



CÁLCULO DA INCERTEZA NAS MEDIÇÕES DE CIRCULARIDADE E DE CILINDRICIDADE COM MÁQUINAS DE MEDIR POR COORDENADAS: UM MODELO SIMPLIFICADO

Cláudio Costa Souza¹, Rosenda Valdés Arencibia² e Denise Pizarro Vieira Sato³

¹ Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, claudio_costasouza@hotmail.com

² Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, arvaldes@mecanica.ufu.br

³ Centro Universitário da FEI (UniFEI), São Bernardo dos Campos, Brasil, denise@4all.com.br

Resumo: Este trabalho tem como objetivo apresentar modelos simplificados para estimar a incerteza associada à medição dos desvios de circularidade e de cilindridade em Máquinas de Medir por Coordenadas (MMCs). Para tanto, são propostas as seguintes etapas: estudo da NBR 6409, enfatizando os desvios de circularidade e cilindridade; estudo do sistema de medição (MMC), identificando as variáveis de influência em cada caso; obtenção dos modelos matemáticos; avaliação da incerteza; validação dos modelos, através da comparação dos resultados com aqueles obtidos pelo modelo proposto por Vieira Sato (2003) e análise e discussão dos resultados. Ao término do trabalho, verificou-se a viabilidade e facilidade de aplicação dos modelos propostos.

Palavras chave: incerteza, desvios geométricos, circularidade e cilindridade.

1. INTRODUÇÃO

A evolução das máquinas-ferramenta tornou a fabricação de peças mais prática e rápida. A tecnologia empregada contribuiu, também, para uma melhoria significativa do produto final. Apesar disso, a presença de desvios geométricos é inevitável. Desse modo, o entendimento e correta aplicação das normas sobre GD&T (*Geometric Dimensioning and Tolerancing*) e o conjunto de normas ISO-GPS (*Geometric Product Specification*) em departamentos de engenharia e em salas de metrologia se tornam necessários para garantir que os desvios decorrentes da fabricação não prejudiquem a montagem e o funcionamento das peças.

Segundo de Sousa e Wandek (2009), no Brasil percebem-se deficiências no entendimento e correta aplicação do GD&T. O conhecimento superficial das normas de especificação geométrica de produtos e a pouca experiência na extrapolação desses conhecimentos para a definição de boas práticas de medição estão dentre as principais deficiências encontradas, causando diversos problemas. Segundo os autores, além da dificuldade de lidar com as especificações de GD&T em si, existe ainda a dificuldade de avaliar a incerteza de medição e verificar se ela está adequada frente à tolerância controlada. Para reduzir

a ocorrência desses problemas é importante investir tempo e recursos em uma série de ações, dentre elas, a qualificação do pessoal.

O controle dimensional e geométrico vai além das linhas de produção, ganhando um significado ímpar no desenvolvimento de pesquisas na área de usinagem, pois possibilita que muitos processos de fabricação sejam estudados e melhorados.

Assim sendo, resulta de vital importância estimar e declarar a incerteza de medição juntamente com o valor médio das leituras, possibilitando a comparação dos resultados, além de servir como indicador da qualidade dos mesmos.

Pelo exposto, este trabalho tem como objetivo apresentar modelos simplificados para estimar a incerteza associada à medição dos desvios de circularidade e de cilindridade, conforme requisitado pelo GUM, utilizando uma Máquina de Medir por Coordenadas. Pretende-se com isto auxiliar a estimativa da incerteza das medições realizadas através da aplicação de um modelo simples e de fácil implementação, bem como, contribuir para a adequação das medições às exigências da NBR ISO/IEC 17025 (2005). Além disso, deseja-se aumentar o rigor científico das pesquisas e das publicações decorrentes.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Uma parcela significativa das peças fabricadas apresenta formato cilíndrico ou partes com seções cilíndricas, para as quais são aplicadas frequentemente tolerâncias de forma (circularidade e cilindridade). A aplicação destas tolerâncias assume grande importância em projetos mecânicos nos quais é requerida elevada exatidão. Entretanto, para garantir a intercambiabilidade e a funcionalidade das peças, se torna indispensável o desenvolvimento de meios e métodos que permitam a verificação das mesmas a fim de comprovar se elas estão de acordo com o especificado na fase de projeto.

2.1. Desvios de circularidade e de cilindridade

O desvio de circularidade, graficamente, equivale à distância radial mínima entre duas circunferências

concêntricas, dentre as quais deve estar contido o perfil real da peça. Para que a distância entre os círculos seja mínima, são considerados o maior círculo inscrito à seção transversal da peça e o menor círculo circunscrito, como mostrado na Fig. 1(a).

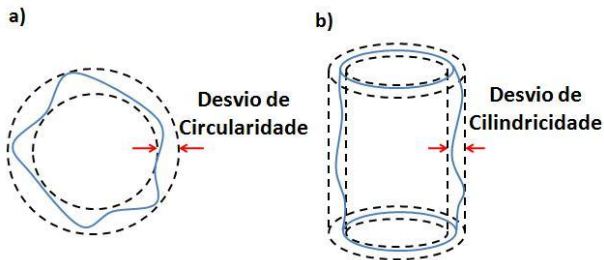


Fig. 1. Representação gráfica dos desvios de circularidade (a) e de cilindridade (b)

A medição do desvio de circularidade é efetuada por meio da avaliação de uma seção circular da peça de geometria cilíndrica. É importante ressaltar que alguns sistemas de medição consideram os infinitos pontos da seção transversal analisada, enquanto que outros sistemas possibilitam apenas uma avaliação discreta, através do apalramento de um conjunto de pontos na referida seção.

Em diversos projetos a aplicação de tolerâncias de circularidade não é suficiente para garantir o bom funcionamento das peças. Nestes casos, se faz necessário o uso de tolerâncias de cilindridade para limitar os valores máximos deste desvio.

O desvio de cilindridade é definido como a diferença radial entre dois cilindros coaxiais entre os quais deve estar localizada a superfície real da peça, de acordo com a Fig. 1(b). Essa diferença deve ser no máximo igual à tolerância de cilindridade especificada. Cabe ressaltar que o desvio de cilindridade é um desvio de forma composto, que controla circularidade e retitude da geratriz.

Dentre os sistemas de medição utilizados para o controle dimensional das peças, as Máquinas de Medir por Coordenadas ocupam um lugar destacado e tem sido utilizadas por Santos (2004), Tedesco, Zeilmann, Tentardini e Baumvol (2006); Barbosa (2007) e Cavalcante (2010).

Embora existam diferentes configurações de MMCs, o princípio de funcionamento de todas elas é similar e consiste em armazenar as coordenadas dos pontos de medição (X, Y e Z) avaliados sobre a superfície de uma determinada peça. A partir dessas coordenadas através de programas computacionais é definida a característica desejada (diâmetro de círculo, diâmetro de esfera, distância, ângulo, desvios de circularidade, de planeza, etc.).

Esses programas estão baseados nos princípios da geometria analítica vetorial e geralmente utilizam o Método dos Mínimos Quadrados para ajuste da geometria.

2.2. Incerteza de medição

Para estimar a incerteza de medição devem ser conhecidos os conceitos e as recomendações apresentados no GUM. A aplicação da metodologia proposta, neste

documento, requer que o processo de medição seja modelado matematicamente, isto é, a variável de saída (mensurando) deve ser expressa em função das variáveis de entrada (variáveis de influência) conforme Eq. (1).

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (1)$$

Onde Y representa a variável de saída e X_1, X_2, \dots, X_N são as variáveis de entrada.

A identificação das variáveis que contribuem para a incerteza final, durante um processo de medição exige que o operador possua amplos conhecimentos sobre o sistema de medição, incluindo: princípio de funcionamento, características construtivas e fontes de erros. Também, como os efeitos das condições ambientais e de suas variações afetam a indicação do referido sistema.

Assim sendo, a obtenção do modelo matemático para medições por coordenadas não é uma tarefa fácil, devido principalmente à grande quantidade de variáveis que afetam o resultado da medição.

Ainda, segundo Vieira Sato (2003), deve ser considerada, também, a incerteza associada ao método de ajuste utilizado. Para tanto a lei de propagação de incertezas deve ser aplicada no modelo matemático da geometria em questão, propagando seus resultados até o cálculo da característica medida.

A partir dessa abordagem, Vieira Sato (2003) propôs uma metodologia para estimar a incerteza associada ao desvio de circularidade em uma MMC do tipo Ponte Móvel.

Segundo a autora, inicialmente deve ser definição o número de pontos a serem apalpados na peça. Durante a medição, o programa da máquina armazena as coordenadas X, Y e Z dos pontos, projetando-os em um plano denominado plano de projeção. A seguir o raio (r) e as coordenadas do centro do círculo (x_c, y_c) que melhor se ajustam aos n pontos projetados no plano XY são determinados (Eq. 2).

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 = r^2 \quad (2)$$

Para estimar as coordenadas do centro e o raio do círculo deve-se minimizar a expressão dada pela equação (3).

$$\sum \varepsilon_i^2 = \sum (r_i^2 - r^2)^2 = \sum [-2 \cdot x_i \cdot x_c - 2 \cdot y_i \cdot y_c + (x_i^2 + y_i^2) + (x_c^2 + y_c^2 - r^2)]^2 \quad (3)$$

Em seguida são propostas mudanças de variáveis conforme indicado em (4), para assim reescrever a expressão (3) de forma linear, conforme a equação (5).

$$a = -2 \cdot x_c \quad b = -2 \cdot y_c \quad c = x_c^2 + y_c^2 - r^2 \quad (4)$$

$$MQ = \sum [a \cdot x_i + b \cdot y_i + (x_i^2 + y_i^2) + c]^2 \quad (5)$$

Os coeficientes de Mínimos Quadrados são determinados fazendo as derivadas parciais de MQ com relação às variáveis a, b e c iguais a zero, equações (6)-(8).

$$\frac{\partial MQ}{\partial a} = 2 \cdot \sum [a \cdot x_i + b \cdot y_i + (x_i^2 + y_i^2) + c] \cdot (x_i) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial MQ}{\partial b} = 2 \cdot \sum [a \cdot x_i + b \cdot y_i + (x_i^2 + y_i^2) + c] \cdot (y_i) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial MQ}{\partial c} = 2 \cdot \sum [a \cdot x_i + b \cdot y_i + (x_i^2 + y_i^2) + c] \cdot 1 = 0 \quad (8)$$

Na forma matricial tem-se o sistema linear (9).

$$\begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i \cdot y_i & \sum x_i \\ \sum x_i \cdot y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i \\ \sum x_i & \sum y_i & n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sum (x_i^3 + x_i \cdot y_i^2) \\ -\sum (x_i^2 \cdot y_i + y_i^3) \\ -\sum (x_i^2 + y_i^2) \end{bmatrix} \quad (9)$$

Em seguida é calculada a distancia (D_i) de cada ponto P_i até o centro do círculo (P_c), identificando quais os pontos mais (P_{max}) e menos (P_{min}) afastados do ponto P_c , Eq. (10).

$$D_{P_i} = D(P_c, P_i) = \sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2 + (z_i - z_c)^2} \quad (10)$$

Onde (x_c, y_c, z_c) e (x_i, y_i, z_i) são as coordenadas dos pontos P_c e P_i respectivamente.

O desvio de circularidade é dado pela diferença entre as distâncias máxima e mínima, conforme Eq. (11).

$$D_{CIRC} = D_{P_{max}} - D_{P_{min}} \quad (11)$$

Este processo deve ser repetido pelo menos três vezes e a média aritmética dos valores encontrados deve ser calculada.

A incerteza de medição do desvio (D_{CIRC}), neste caso, é influenciada pela incerteza das coordenadas dos pontos que geram o círculo e pela incerteza das coordenadas dos pontos P_{max} e P_{min} . Desta forma, aplicando a lei de propagação de incertezas, pode-se expressar a incerteza padrão combinada de D_{CIRC} como:

$$\begin{aligned} u_c^2(D_{CIRC}) = & \sum_{j=1}^N \left(\frac{\partial D_r}{\partial x_j} \right)^2 \cdot [u(x_j)]^2 + \sum_{j=1}^N \left(\frac{\partial D_r}{\partial y_j} \right)^2 \cdot [u(y_j)]^2 + \\ & + \left(\frac{\partial D_{P_{max}}}{\partial x_{P_{max}}} \right)^2 \cdot [u(x_{P_{max}})]^2 + \left(\frac{\partial D_{P_{max}}}{\partial y_{P_{max}}} \right)^2 \cdot [u(y_{P_{max}})]^2 + \\ & + \left(\frac{\partial D_{P_{max}}}{\partial z_{P_{max}}} \right)^2 \cdot [u(z_{P_{max}})]^2 + \left(\frac{\partial D_{P_{min}}}{\partial x_{P_{min}}} \right)^2 \cdot [u(x_{P_{min}})]^2 + \\ & + \left(\frac{\partial D_{P_{min}}}{\partial y_{P_{min}}} \right)^2 \cdot [u(y_{P_{min}})]^2 + \left(\frac{\partial D_{P_{min}}}{\partial z_{P_{min}}} \right)^2 \cdot [u(z_{P_{min}})]^2 \end{aligned} \quad (12)$$

A seguir devem ser calculadas as derivadas parciais presentes na Eq. (12). Todo o desenvolvimento pode ser encontrado em Vieira Sato (2003). Estes cálculos são tediosos, demorados e podem estar sujeitos a erros de cálculo se forem efetuados manualmente. Uma alternativa seria utilizar aplicativos como o Mathematica ou o MatLab para implementar todas as operações de cálculo. Assim sendo, a complexidade da metodologia proposta dificulta a adoção da mesma pela grande maioria que se dedica ao controle geométrico das peças usinadas.

Assim sendo, este trabalho propõe um modelo alternativo, de fácil entendimento e de simples implementação, visando a popularizar o cálculo da incerteza

da medição dos desvios de circularidade e de cilindridade. Esta nova formulação é apresentada na Eq. (13).

$$D_{CIRC} = \Delta s(D_{CIRC}) + \Delta P_{max} + \Delta P_{min} \quad (13)$$

A nova formulação considera que a incerteza associada ao desvio de circularidade depende de: Variabilidade dos valores do desvio de circularidade considerando os n ciclos de medição ($s(D_{CIRC})$) e das correções associadas ao ponto mais afastado do centro (P_{max}) e ao ponto menos afastado do centro (P_{min}).

Por sua vez, a incerteza desses dois pontos é função das correções associadas a: resolução da MMC (ΔR); erro do sistema de apalamento (ΔEA); incerteza da indicação da MMC; correção devido ao afastamento da temperatura ambiente em relação à de referência (ΔT_{20}) e correção associada à variação da temperatura durante a medição ($\Delta \delta T$).

$$\Delta P_{max} = \Delta P_{min} = \Delta R + \Delta EA + \Delta I + \Delta T_{20} + \Delta \delta T \quad (14)$$

Substituindo (14) em (13) e aplicando a lei de propagação de incertezas tem-se a Eq. (15).

$$\begin{aligned} u_c^2(D_{CIRC}) = & \left(\frac{\partial D_{CIRC}}{\partial \Delta s(D_{CIRC})} \right)^2 \cdot [u(\Delta s(D_{CIRC}))]^2 + 2 \cdot \left[\left(\frac{\partial D_{CIRC}}{\partial \Delta R} \right)^2 \cdot [u(\Delta R)]^2 \right] + \\ & + 2 \cdot \left[\left(\frac{\partial D_{CIRC}}{\partial \Delta EA} \right)^2 \cdot [u(\Delta EA)]^2 \right] + 2 \cdot \left[\left(\frac{\partial D_{CIRC}}{\partial \Delta I} \right)^2 \cdot [u(\Delta I)]^2 \right] + \\ & + 2 \cdot \left[\left(\frac{\partial D_{CIRC}}{\partial \Delta T_{20}} \right)^2 \cdot [u(\Delta T_{20})]^2 \right] + 2 \cdot \left[\left(\frac{\partial D_{CIRC}}{\partial \Delta \delta T} \right)^2 \cdot [u(\Delta \delta T)]^2 \right] \end{aligned} \quad (15)$$

A incerteza associada a $s(D_{CIRC})$ pode ser avaliada pela Eq. (16).

$$s(D_{CIRC}) = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (16)$$

Onde s é o desvio padrão associado aos valores de circularidade e n o número de ciclos de medição.

Por sua vez, a correção devido à resolução da MMC é dada pela Eq. (17).

$$u(\Delta R) = \frac{R}{2 \cdot \sqrt{3}} \quad (17)$$

A correção devido ao erro de apalamento é dada pela Eq. (18).

$$u(\Delta EA) = \frac{EA}{\sqrt{6}} \quad (18)$$

Por sua vez, a correção devido à incerteza da indicação da máquina é determinada pela Eq. (19).

$$u(\Delta I) = \sqrt{\left(\frac{\Delta I_{(x)}}{k_{(x)}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta I_{(y)}}{k_{(y)}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta I_{(z)}}{k_{(z)}} \right)^2} \quad (19)$$

Ambas as variáveis relacionadas à variação da temperatura ambiente foram medidas com o mesmo sistema de medição, assim sendo, elas são correlacionadas e foram tratadas como tal. A correção associada ao afastamento da temperatura em relação a 20 °C (ΔT_{20}) é determinada utilizando-se a Eq. (20).

$$u(\Delta T_{20}) = \sqrt{\left(\frac{\Delta T}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_T}{2 \cdot \sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_T}{k_T}\right)^2} \quad (20)$$

onde ΔT é a diferença entre a temperatura ambiente e 20 °C; ΔR_T é a correção da resolução do termômetro e ΔI_T é a incerteza da indicação do termômetro. Ainda, a incerteza associada à variação da temperatura durante a medição é determinada pela Eq. (21).

$$u(\Delta \delta T) = \sqrt{\left(\frac{\text{Var}(T)}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_T}{2 \cdot \sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_T}{k_T}\right)^2} \quad (21)$$

3. METODOLOGIA

Os desvios de circularidade e de cilindridade de três furos e de um eixo, pertencentes a uma única peça, foram medidos utilizando-se uma Máquina de Medir por Coordenadas do tipo Ponte Móvel (Figura 2).

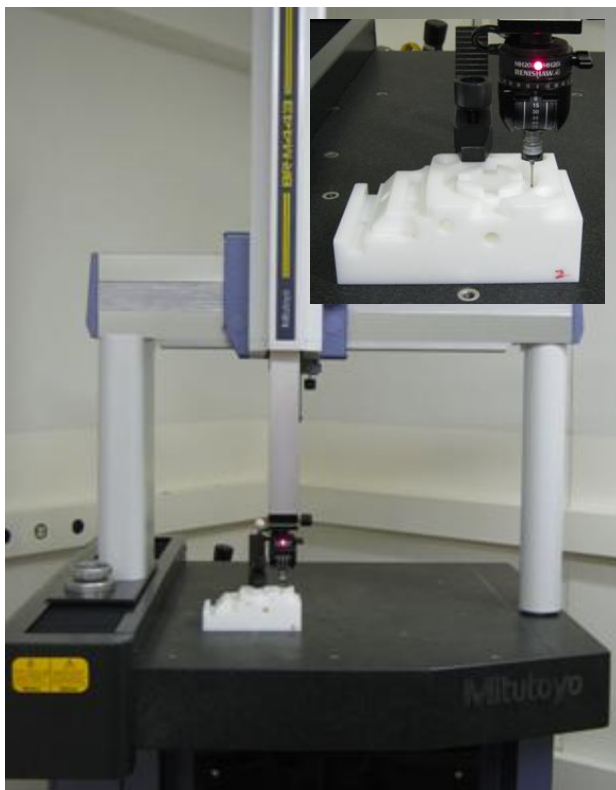


Fig. 2. Máquina de Medir por Coordenadas

Esta máquina, fabricada pela Mitutoyo Sul Americana, é manual. Possui resolução de 0,001 mm e volume de trabalho de 400 x 400 x 300 mm para os eixos X, Y e Z respectivamente.

As medições foram efetuadas por um operador, em um único dia, no Laboratório de Metrologia Dimensional da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU, com temperatura ambiente controlada de 20 ± 1 °C. Um termohigrômetro com incremento digital de 0,1 °C e faixa de indicação de -20 a 60 °C foi utilizado para monitorar a temperatura ambiente.

Todos os dispositivos utilizados e a peça objeto de medição foram expostos a esta temperatura por aproximadamente 12 h para que os mesmos atingissem o equilíbrio térmico com o ambiente. A limpeza de todos os equipamento e dispositivos de medição foi efetuada, com o intuito de remover partículas de poeira capazes de interferir nos resultados das medições.

Para a medição da circularidade foram considerados 5, 7, 11 e 13 para os diferentes diâmetros, apalpados em uma única seção transversal da característica cilíndrica. Enquanto que, para a medição de cilindridade, foram apalpados $2 \cdot n + 1$ pontos distribuídos em 2 planos de medição ao longo da peça, onde n representa o número de pontos apalpados durante a medição de circularidade. Todas as medições foram repetidas cinco vezes.

Segundo o certificado de calibração, a referida máquina possui uma incerteza expandida linear de $1,2 + L/1300$ [µm] e $k = 2,2$ para o eixo X; de $1,2 + L/1300$ [µm] para o eixo Y e de $1,0 + L/1300$ [µm] para o eixo Z. Enquanto que o erro de apalamento é de 2,9 µm.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores de diâmetros médios encontrados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Diâmetros das características medidas

Mensurando	Diâmetro (mm)		
	Média	Desvio padrão	Inc. Expandida
1	8,008	0,004	0,006
2	19,936	0,016	0,016
3	47,953	0,013	0,021
4	67,957	0,005	0,006

A Tabela 2 mostra os valores de circularidade e de cilindridade obtidos para todas as características medidas.

Tabela 2. Desvios de circularidade e de cilindridade medidos

Mensurando	Desvio de circularidade (µm)		Desvio de cilindridade (µm)	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
1	10	2	11	2
2	57	4	61	5
3	95	5	102	5
4	92	5	105	3

As figuras 3 e 4 mostram os valores da incerteza padrão combinada e expandida associada à medição dos desvios de circularidade e de cilindridade para os quatro

mensurandos. Estes valores foram obtidos aplicando a nova formulação proposta.

Cabe ressaltar que durante os cálculos foram acrescentados dois algoritmos significativos para minimizar os erros de arredondamento. Ainda, a variação da temperatura durante a medição não foi considerada porque as medições foram efetuadas em um curto intervalo de tempo.

Apesar da excelente resolução da MMC, o afastamento da temperatura ambiente com relação à de referência também foi desprezado. Isso porque a temperatura durante a medição foi de 20,3 °C. Assim sendo, os efeitos térmicos não são percebidos por este, pois os valores dos desvios geométricos de circularidade e de cilindridade são na ordem dos micrometros.

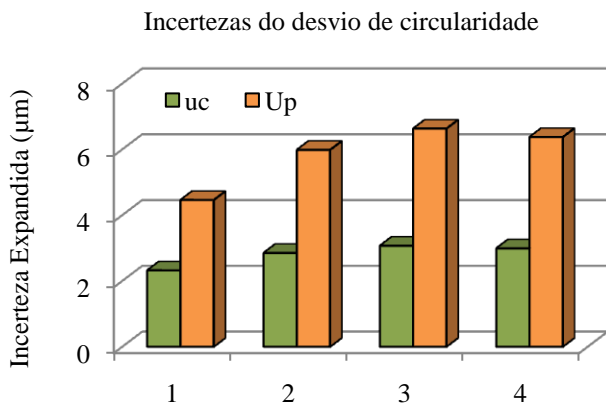


Fig. 3. Incertezas padrão combinada (uc) e expandida (Up) associadas ao desvio de circularidade

Segundo a Figura 3 a incerteza padrão combinada associada à medição do desvio de circularidade das características medidas variou entre 2,3 e 3,1 µm. Por sua vez, a incerteza expandida assume valores entre 4,5 e 6,3 µm, para 95,45 % de abrangência.

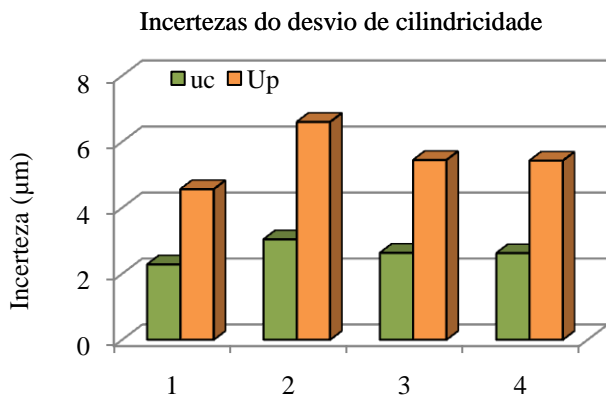


Fig. 4. Incertezas padrão combinada (uc) e expandida (Up) associadas ao desvio de cilindridade

A Figura 4 mostra que os valores de incerteza padrão combinada associados à medição do desvio de cilindridade

variam entre 2,3 e 3,0 µm. Enquanto que a incerteza expandida assume valores entre 4,6 e 6,6 µm para uma probabilidade de abrangência de 95,45 %.

Em todos os casos, as variáveis que mais contribuíram para a incerteza final foram o erro de apalamento da MMC e a variabilidade dos valores dos desvios geométricos de circularidade e de cilindridade em cada caso.

Os modelos simplificados propostos se mostraram viáveis e fáceis de aplicar para avaliação da incerteza associada à medição de ambos os desvios estudados. Ambas as metodologias foram implementadas no Excel.

4.1. Validação dos modelos propostos

A seguir foi efetuada a validação dos modelos matemáticos propostos para avaliar a incerteza associada à medição dos desvios de circularidade e de cilindridade. Para tanto os resultados obtidos foram comparados com aqueles fornecidos pela metodologia proposta por Vieira Sato (2003). Esta última foi implementada utilizando-se o MATLAB.

As Figuras 5 e 6 mostram os valores de incerteza expandida obtidos por ambos os métodos, para os desvios de circularidade e de cilindridade, respectivamente.

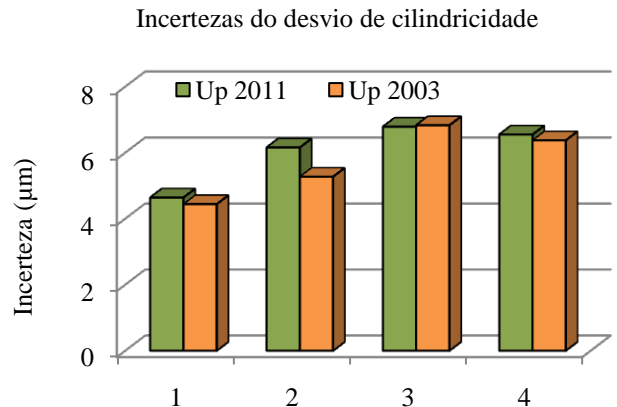


Fig. 5. Valores obtidos por ambos os métodos (desvio de circularidade)

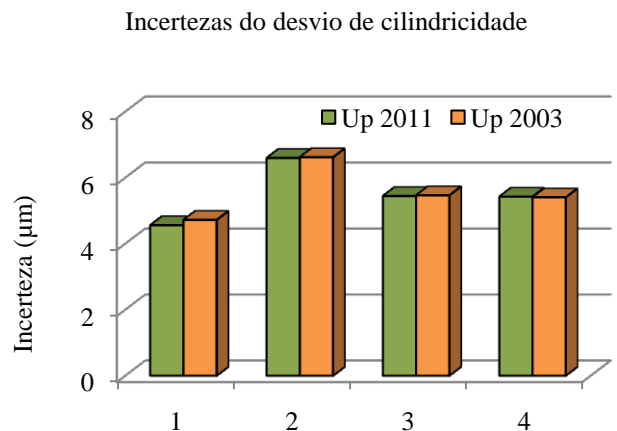


Fig. 6. Valores obtidos por ambos os métodos (desvio de cilindridade)

Como critério de aceitação foi adotado que a diferença entre os valores de incertezas calculados por ambos os

métodos fosse próxima de 10 %. Isto porque, segundo Instone (1996), qualquer dos métodos reconhecidos para combinar contribuintes de incerteza resultará em um valor aproximadamente 10 % igual ao obtido por qualquer outro método. A falha principal de qualquer um deles é a quantidade de medições que resultará em custos muito altos que são repassados para o cliente, ou o risco de assegurar uma medição pode aumentar se o instrumento for calibrado utilizando-se um número de pontos significativamente menor.

Nas Figuras 5 e 6, pode ser observado que os valores de incerteza expandida, obtidos pela nova formulação, são similares que os fornecidos, quando aplicada a metodologia proposta por Vieira Sato (2003).

A maior diferença entre os valores de incerteza expandida para o desvio de circularidade foi observada para a medição do segundo mensurando, que é de 0,9 μm , representando, aproximadamente, 14,4 %. Para todos os outros casos as diferenças encontradas foram menores que 5 %.

Por sua vez, para o desvio de cilindridade a maior diferença entre os valores fornecidos por ambos os modelos foi de 0,2 μm , representando, aproximadamente, 4,5 %. Para todos os outros casos as diferenças encontradas foram menores.

Embora a nova formulação não considere a parcela de correção devido ao método do ajuste da geometria, os resultados encontrados são adequados. As diferenças observadas são pequenas e podem ser atribuídas aos valores dos coeficientes de sensibilidade. Estes coeficientes, para a nova formulação, são unitários, para as 4 primeiras variáveis da Eq. (13) e somente para as 2 últimas variáveis assumem valores diferentes de 1. Entretanto, nestes casos, o valor da incerteza padrão é muito pequeno. Já para o modelo proposto por Vieira Sato (2003) os coeficientes de sensibilidade são o resultado da solução de derivadas parciais complexas, sendo diferentes de 1 para todas as variáveis em quase todos os casos. Assim os pesos relativos às incertezas padrão são diferentes para os dois modelos.

5. CONCLUSÕES

Ao término do trabalho, as seguintes conclusões foram formuladas.

Os modelos simplificados propostos se mostraram viáveis e fáceis de aplicar para cálculo da incerteza associada à medição de ambos os desvios estudados.

Em todos os casos, as variáveis que mais contribuíram para a incerteza final foram o erro de apalramento da MMC e a variabilidade das leituras.

A incerteza expandida apresentou valores entre 4,5 e 6,3 μm para o desvio de circularidade, enquanto que para o desvio de cilindridade a incerteza expandida variou entre 4,6 e 6,6 μm , para 95,45 % de abrangência.

A maior diferença entre os valores de incerteza expandida, obtidos por ambos os modelos, foram observados para a medição do segundo mensurando, que é

de 0,4 μm , representando, aproximadamente, 14,4 %. Para todos os outros casos, as diferenças encontradas foram menores que 5 %.

Apesar da diferença superior a 10 % encontrada para o segundo mensurando, o novo modelo apresentou uma incerteza maior em relação ao proposto em Vieira Sato (2003), o que torna o valor obtido aceitável.

A parcela de incerteza relativa ao método de ajuste não representa uma contribuição significativa para a incerteza total da medição e, portanto, pode ser desprezada.

Comparando-se os valores obtidos por ambos os modelos matemáticos, pode-se afirmar que o modelo proposto se mostra aplicável devido à simplicidade de execução dos cálculos e à facilidade de interpretação dos dados relacionados a cada grandeza de influência.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] A. R. de Sousa, M. Wandek, *Deficiências da Metrologia Industrial no Brasil no Correto Entendimento do GD&T e na Definição de Estratégias de Medição Consistentes para o seu Controle Geométrico*, Proceedings of the V Congresso Brasileiro de Metrologia, 5 p, Salvador, Brazil, 2009.
- [2] NBR ISO/IEC 17025. *Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração*, 20 p, Rio de Janeiro, Brazil, 2005.
- [3] R. G. Santos, *Avaliação do processo de alargamento de guias de válvulas*, Universidade Federal do Paraná, 107 p, Curitiba, Brazil, 2004.
- [4] M. E. Tedesco, R. P. Zeilmann, E. K. Tentardini, I. J. R. Baumvol, *Estudo sobre qualidade superficial e desvio dimensional do aço AISI 4140 submetido ao processo de torneamento*, Proceedings of the 17º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 12 p, Foz do Iguaçu, Brazil, 2006.
- [5] L. M. Barbosa, *Monitoramento do comportamento da broca chamdrill na usinagem do ferro fundido cinzent*, Proceedings of the 4º Congresso Brasileiro de Engenharia e Fabricação, 10 p, Estância de São Pedro, Brazil, 2007.
- [6] F. J. N. Cavalcante, *Análise de utilização de broca escalonada de canal reto no processo de furação em liga de alumínio utilizada na indústria automotiva*, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 123p, Curitiba, Brazil, 2010.
- [7] D. P. Vieira Sato, *Determinação da incerteza de medição a três coordenadas*. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 89 p, São Paulo, Brazil, 2003.
- [7] INMETRO. *Guia para a Expressão da Incerteza de Medição*, 120 p, Rio de Janeiro, Brazil, 2008.
- [8] NBR 6409 *Tolerâncias Geométricas – Tolerâncias de Forma, Orientação, Posição e Batimento – Generalidades, Símbolos, Definições e Indicações em Desenho*. 19 p, Rio de Janeiro, Brazil, 1997.
- [9] I. Instone, *Simplified method for assessing uncertainties in a commercial production environment. Uncertainties Made Easy (Digest No. 1996/168)*, Proceedings of the IEE Colloquium. pp.3/1-3/7, London, England, 1996.