

MÉTODOS DE AJUSTE UTILIZADOS NOS PROGRAMAS COMPUTACIONAIS DEDICADOS ÀS MMCs

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

Resumo. As máquinas de medir por coordenadas apresentam-se como alternativas eficazes em aplicações industriais de controle dimensional e geométrico de peças. No entanto, quando não é feita a correta seleção do método de ajuste da geometria substituta do mensurando, no programa computacional dedicado à máquina, os resultados obtidos podem não ser adequados. Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre os principais métodos de ajuste implementados nos programas computacionais dedicados às MMCs para determinação das geometrias substitutas, particularmente na medição do diâmetro e do desvio de circularidade. Os métodos apresentados são: mínimos quadrados, mínima zona, máximo inscrito e mínimo circunscrito. Conclui-se que há uma carência evidente na literatura quanto às limitações e aplicabilidade de cada um dos métodos de ajuste.

Palavras chave: mínimos quadrados, mínima zona, máximo inscrito, mínimo circunscrito.

1. INTRODUÇÃO

O caráter global das relações comerciais, a competitividade e a busca por maiores parcelas no mercado levaram os países a investirem na procura de novas tecnologias, com o objetivo de aumentar a produtividade e a qualidade dos produtos. Como consequência, máquinas modernas de usinagem e inovação nos processos de fabricação foram incorporadas gradativamente ao mundo industrializado, onde os produtos são fabricados com tolerâncias cada vez mais estreitas e em maiores quantidades. Assim, surgiu a necessidade de integrar a estes sistemas meios de controle de qualidade mais rápidos, precisos, flexíveis e confiáveis.

Neste sentido, as máquinas de medir por coordenadas (MMCs) representam o que de mais avançado há em sistemas de medição utilizados no campo da metrologia moderna para efetuar o controle dimensional e geométrico de peças. Estas máquinas representam fisicamente um sistema de coordenadas cartesiano, em que pontos discretos são apalpados na superfície da peça por meio de um sensor. Um programa computacional dedicado armazena as coordenadas X , Y e Z destes pontos e, a partir delas, determina as geometrias substitutas (reta, plano, círculo, cilindro, cone, esfera, entre outras) por meio de diferentes métodos de ajuste, sendo os mais utilizados: mínimos quadrados, mínimo circunscrito, máximo inscrito e mínima zona (Phillips, 2011; Shakarji, 2011).

Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre os principais métodos de ajuste implementados nos programas computacionais dedicados às MMCs para determinação das geometrias substitutas, particularmente na medição do diâmetro e do desvio de circularidade. Com isto, busca-se contribuir para a adequada seleção dos mesmos.

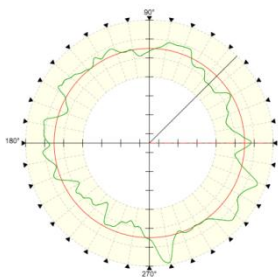
2. MÉTODOS DE AJUSTE NA MEDIÇÃO COM MMC DE DIÂMETRO E DESVIO DE CIRCULARIDADE

Na medição do diâmetro e do desvio de circularidade, para a obtenção da geometria substituta é necessário ajustar um círculo aos n pontos apalpados na superfície da peça. Para tal, podem ser utilizados os seguintes métodos (Fig.1a-d):

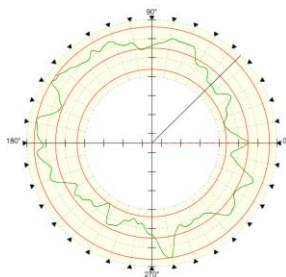
- Círculo por mínimos quadrados (LSC – *least squares circle*): consiste em calcular as coordenadas do centro de uma circunferência, de tal modo que a soma dos quadrados das distâncias dos pontos amostrados até a circunferência seja mínimo.
- Círculo por mínima zona (MZC – *minimum zone circle*): determina dois círculos concêntricos, com a menor distância radial, que limitam todos os pontos apalpados.
- Círculo mínimo circunscrito (MCC – *minimum circumscribed circle*): determina o menor círculo que pode ser ajustado pelos três pontos apalpados mais distantes do centro da circunferência.
- Círculo máximo inscrito (MIC – *maximum inscribed circle*): determina o maior círculo que pode ser ajustado pelos três pontos apalpados que apresentam a menor distância do centro da circunferência.

Nas últimas décadas, muitos pesquisadores têm desenvolvido diferentes algoritmos para calcular o desvio de circularidade pelos métodos de ajuste por mínimos quadrados, mínimo circunscrito, máximo inscrito e mínima zona (Murthy, 1986; Chou, Woo, Pollock, 1994; Samuel, Shunmugam, 2000; Huang, 2001; Zhu, Ding, Xiong, 2003; Shakarji, 2004; Wen, Xia, Zhao, 2006; Goch, Lübke, 2008; Xiuming, Zhaoyao, 2009; Gadelmawla, 2010; Sui, Zhang, 2012; Feng et al., 2013; Zhang et al., 2013). Neste sentido, Weckenmann et al. (1995) destacam que a simples diferença de utilizar um ou outro algoritmo pode decorrer num erro da mesma ordem de grandeza que o erro de medição da própria MMC.

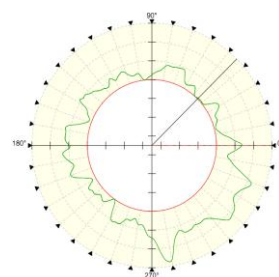
(a) LSC



(b) MZC



(c) MIC



(d) MCC

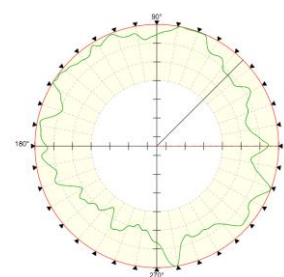


Figura 1. Círculo ajustado por (a) mínimos quadrados; (b) mínima zona; (c) máximo inscrito e (d) mínimo circunscrito.

É importante ressaltar que os diferentes métodos de ajuste produzem resultados consideravelmente distintos, principalmente quando se medem peças que apresentam desvios de forma significativos (Phillips, 2011). Entretanto, o uso do método dos mínimos quadrados é o mais difundido, uma vez que, por ser matematicamente mais simples, não necessita de recursos computacionais avançados para sua implementação, além de apresentar baixa sensibilidade à presença de pontos extremos (*outliers*) e ser aplicável para qualquer geometria. Porém, ao longo dos anos foram identificados problemas graves com o desempenho deste método, uma vez que em muitas aplicações práticas não fornece resultados adequados (Walker, 1988; Hopp, 1993; Phillips, 2011; Shakarji, 2011).

De acordo com Weckenmann et al. (1995), o método de mínimos quadrados começou a ser utilizado na medição por coordenadas para compensar os erros aleatórios da MMC. Porém, atualmente, os erros aleatórios de medição são muito menores que os erros de forma das peças medidas. Assim, o uso deste método pode derivar em um ajuste inadmissível dos desvios de forma da peça medida.

Yau e Menq (1996) destacam que mesmo sendo este método geralmente aceito e utilizado existem algumas deficiências em sua aplicação. Primeiramente, o desenvolvimento de um algoritmo de mínimos quadrados é específico para uma dada característica geométrica. Assim, por exemplo, as equações matemáticas utilizadas para o ajuste de um círculo são muito diferentes daquelas usadas no ajuste de um cilindro. Em segundo lugar, a maioria dos algoritmos de mínimos quadrados emprega linearização e/ou aproximação, de modo que as soluções podem ser obtidas por resolução de equações lineares, o que impõe restrições sobre a aplicação do algoritmo. Os autores chamam a atenção também para o fato de que a maioria dos fabricantes de MMC implementam seus próprios algoritmos de mínimos quadrados, e informações sobre os seus pressupostos e limitações geralmente não estão disponíveis.

Ao contrário do que acontece na aplicação do método de mínimos quadrados, as geometrias substitutas criadas pelos métodos mínimo circunscrito (MCC), máximo inscrito (MIC) e mínima zona (MZC) são estabelecidas a partir de um número pequeno de pontos extremos. O método MCC é mais adequado para ajuste de geometrias externas, como por exemplo, eixos; por sua vez, o método MIC é mais apropriado para ajuste de geometrias internas, como furos.

No caso particular de determinação do desvio de circularidade, o método MZC é aquele em conformidade com a norma ISO 1101 (2012), que define a circularidade como a distância “*t*” entre dois círculos concêntricos que contém o perfil adquirido, de maneira que a distância radial entre eles seja mínima (Fig. 2).

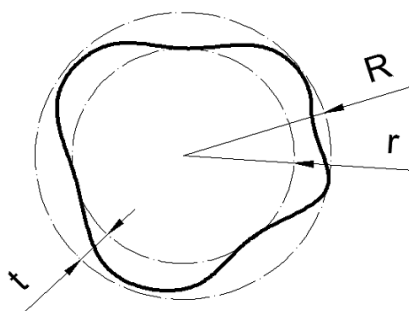


Figura 2. Representação do desvio de circularidade.

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.

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

Em trabalho recente, Rosa, Valdés e Pereira (2014a) avaliaram o desempenho dos métodos de ajuste implementados no programa computacional de uma máquina de medir por coordenadas, na medição do diâmetro de peças de alumínio torneadas. Os resultados obtidos (Fig. 3) mostraram que os maiores valores de diâmetros foram fornecidos pelo método de ajuste MCC, e os menores valores pelo MIC. Isto porque, para ambos os métodos, a presença de *outliers* afeta o valor da característica ajustada, concordando com o princípio matemático destes métodos. Por outro lado, como os métodos LSC e MZC possuem baixa sensibilidade à *outliers*, estes apresentaram valores de diâmetro intermediários quando comparados como o MCC e o MIC. Ainda, observou-se que a diferença entre os valores de diâmetros fornecidos pelos diferentes métodos de ajuste foi considerável, sendo que a maior diferença entre os métodos MCC e MIC foi de 94 μm para a peça 1, de 86 μm para a peça 2 e de 44 μm para a peça 3. Porém, os métodos LSC e MZC forneceram valores muito similares.

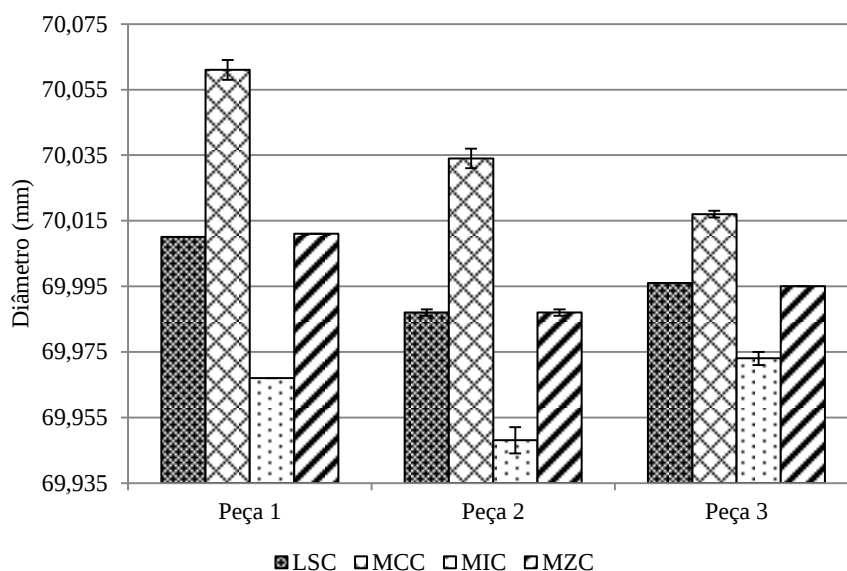


Figura 3. Valores de diâmetros de peças obtidos em uma MMC usando diferentes métodos de ajuste (Rosa; Pereira; Valdés, 2014a).

Rosa, Valdés, Pereira (2014b) também avaliaram o desempenho dos métodos de ajuste na medição do desvio de circularidade. Para tanto, esta característica foi medida em peças fabricadas com diferentes níveis de exatidão. A Fig. 4 apresenta os valores de desvios de circularidade obtidos nas medições. A diferença entre os resultados fornecidos pelos quatro métodos de ajuste avaliados é mais evidente à medida que o desvio de circularidade das peças torna-se maior. Ainda, observa-se baixa precisão dos resultados, expressa por meio das barras de erros para 68,27% de confiabilidade.

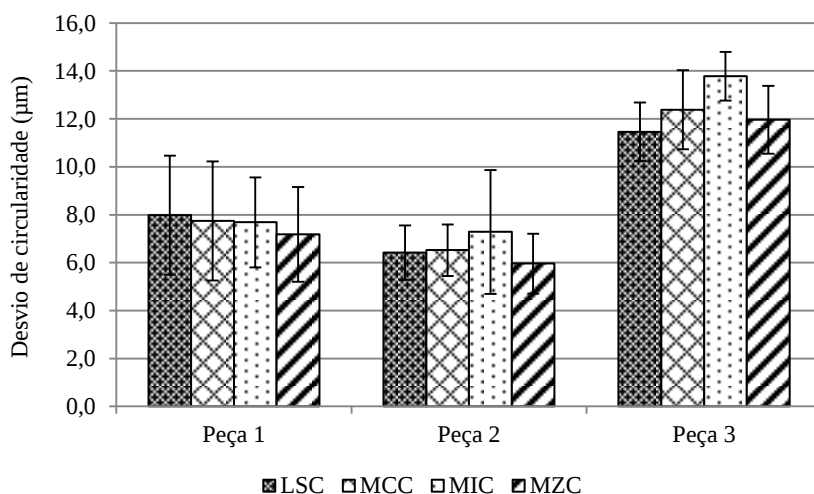


Figura 4. Valores de desvio de circularidade de peças obtidos em uma MMC usando diferentes métodos de ajuste (Rosa; Pereira; Valdés, 2014b).

3. CONCLUSÕES

Embora os diferentes métodos de ajuste tenham sido tema de pesquisa de diversos trabalhos encontrados na literatura, principalmente no que tange ao desenvolvimento de novos algoritmos, há uma carência evidente quanto às limitações e aplicabilidade de cada um dos métodos de ajuste. Portanto, faz-se necessário efetuar pesquisas neste sentido, visando orientar os operadores de MMCs na escolha do método mais adequado para uma determinada aplicação.

4. AGRADECIMENTOS

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

5. REFERÊNCIAS

- Chou S.Y.; Woo T.C.; Pollock S.M. "On Characterizing Circularity". *Journal of Design and Manufacturing*. p. 253-263, 1994.
- Feng H.; Endrias D.H.; Taher M.A.; Song H. "An accurate and efficient algorithm for determining minimum circumscribed circles and spheres from discrete data points". *Computer-Aided Design*, v. 45, n. 2, p. 105-112, 2013.
- Gadelmawla E.S. "Simple and Efficient Algorithms for Roundness Evaluation from the Coordinate Measurement Data". *Measurement*. v. 43, n. 2, p. 223-235, 2010.
- Goch G.; Lübke K. "Tschebyscheff Approximation for the Calculation of Maximum Inscribed/Minimum Circumscribed Geometry Elements and Form Deviations". *CIRP Annals, Manufacturing Technology*. v. 57, n. 1, p. 517-520, 2008.
- Hopp, H.T. "Computational Metrology". *Manufacturing Review*, v. 6, n. 4, p. 295-304, 1993.
- Huang J.A. "New Strategy for Circularity Problems". *Precision Engineering*, v. 25, n. 4, p. 301-308, 2001.
- ISO 1101:2012. "Geometrical Product Specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Tolerances of form, orientation, location and run-out". Geneva Switzerland, 2012, 103 p.
- Murthy T.S.R. "A Comparison of Different Algorithms for Circularity Evaluation". *Precision Engineering*, v. 8, n. 1, p. 19-23, 1986.
- Phillips, S.D. "Performance Evaluation". In: Hocken, R.J.; Pereira, P.H. *Coordinate Measuring Machines and Systems*. 2.ed. New York: CRC Press, 2011. 592 p.
- Rosa, V.A.O.; Pereira, L. C.; Valdés, R.A. "Avaliação do Desempenho dos Métodos de Ajuste utilizados em MMC". *Anais do 3º Congresso Internacional de Metrologia Mecânica*. Rio Grande do Sul: Gramado. 2014a.
- Rosa, V.A.O.; Pereira, L. C.; Valdés, R.A. "Contribuição na Avaliação do Desempenho Metrológico de uma MM3C na Medição de Circularidade". *Anais do 12º Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology*. Guayaquil, Ecuador. 2014b.
- Samuel G.L.; Shunmugam M.S. "Evaluation of Circularity from Coordinate and Form Data Using Computational Geometric Techniques". *Precision Engineering*. v. 24, n. 3, p. 251-263, 2000.
- Shakarji, C.M. "Coordinate Measuring System Algorithm and Filters". In: Hocken, R.J.; Pereira, P.H. *Coordinate Measuring Machines and Systems*. 2.ed. New York: CRC Press, 2011. 592 p.
- Shakarji, C.M.; Clement, A. "Reference Algorithms for Chebyshev and One-Sided Data Fitting for Coordinate Metrology". *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, v. 53, n. 1, p. 439-442, 2004
- Sui W.; Zhang D. "Four Methods for Roundness Evaluation". *Physics Procedia*, v. 24, p. 2159-2164, 2012.
- Walker, R. "CMM Form Tolerance Algorithm Testing", GIDEP Alert X1-A-88-01. Government-industry data exchange, DOD, Washington, D.C. 1988.
- Weckenmann, A.; Weber, H.; Eitzert, H.; Garmer, M. "Functionality-oriented Evaluation and Sampling Strategy in Coordinate Metrology". *Precision Engineering*, v. 17, n. 4, p. 244-252, 1995.
- Wen X.; Xia Q.; Zhao Y. "An Effective Genetic Algorithm for Circularity Error Unified Evaluation". *Internacional Journal of Machine Tools & Manufacture*. v. 46, n. 14, p. 1770-1777, 2006.
- Xiuming L.; Zhaoyao S. "The Relationship between the Minimum Zone Circle and the Maximum Inscribed Circle and the Minimum Circumscribed Circle". *Precision Engineering*. v. 33, n. 3, p. 284-290, 2009.
- Yau H.T.; Menq C.H. "A unified least-squares approach to the evaluation of geometric errors using discrete measurement data". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 36, n. 11, p. 1269-1290, 1996.
- Zhang X.; Zhang H.; He X.; Xu M.; Jiang X. "Chebyshev fitting of complex surfaces for precision metrology". *Measurement*, v. 46, n. 9, p. 3720-3724, 2013.
- Zhu L.; Ding H.; Xiong Y. "A Steepest Descent Algorithm for Circularity Evaluation". *Computer-Aided Design*. v. 35, n. 3, p. 255-265, 2003.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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