characteristic difficult centralization operation, often resulting in high values of eccentricity or coaxilidade deviation. These deviations may lead to the appearance of additional errors that alter considerably the values indicated by the machine. Thus, this study aims to quantify the parcel of error due to the piece unbalance during measurement of the circularity and cylindricity deviation on a form deviation measure machine, specifically a compressor block whose mass distribution is inhomogeneous. Therefore, the blocks were measured in its original state and after the excess material was removed, and new measurements were performed. It concluded that the systematic error due to the unbalance significantly alters the values of circularity and cylindricity deviation of the measured pieces. Furthermore, the inhomogeneous distribution of mass piece leads to decreased measurement precision and increased expanded uncertainty values.

8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.