

MEDIÇÃO DE DESVIOS GEOMÉTRICOS DE FORMA E ORIENTAÇÃO UTILIZANDO-SE UM SISTEMA AUTOMATIZADO

Benedito di Giacomo¹, Juliana Keiko Sagawa², Fabrício Tadeu Paziani³

¹ Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo - USP, São Carlos-SP, Brasil, bgiacomo@sc.usp.br

² Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo - USP, São Carlos-SP, Brasil, jsagawa@sc.usp.br

³ Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo - USP, São Carlos-SP, Brasil, fpaziani@sc.usp.br

Resumo:

Nos tempos atuais, os sistemas de medição, em sua maioria, devem apresentar rapidez e flexibilidade. Estes requisitos são exigidos especialmente quando tais sistemas são utilizados para a inspeção de peças na linha de montagem e para o controle de qualidade durante a produção dos lotes. Diante desse contexto, apresenta-se neste trabalho um sistema automatizado para a avaliação de desvios geométricos de componentes. O sistema é composto por um robô industrial com seis graus de liberdade, sensores de deslocamento do tipo LVDT, placa de aquisição de dados e microcomputador. Neste caso, os erros de posicionamento do manipulador utilizado na medição são muito significativos, o que torna imprescindível a utilização de modelos de separação de erros. O modelo adotado neste trabalho utiliza sensores múltiplos e redundância de dados, e foi aplicado a conjuntos de dados experimentais coletados utilizando-se sistema proposto. Como resultado desse processamento, obtêm-se os perfis reais dos componentes medidos. Algoritmos de ajustagem de formas geométricas de referência são aplicados a estes perfis para avaliação dos erros de forma e orientação. O desempenho do sistema foi avaliado por meio de análise comparativa com sistemas convencionais de medição. Os resultados obtidos demonstram a eficiência do sistema desenvolvido.

Palavras chave: medição automatizada, separação de erros, desvios de forma e orientação, robô industrial.

1. INTRODUÇÃO

O modo de produção vigente exige cada vez mais rapidez e eficiência nos processos. Estes requisitos incidem diretamente no setor produtivo industrial e a capacidade de atendê-los é um fator crítico para a competitividade das empresas. Os processos de fabricação mecânica têm progressivamente apresentado maiores velocidades, produtividade e ganhos de capabilidade. Em resposta a essas tendências, constituem-se desafios à área de Metrologia a obtenção de sistemas de medição e algoritmos de avaliação de erros com acuracidade ainda maior, exatidão na avaliação de incertezas e acentuada rapidez na medição.

Sistemas automatizados de medição têm sido desenvolvidos com o intuito de atender a estes requisitos de

rapidez e flexibilidade. Este trabalho apresenta um sistema automatizado de medição em que um robô industrial é utilizado para a avaliação de erros de forma e orientação de componentes. Os robôs apresentam, em geral, erros de posicionamento que limitam sua utilização na execução de medições, especialmente se os erros a serem avaliados são da ordem de unidades ou dezenas de micrometros. Assim, a utilização do sistema proposto requer a aplicação de modelos de separação de erros aos dados medidos. O modelo de separação de erros aplicado neste trabalho é apresentado no item 2.

O sistema proposto foi empregado na medição do desvio de planicidade e perpendicularismo de componentes. Os resultados experimentais obtidos foram comparados com os valores de desvio obtidos por meio de sistemas convencionais de medição. Alguns resultados comparativos são apresentados neste trabalho. Aspectos relativos ao desempenho do sistema também são discutidos brevemente.

2. O MODELO DE SEPARAÇÃO DE ERROS

Os modelos ou métodos de separação de erros são utilizados com a função de desacoplar os erros geométricos dos componentes dos erros de posicionamento e movimentação do sistema de medição. A implementação desses modelos é necessária nos casos em que a ordem de grandeza dos erros apresentados pelo sistema de medição é próxima à ordem de grandeza dos desvios geométricos que estão sendo avaliados.

Alguns métodos de separação de erros existentes são baseados no princípio da redundância de dados e na utilização de múltiplos sensores. Este é o caso do Método dos Três Pontos, no qual são utilizados 3 sensores de deslocamento alinhados que se movimentam ao longo de uma direção de medição perpendicular às variações de altura medidas na superfície do componente. As amostras são coletadas em intervalos regulares. Modelos de equações para este método são apresentados em [1] e [2].

O modelo adotado neste trabalho também baseia-se no Método dos Três Pontos. Tal modelo foi inicialmente apresentado em [3] e [4] e aplicado à avaliação do desvio de retilidade. Um esquema representativo deste modelo é apresentado na Figura 1.

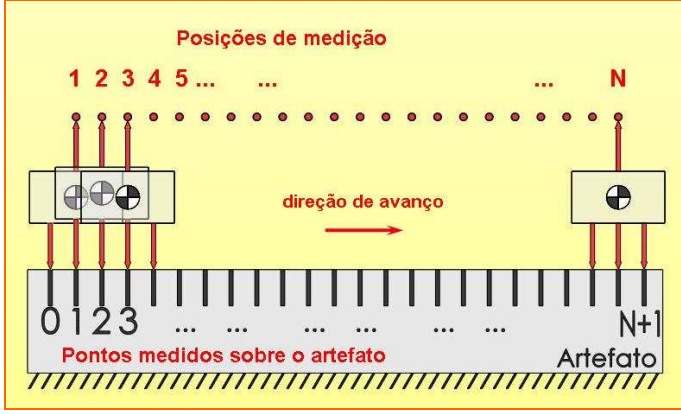


Fig. 1. Diagrama do modelo de separação de erros

O desenvolvimento do modelo de separação de erros adotado apóia-se no reconhecimento de quatro fontes de erro principais presentes no sistema de medição: os desvios no perfil da peça, os erros de movimentação translacional do robô, os erros devido à inclinação do dispositivo porta-sensores e os erros devido ao desalinhamento inicial entre os sensores. O sistema de equações 1 apresenta as principais parcelas de erro presentes na leitura dos sensores.

$$\begin{aligned} L_{Ai} &= E_{Ai}^p + E_{Ai}^R + E_{Ai}^\delta + E_{Ai}^s \\ L_{Bi} &= E_{Bi}^p + E_{Bi}^R + E_{Bi}^\delta + E_{Bi}^s \\ L_{Ci} &= E_{Ci}^p + E_{Ci}^R + E_{Ci}^\delta + E_{Ci}^s \end{aligned} \quad (1)$$

$i = 1, 2, 3, \dots, N,$

onde L_{Ai} , L_{Bi} e L_{Ci} são as leituras de cada sensor na i -ésima posição de medição, E^p é o erro do perfil da peça lido por cada um dos sensores, A, B e C; E_i^R é a componente do erro de translação do robô na i -ésima posição, E_i^δ é o erro de inclinação do porta sensores na posição de medição i e E^s é a componente de erro devido ao desalinhamento entre os sensores. O índice i define uma determinada posição de medição, enquanto N é o número total de posições de medição, definido pelo número total de vezes em que o manipulador posiciona os sensores para realizar medições.

Os erros do perfil da peça constituem-se desvios com relação a um perfil ideal definido. No caso de avaliação da retilidade, este perfil ideal é uma reta. Uma hipótese importante do modelo é que o erro da peça em um dado ponto do perfil é o mesmo em todas as medições. O desvio com relação ao perfil ideal da peça, lido por cada um dos sensores, é definido no modelo como:

$$\begin{aligned} E_{Ai}^p &= R_{i-1}^p + (CA_p + A_p \cdot x_{i-1}) \\ E_{Bi}^p &= R_i^p + (CA_p + A_p \cdot x_i) \\ E_{Ci}^p &= R_{i+1}^p + (CA_p + A_p \cdot x_{i+1}) \end{aligned} \quad (2)$$

$i = 1, 2, 3, \dots, N,$

onde as alturas do perfil de retilidade da peça são representadas pela variável R^p , e tais alturas são medidas com relação a uma reta de referência, definida pelos parâmetros CA_p e A_p .

O erro de movimentação translacional do manipulador é modelado de forma semelhante ao erro do perfil da peça:

$$\begin{aligned} E_{Ai}^R &= R_i^R + (CA_R + A_R \cdot x_i) \\ E_{Bi}^R &= R_i^R + (CA_R + A_R \cdot x_i) \\ E_{Ci}^R &= R_i^R + (CA_R + A_R \cdot x_i) \end{aligned} \quad (3)$$

$i = 1, 2, 3, \dots, N,$

onde R_i^R é o erro translacional do robô ao assumir uma posição de medição i , e CA_R e A_R são os parâmetros de uma reta de referência para a movimentação do manipulador.

Este último erro apresentado advém da acuracidade limitada de posicionamento do robô, a qual impede que ele se coloque numa mesma altura, em z , para todos os pontos medidos.

Além do erro translacional do robô ao posicionar os sensores, o modelo de separação considera a existência de um erro de inclinação do porta-sensores. Levando-se em conta o fato de que o dispositivo é simétrico e simetricamente fixado ao punho do manipulador, pode-se admitir que este erro de inclinação esteja relacionado a uma rotação que ocorre em torno do ponto central do porta-sensores. Assim, o efeito dessa rotação é nulo para o sensor central e afeta os dois sensores externos de maneira oposta:

$$\begin{aligned} E_{Ai}^\delta &= -\delta_i = -\theta_i \cdot L \\ E_{Bi}^\delta &= 0 \\ E_{Ci}^\delta &= \delta_i = \theta_i \cdot L \end{aligned} \quad (4)$$

onde δ_i é o desvio devido à rotação do porta sensores na i -ésima posição, o qual, por sua vez, é obtido pela multiplicação do ângulo de rotação θ_i pela distância L entre o sensor central e os sensores das extremidades.

Deve-se mencionar ainda a existência de um desalinhamento inicial entre a posição nula dos sensores de medição, desalinhamento este que contribui para a distorção das leituras dos pontos do perfil. No modelo adotado, este erro é expresso como um erro de posicionamento (constante de calibração k_B) do sensor central quando as leituras zero dos sensores das extremidades são tomadas como referência, conforme mostrado no sistema de equações 5.

$$\begin{aligned} E_{Ai}^s &= 0 \\ E_{Bi}^s &= k_B \\ E_{Ci}^s &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

O sistema linear final que representa o modelo de separação de erros aplicado neste trabalho é obtido pela substituição das parcelas da Equação 1 pelas expressões que definem cada tipo de erro. Assim, obtém-se:

$$\begin{aligned} L_{Ai} &= R_{i-1}^p + [CA_p + A_p \cdot x_{i-1}] + R_i^R + [CA_R + A_R \cdot x_i] - \theta_i \cdot L \\ L_{Bi} &= R_i^p + [CA_p + A_p \cdot x_i] + R_i^R + [CA_R + A_R \cdot x_i] + k_B \\ L_{Ci} &= R_{i+1}^p + [CA_p + A_p \cdot x_{i+1}] + R_i^R + [CA_R + A_R \cdot x_i] + \theta_i \cdot L \end{aligned} \quad (6)$$

Nos trabalhos [1] e [2], para se obter a solução do Método dos Três Pontos são efetuadas diferenças entre as leituras apresentadas por cada um dos sensores. Segundo o modelo matemático apresentado por estes autores, tais diferenças correspondem aos diferenciais de uma função experimental que representa os pontos do perfil do componente medido. Assim, a função que representa o perfil é obtida a partir da integração numérica destas diferenças

entre as leituras. Porém, quando este procedimento é adotado, o erro de desalinhamento entre os sensores gera um erro parabólico de grande magnitude que distorce significativamente o perfil obtido. Tal fato foi constatado em [7]. Para a solução do modelo proposto neste trabalho, adota-se uma estratégia de repetição das medições. Dessa forma, é possível gerar linhas adicionais do sistema, linearmente independentes entre si, sem que haja um aumento proporcional no número de incógnitas, uma vez que os desvios geométricos da peça permanecem os mesmos nas várias repetições. Isto, por sua vez, permite a solução direta do sistema linear.

3. SISTEMA AUTOMATIZADO DE MEDIÇÃO E PROCEDIMENTO DE TRATAMENTO OS DADOS

O sistema automatizado de medição é composto por um robô industrial com 6 graus de liberdade, um microcomputador, uma coluna eletrônica de medição, sensores de deslocamento e dispositivos auxiliares de fixação dos sensores e das peças a serem medidas, conforme apresentado na Figura 3.

Neste sistema proposto, um dispositivo é acoplado à extremidade do robô, e nele são fixados os três sensores de deslocamento que farão a leitura dos pontos do perfil da peça a ser medida. Tal dispositivo, denominado, por simplicidade, porta-sensores, é movido pelo manipulador em uma direção perpendicular ao eixo dos sensores para a coleta de dados.

Além dos equipamentos e dispositivos descritos, o sistema inclui um programa de aquisição de dados e várias rotinas de implementação de modelos matemáticos e algoritmos. A sequência do processamento de dados é mostrada na Figura 2.

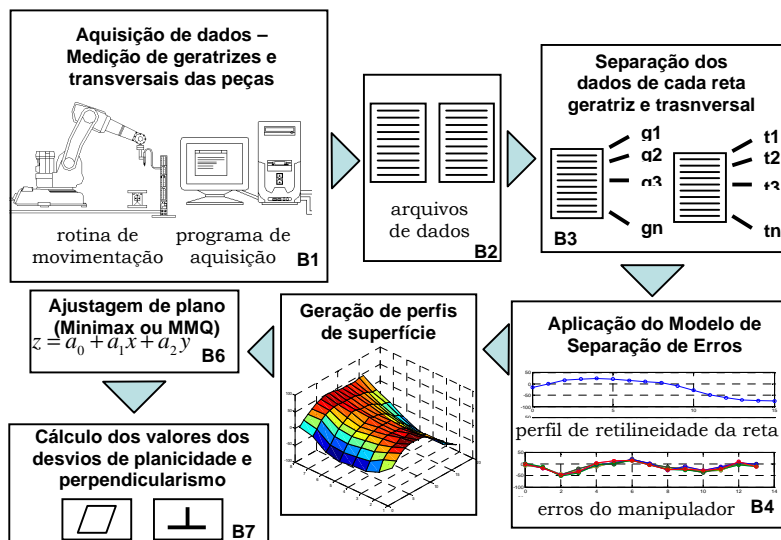


Fig. 2. Fluxograma de dados no sistema automatizado

A aquisição de dados é realizada utilizando-se o sistema automatizado de medição e as rotinas de movimentação do robô e de coleta de dados, conforme mostra o bloco B1. São medidas várias retas sobre a superfície da peça, dispostas segundo uma malha ortogonal. O arquivo eletrônico gerado pelo programa de aquisição contém dados destas retas

geratrizes e transversais, os quais devem ser separados em subconjuntos para possibilitar a aplicação do modelo de separação de erros. Estas etapas são mostradas nos blocos B3 e B4. Após a separação dos erros, executa-se um pré-processamento dos perfis das retas para a obtenção de perfis de superfície. A estas superfícies obtidas, são ajustados planos médios, conforme exibido no bloco B6. A partir dos parâmetros destes planos e dos resultados fornecidos pelos métodos de ajustagem, é possível calcular os valores dos desvios de forma e orientação.



Fig. 3. Foto do sistema automatizado de medição

O desvio de perpendicularismo das peças é medido indiretamente: as peças são apoiadas sobre a base magnética e avalia-se o desvio de paralelismo de sua face superior em relação a um plano de referência, da mesma forma como se procede nas medições deste desvio utilizando-se sistemas convencionais. Esta montagem é mostrada na Figura 4. Para a avaliação dos desvios de paralelismo e perpendicularismo por meio do sistema proposto, é necessário realizar também a medição deste plano de referência, seguindo as etapas apresentadas na Figura 3, até o bloco B6. Os desvios citados são então obtidos por meio do cálculo da diferença entre a inclinação do plano ajustado ao perfil da peça e a inclinação do plano ajustado ao perfil da superfície de referência.

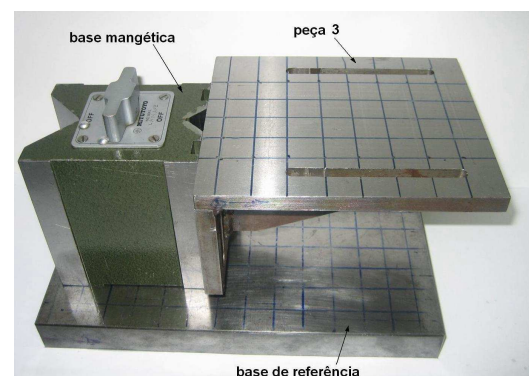


Fig. 4. Montagem para avaliação do desvio de perpendicularismo.

A interface entre os equipamentos de medição e as rotinas de análise de dados é feita por meio de uma placa de aquisição na qual foram implementados módulos de

conversão analógico-digital, A/D, e digital-analógico, D/A. Assim, o sinal analógico dos sensores é convertido em um número de 12 bits e armazenado. O fundo de escala da placa permite uma tensão de entrada correspondente a uma faixa de $-300\ \mu\text{m}$ a $+300\ \mu\text{m}$, fornecendo uma resolução de aproximadamente $0,15\ \mu\text{m}$ por número A/D. Na placa utilizada, realiza-se também a conversão de números digitais de 12 bits em uma faixa sinais analógicos de 0 V a 10 V.

O programa de aquisição de dados das múltiplas geratrizes foi escrito em linguagem gráfica, tornando a interface amigável ao usuário. Para que as medições possam ser realizadas, este programa de aquisição e a rotina de movimentação do manipulador devem funcionar de forma integrada. Assim, ambas as rotinas incluem instruções de comunicação entre o manipulador e microcomputador. Esta comunicação é realizada por meio do envio de sinais digitais e analógicos. O programa de aquisição envia à placa de conversão um determinado número digital de 12 bits, o qual é transformado em um sinal analógico e enviado ao manipulador. É desta forma, por exemplo, que o programa de aquisição informa ao manipulador que a valor da leitura de determinado ponto de medição já foi armazenado. Ao receber esta informação, o robô move-se para o próximo ponto de medição.

As rotinas de implementação do modelo de separação de erros e do modelo de ajustagem do plano médio foram desenvolvidas em ambiente Matlab®. Tal ajustagem é realizada utilizando-se dois métodos distintos: o tradicional método dos Mínimos Quadrados e o Método Minimax. Este último método baseia-se, como o nome sugere, na minimização dos desvios máximos em relação à curva de referência apresentados por alguns pontos. A ajustagem, neste caso, é modelada como um problema de Programação Linear, o qual pode ser resolvido com o método Simplex ou outros métodos iterativos de otimização similares a ele.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Testes experimentais com três peças distintas foram executados para a avaliação sistema proposto. Realizou-se uma análise comparativa entre os resultados obtidos utilizando-se o sistema automatizado, os resultados obtidos por meio de medição convencional e os resultados obtidos com a medição por coordenadas. Na tabela 1 e nas figuras 5, 6 e 7 são exibidos alguns resultados de medição.

Tabela 1. Valores dos desvios geométricos da Peça 1 (ajustagem Minimax)

	Peça 1 - Sistema Automatizado			Peça 1 - Sistema Convencional		
	01	02	03	01	02	03
Amostras de medição	01	02	03	01	02	03
Desvio de planicidade (μm)	120	124	120	98	100	102
Desvio de perpendicularismo (μm) – Método Minimax	-154	-141	-147	-142	-144	-146
Desvio de perpendicularismo (μm) – MMQ	-147	-141	-141	-147	-147	-147

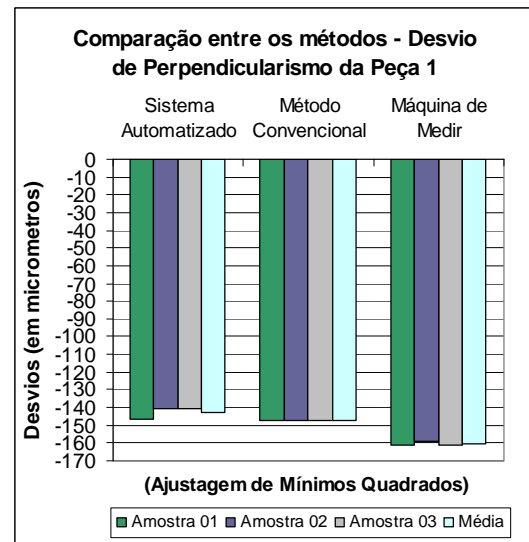


Fig. 5. Desvios de perpendicularismo da Peça 1

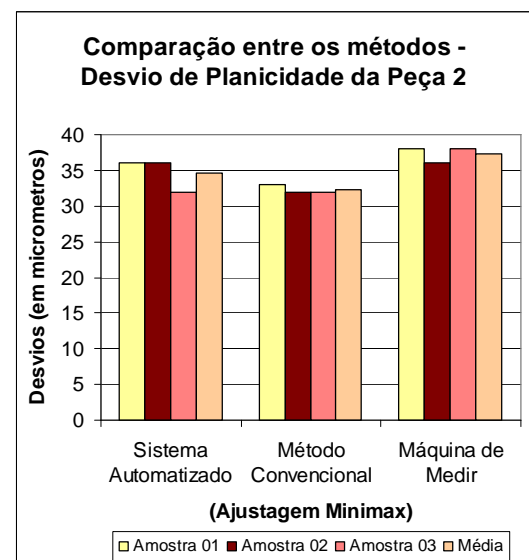


Fig. 6. Desvios de planicidade da Peça 2

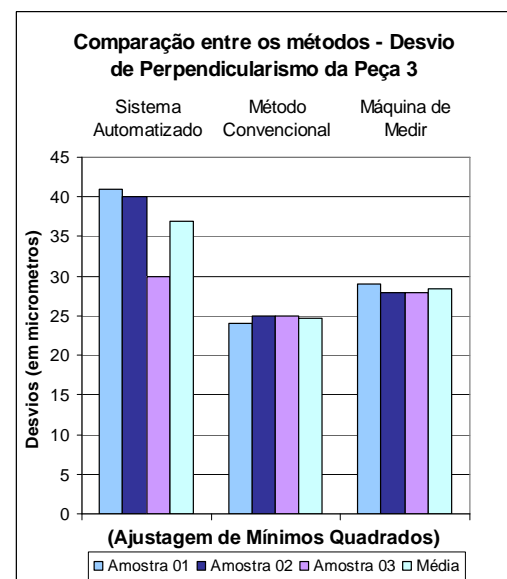


Fig. 7. Desvios de perpendicularismo da Peça 3

Nos gráficos apresentados, nota-se que a diferença entre os valores de desvio fornecidos pelo Sistema Automatizado e os valores obtidos com a máquina de medir é menor do que a diferença entre os desvios obtidos com o Sistema Automatizado e os desvios resultantes da medição convencional. Em outras palavras, os valores fornecidos pela máquina de medir são mais próximos dos valores obtidos com o sistema proposto do que os valores convencionais. Além disso, tanto o sistema proposto quanto a máquina de medir forneceram desvios sempre maiores em valor absoluto do que os valores absolutos dos desvios obtidos com o sistema convencional.

Esta proximidade entre os valores obtidos com o Sistema Automatizado e aqueles obtidos com os demais sistemas demonstra que o sistema proposto apresentou resultados coerentes. Assim, deve-se salientar, primeiramente, a viabilidade da utilização do Sistema Automatizado em um número considerável de casos, ou seja, nos casos em que não se requer uma acuracidade melhor do que dois centésimos de milímetro nas medições dos desvios de forma e orientação. Em outras palavras o sistema de medição proposto é adequado para ser utilizado em muitas aplicações ordinárias na área de mecânica. Esta estimativa da acuracidade do sistema foi feita com base na observação de que, em praticamente todos os casos, as diferenças entre os resultados obtidos com o Sistema Automatizado e o Método convencional não excederam 20 micrometros.

A repetibilidade do sistema proposto também é um dos aspectos que merece destaque. Os resultados obtidos indicam que este sistema apresenta boa repetibilidade na coleta e processamento de diferentes amostras de dados de uma mesma peça, tanto na avaliação do desvio de planicidade quanto na avaliação do desvio de perpendicularismo. Outro aspecto positivo a ser observado é o fato de que a avaliação do desvio de perpendicularismo se mostrou pouco sensível diante da utilização de diferentes amostras de medição da superfície de referência. A combinação de diferentes amostras da peça medida e da superfície de referência resulta em valores próximos, demonstrando que o sistema também apresenta repetibilidade na avaliação absoluta das inclinações, isto é, na avaliação das inclinações individuais do artefato de referência e da superfície da peça. Isto é uma vantagem adicional, pois elimina a necessidade de se realizar, a cada medição da peça, uma medição subsequente do artefato de referência. Na verdade, esta qualidade abre espaço para que, na inspeção de lotes, o plano de referência seja medido apenas uma vez para um determinado número de peças medidas, o que contribui positivamente para um aumento de eficiência do sistema.

A análise dos valores obtidos para o desvio de perpendicularismo apresentados na Tabela 1 também demonstra que o Método dos Mínimos Quadrados é bem menos sensível às variações dos dados obtidos nas diferentes medições da Peça 1. Em outras palavras, houve muito pouca variação entre os valores de desvio obtidos a partir de diferentes amostras de medição de uma mesma peça quando o Método dos Mínimos Quadrados foi utilizado. Quando o mesmo cálculo é feito aplicando-se o Método Minimax sobre o mesmo conjunto de dados, a

variação observada nos resultados é bem mais significativa. Este fato foi observado não apenas para a Peça 1, mas para as três peças.

Na avaliação do desempenho do Sistema Automatizado deve-se considerar, além da acuracidade e repetibilidade, a eficiência e rapidez na realização das medições e no processamento dos dados.

O desempenho do sistema, com relação ao tempo de medição, é melhor do que o desempenho dos sistemas convencionais. O tempo total necessário para a medição do desvio de perpendicularismo da Peça 1 ou da Peça 2 utilizando-se o Sistema Automatizado é de 32 minutos. Quando o método convencional é utilizado, este tempo é de aproximadamente 40 minutos. Em outras palavras, o tempo de medição associado ao sistema convencional é cerca de 20% maior do que o tempo conseguido com o Sistema Automatizado. As áreas de medição da Peça 1 e da Peça 2 são de 300mm x 150mm. Na avaliação da planicidade destas peças, a relação entre os tempos de medição é de 18 minutos e 39 minutos, respectivamente. Assim, neste caso, observa-se que a medição com o Sistema Automatizado é cerca de duas vezes mais rápida do que a medição convencional. Esta diferença é mais acentuada porque no caso da avaliação do desvio de planicidade com o Sistema Automatizado não é necessário realizar a medição do plano de referência. Os tempos de medição obtidos com o sistema proposto são praticamente equivalentes aos conseguidos com a medição por coordenadas, quando esta é executada por um operador não muito experiente. Se um operador bastante experiente executa a medição, é possível obter tempos um pouco melhores do que os apresentados para o sistema proposto. Entretanto, a vantagem do Sistema Automatizado é que seu desempenho é uniforme, ou seja, não depende da habilidade ou cansaço físico do operador. Além disso, é importante destacar que, em termos de rapidez absoluta, o desempenho do método automatizado é bastante superior ao desempenho dos demais sistemas. Neste sistema, 1 ponto é coletado em aproximadamente 1,3 segundos, enquanto esta taxa é de 1 ponto em 4 segundos ou 8 segundos, para diferentes operadores utilizando a máquina de medir. No caso do sistema convencional, a eficiência é ainda menor: a taxa de coleta é de aproximadamente 1 ponto a cada 19 segundos. Isto demonstra que há um alto potencial de melhoria dos tempos finais de medição utilizando-se o Sistema Automatizado, bastando apenas que, para tanto, alguns requisitos do procedimento de medição, como a necessidade das repetições da medição, por exemplo, sejam alterados.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado um sistema automatizado para a medição de desvios geométricos de forma e orientação de componentes mecânicos. O desenvolvimento deste tipo de sistema na área da Metrologia é relativamente recente. Sistemas similares desenvolvidos foram aplicados principalmente à medição de desvios de retilidade, e em alguns casos, circularidade. Neste trabalho, ampliou-se o escopo de aplicações deste tipo de sistema, de forma a abranger não só a avaliação dos desvios de retilidade, mas também a avaliação dos desvios de planicidade e perpendicularismo.

Aspectos de desempenho do sistema foram avaliados por meio de testes experimentais e análise comparativa. Da avaliação realizada, observou-se que, em praticamente todos os casos, as diferenças entre os resultados obtidos com o Sistema Automatizado e com o Método Convencional não excederam 20 micrometros. As diferenças observadas ao se comparar os valores fornecidos pelo sistema proposto com os valores obtidos utilizando-se a máquina de medir por coordenadas são ainda menores. Isto indica que o Sistema Automatizado apresentou resultados bastante coerentes, e pode ser utilizado em um número considerável de casos de medição de desvios geométricos, ou seja, nos casos em que não se requer uma acuracidade melhor do que dois centésimos de milímetro.

Além disso, o sistema apresentou boa repetibilidade, ou seja, a variabilidade observada nos valores de desvio obtidos a partir de diferentes amostras de uma mesma peça foi pequena. O desempenho do Sistema Automatizado, em termos de tempo de medição, é melhor do que o desempenho dos sistemas convencionais. Além disso, a eficiência do sistema não é afetada por fatores como habilidade ou cansaço físico do operador. A flexibilidade é uma outra vantagem, uma vez que as rotinas de movimentação do manipulador podem ser modificadas com certa facilidade para executar a medição de componentes com geometrias variadas.

Para dar continuidade a este trabalho, os seguintes tópicos podem ser abordados:

- a identificação de fontes de erro não consideradas no modelo de separação de erros e que podem ter uma influência relevante;
- a investigação de métodos alternativos de solução numérica do modelo, buscando-se eliminar a necessidade de se realizar múltiplas corridas de aquisição de dados.
- o cálculo incerteza das medições feitas com o sistema proposto, seguindo-se as diretrizes do Guia para a expressão da incerteza de medição, ISO GUM (1998).

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pelo suporte financeiro a este projeto e à Escola de Engenharia de São Carlos pelas instalações disponibilizadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] W. Gao, S. Kyono, "On-machine profile measurement of machined surface using the combined three-point method", *JSME International Journal, Series C*, Vol. 40, No. 2, pp. 253-259, 1997.
- [2] W. Gao et al. "Precision measurement of cylinder straightness using a scanning multi-probe system", *Precision Engineering*, Vol. 26, No. 3, pp. 279-288, 2002.
- [3] F.T. Paziani, "Desenvolvimento de um sistema de medição automatizado e dedicado", Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos: Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, Brasil, 2005.
- [4] B. di Giacomo, R. Tsunaki, F.T. Paziani, "Robot-based dedicated measuring system with data redundancy for profile inspection", *IEEE/RSJ IROS Int. Conf.*, Edmonton, Alberta, Canada, Aug. 2-6, 2005, pp. 1646-1649, 2005.

- [5] R. C. Magalhães, (2006). Sistema para Medição de Erro de Planicidade. Tese de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos: Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, Brasil.