

Controle dimensional de autopeças complexas e de pequenas dimensões por medição óptica tridimensional.

Armando Albertazzi G. Jr.
UFSC – Engenharia Mecânica – LABMETRO

André Roberto de Sousa
CEFET-SC – Gerência de Mecânica

Cesar Kanda
Photonita Ltda.

Frank Hrebabetzky
Photonita Ltda.

Copyright © 2004 Society of Automotive Engineers, Inc

RESUMO

Detalhes pequenos e geometricamente complexos estão cada vez mais presentes em componentes automotivos. Componentes da injeção eletrônica de combustível e de sistemas de ar condicionado veiculares são apenas dois exemplos onde estão presentes elementos de alta precisão, geometrias complexas e com pequenas dimensões. O próprio desenvolvimento tecnológico de componentes de maior dimensão tem ocorrido frequentemente pela introdução de pequenos detalhes na geometria da peça. Pode-se dizer sem risco que, cada vez mais, os segredos estão nos detalhes.

Essas características geométricas trazem grandes e novos desafios à área de controle dimensional, pois a utilização de sistemas de medição tridimensional clássicos apresenta limitações. Peças pequenas ou detalhes de difícil acesso para palpadores e geometrias muito irregulares são alguns exemplos de situações em que os sistemas clássicos não conseguem medir de modo eficiente e confiável. Essas limitações fazem com que algumas características geométricas das peças sejam medidas de forma inadequada ou nem sejam controladas.

Nesse artigo são apresentados os princípios e alguns resultados de medições de geometrias complexas de pequenas dimensões utilizando os métodos ópticos de *shadow moiré* e *interferometria de luz branca*. Será apresentado também um novo conceito de programa de medição apropriado para extrair parâmetros a partir de nuvens de pontos tridimensionais. Os sistemas ópticos de

medição envolvidos neste trabalho são o resultado de um desenvolvimento conjunto do Laboratório de Metrologia e Automatização da Universidade Federal de Santa Catarina (LABMETRO-UFSC - www.labmetro.ufsc.br) e da empresa Photonita (www.photonita.com.br).

MEDIÇÃO DE PEÇAS PEQUENAS: UM GRANDE DESAFIO

A Miniaturização é uma realidade cada vez mais presente em muitos componentes mecânicos encontrados em sistemas automotivos. Para melhor rendimento, aproveitamento de espaços e redução de custos, muitos sistemas mecânicos e eletrônicos reduziram radicalmente suas dimensões nos últimos 10 anos (figura 1).

Na mesma proporção em que são reduzidos os tamanhos dos componentes e seus detalhes tem crescido o nível de dificuldade para adequadamente efetuar o seu controle dimensional. Peças pequenas requerem soluções diferenciadas. As técnicas de medição clássicas apresentam limitações quanto à possibilidade de medir, ou quanto à praticidade e confiabilidade das operações de medição.

Peças pequenas muitas vezes são inacessíveis aos palpadores de medição. Detalhes com alta complexidade geométrica precisam ser medidos com grande número de pontos, para que seja possível uma análise detalhada da geometria (figura 2).



Figura 1 – Componentes automotivos complexos e de pequenas dimensões

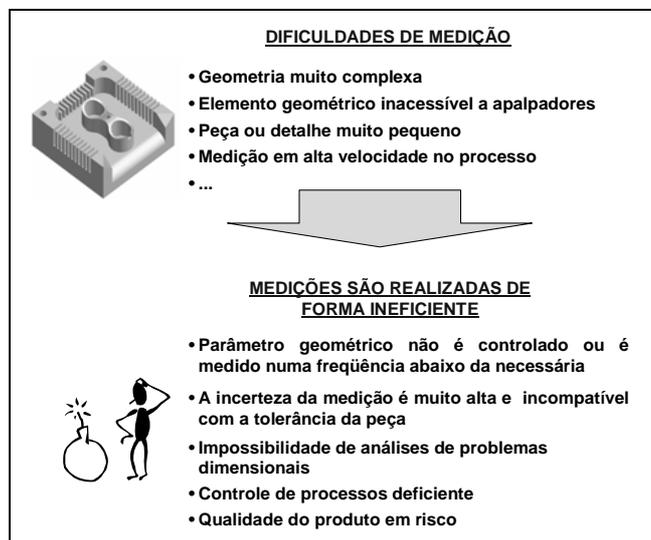


Figura 2 – Dificuldades no controle dimensional de componentes complexos de pequenas dimensões

Essas dificuldades ocorrem mesmo em componentes mecânicos de maior dimensão. Muito do desenvolvimento tecnológico realizado nesses componentes são obtidos com a modificação ou introdução de pequenos detalhes na sua geometria. Muitas vezes chegou-se a um estágio de desenvolvimento tal, em que a diferença está nos detalhes.

Nesse contexto, muitas vezes se adapta o uso de métodos de medição clássicos para essas peças, nem sempre com bons resultados, por conta de dificuldades operacionais e metrológicas. No aspecto operacional, a medição pode tornar-se pouco prática e os tempos de medição aumentarem significativamente. No aspecto metrológico, a

utilização de métodos clássicos de controle dimensional pode levar a resultados com incertezas de medição inaceitáveis, podendo comprometer os objetivos da análise dimensional.

Em certos casos, no entanto, a dificuldade de aplicar um método de medição por contato é tão grande que o componente nem é medido, com riscos para a sua funcionalidade e impedindo ações de garantia da qualidade no seu processo de fabricação.

MÉTODOS ÓPTICOS PARA MEDIÇÃO TRIDIMENSIONAL DE GEOMETRIAS

As técnicas ópticas apresentam características que a tornam potencialmente adequada para a medição tridimensional de peças complexas: Rapidez, riqueza de detalhes, acesso a reentrâncias e protuberâncias, ausência de contato evita risco de danos à peça medida, além de incerteza de medição compatível para boa parte das aplicações.

Com o desenvolvimento tecnológico em hardware e software, técnicas ópticas de medição têm ficado cada vez mais atrativas. Tornaram-se fortemente automatizadas, mais robustas para uso industrial, metrologicamente confiáveis, apresentando custos cada vez menores. A disseminação dos vários métodos ópticos de medição decorre, assim, do seu próprio desenvolvimento tecnológico.

Dessa forma, alguns métodos já vêm sendo cada vez mais utilizados para o controle dimensional na indústria, como a fotogrametria digital (figura 3) e o laser tracker (figura 4), normalmente para peças de maiores dimensões.

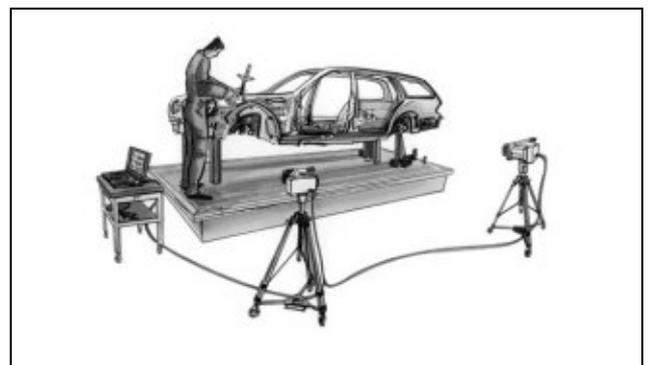


Figura 3 – Medição óptica 3D por fotogrametria digital

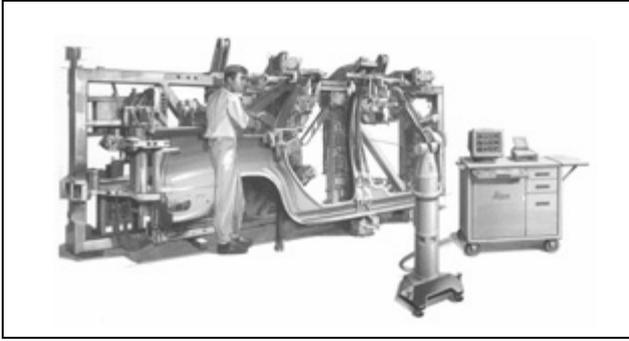


Figura 4 – Medição óptica 3D com laser tracker (Leica)

Outros métodos, como a triangulação e a inspeção por imagens, são amplamente empregados para medições em processo (figura 5).

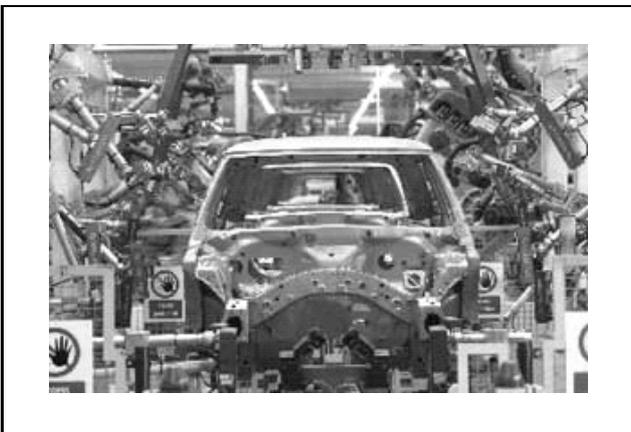


Figura 5 – Medição óptica dentro do processo (Perceptron)

Dentre as várias técnicas ópticas existentes, duas destacam-se particularmente por sua adequação para a medição de pequenas peças com geometrias complexas, devido à incerteza de medição e ao grande poder de detalhamento. Esses métodos são a técnica de shadow moiré a interferometria de luz branca, descritos a seguir.

MEDIÇÃO DE FORMAS 3D COM SHADOW MOIRÉ

A essência da técnica de shadow moiré é muito simples. Seu elemento mais importante é uma placa de vidro na qual é desenhado um conjunto de linhas retas, paralelas e equiespaçadas, denominada de *grade de moiré*. A grade é posicionada próxima à superfície a medir e é iluminada obliquamente na forma mostrada na figura 6. As sombras das linhas da grade são projetadas sobre a superfície a medir. Uma câmera digital capta a imagem da superfície medida a partir de um ângulo frontal. Nesta imagem observa-se o “batimento” (interferência) entre as sombras e

as próprias linhas da grade. As linhas da grade e suas sombras podem estar em fase ou não. Macroscopicamente regiões claras resultam quando estas estão em fase e regiões escuras quando estão totalmente fora de fase. Nos conjunto, estas regiões claras e escuras formam um padrão gráfico denominado de franjas de moiré. A interpretação geométrica das franjas de moiré é similar a das curvas de nível de um mapa topográfico.

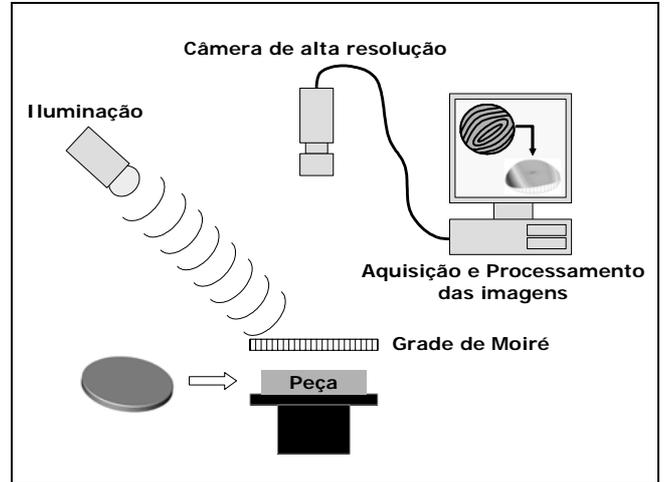


Figura 6 – Princípio funcional da medição por shadow moiré

A imagem dessas franjas é adquirida e tratada com técnicas de processamento digital de imagens. Como resultado, a superfície da peça pode ser medida com enorme riqueza de detalhes. A incerteza de medição e a profundidade de medição dependem da grade utilizada. Incertezas a partir de $\pm 2,0 \mu\text{m}$ e profundidades de medição de até 7 mm são encontradas em sistemas comerciais (ver tabela 1). A figura 7 mostra o resultado da medição da superfície de uma ferramenta de corte. Mais de 200.000 pontos foram medidos em cerca de 15 segundos, revelando grande riqueza de detalhes da geometria medida., o que seria inviável de ser obtido na medição por contato.

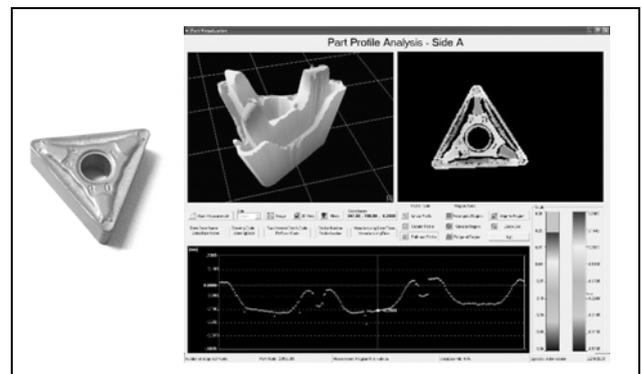


Figura 7 – Medição 3D com Shadow-Moiré (Photonita)

Até alguns anos atrás a medição com shadow moiré só era possível em superfícies contínuas, sem degraus abruptos. Houve uma grande evolução nesta área e as técnicas hoje existentes permitem medições confiáveis de superfícies com rebaixos e protuberâncias. Na figura 8 exemplifica-se o resultado de medições efetuadas em uma moeda de R\$ 0,25. Nota-se a riqueza de detalhes que pode ser obtida.

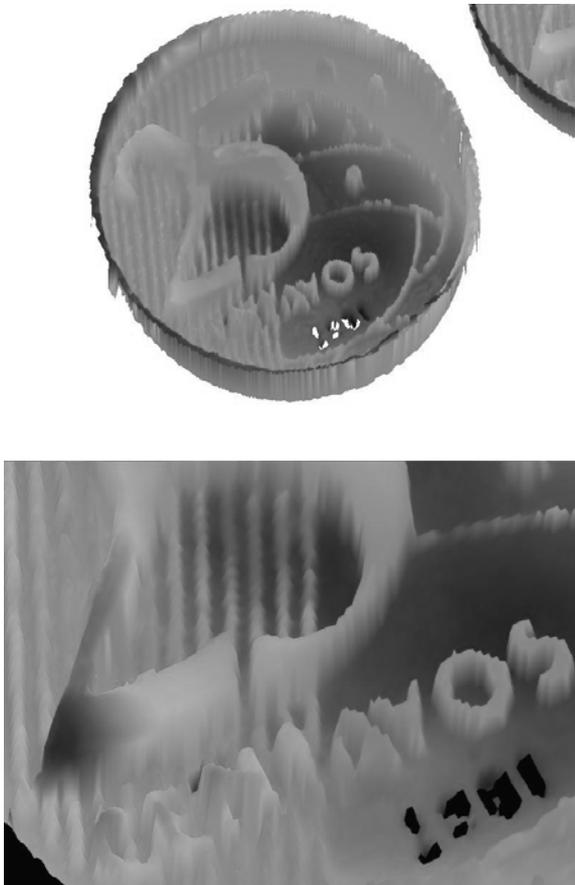


Figura 8 –Medição da forma 3D de uma moeda de R\$ 0,25 com shadow-moiré (Photonita).

Operacionalmente, a técnica de shadow moiré apresenta uma excelente robustez, é portátil para medições em campo, além de apresentar um custo bastante atrativo. A sua limitação reside na relação entre profundidade de medição e incerteza de medição, como mostra a tabela 1.

Tabela 1 – Relação entre profundidade de medição e Incerteza obtível com a técnica de Shadow-Moiré

[mm]	[μm]
0,7	± 2
1,2	± 3
3,6	± 10
7,2	± 20

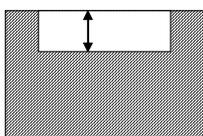
MEDIÇÃO DE FORMAS 3D COM INTERFEROMETRIA DE LUZ BRANCA

Na medição clássica por interferência, a forma 3D da superfície medida é determinada pela diferença entre os caminhos percorridos pela luz ao atingir uma superfície de referência e a peça a medir. O comprimento de onda é utilizado como escala. Em combinação com modernas técnicas de processamento digital de imagens é hoje possível em medições com interferometria atingir incertezas de até poucos nanômetros em condições de laboratório na medição de superfícies de precisão.

Uma modalidade de interferometria bastante atrativa para a indústria é a interferometria luz branca, esquematizada na figura 9. Nesse sistema, a luz branca é colimada e dividida por um espelho parcial em duas componentes: uma atinge a superfície da peça a medir e a outra um espelho de referência. Essas imagens são recombinadas e podem interferir. Figuras de interferência são visíveis apenas nas regiões da peça em que os caminhos percorrido pelas duas componentes da luz branca são muito próximos. Estas figuras são interpretadas de forma similar às curvas de nível de mapas topográficos. As figuras de interferência são captadas pela câmera e digitalmente processadas.

O plano de referência é deslocado de forma controlada por um micro motor, varrendo em toda sua extensão as alturas presentes na superfície medida. Como resultado, tipicamente cerca de 100.000 pontos são digitalizados sobre a superfície visível da peça, permitindo análises dimensionais em detalhes complexos de formas praticamente ilimitadas.

Comparativamente em relação à medição por shadow moiré, a interferometria de luz branca possui a vantagem de medir profundidades bem maiores, limitada apenas pelo curso do motor que desloca o plano de interferência. A área medida pode chegar até a 100 x 100 mm. A incerteza de medição varia de $\pm 0,05 \mu\text{m}$ a $\pm 1 \mu\text{m}$, dependendo do tamanho e das características das superfícies medidas e do tempo necessário para completar as medições. O custo desses sistemas é maior do que aqueles que utilizam o shadow moiré.



Profundidade	Incerteza
--------------	-----------

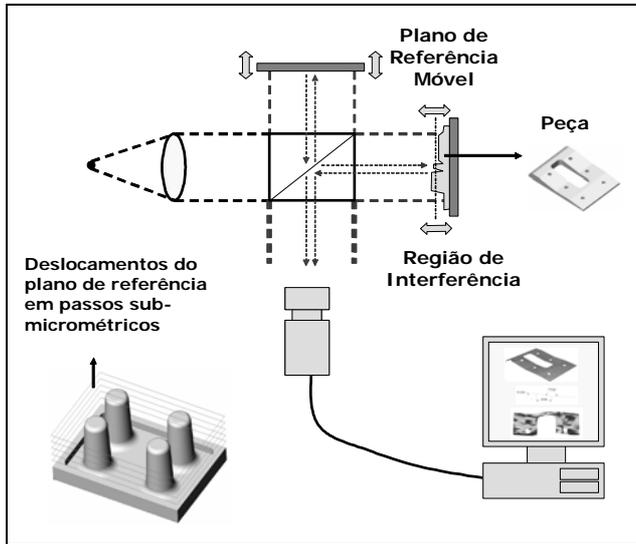


Figura 9 – Princípio funcional da interferometria de luz branca

A figura 10 mostra resultados da medição de um bico de injeção de combustível e de uma micro-válvula do mesmo sistema com 4 mm de comprimento, utilizando esse método. Em ambos os casos, podem-se observar o grande detalhamento que se pode obter com essa técnica.

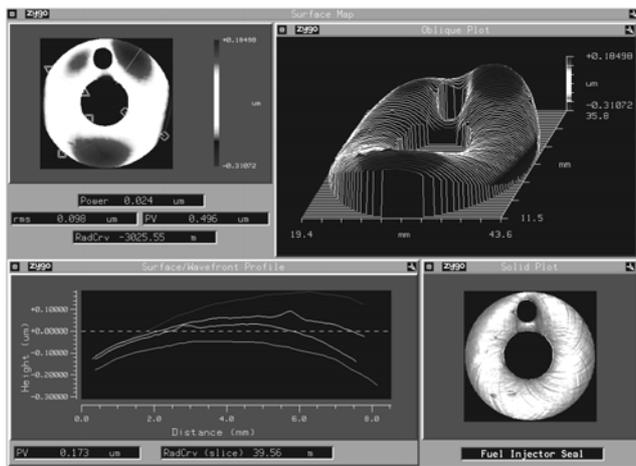


Figura 10 – Medição da forma de um bico de injeção de combustível com interferometria de luz branca (Zygo)

A figura 11 mostra o resultado da medição da forma 3D de rebaiços existentes em uma peça estampada. Trata-se de um componente usado no sistema de refrigeração de um automóvel.

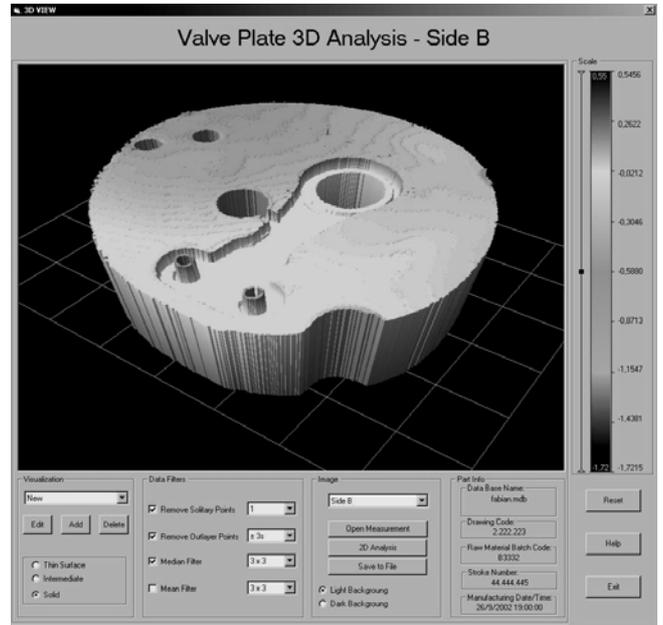


Figura 11 – Resultados da medição óptica de componente de sistema de refrigeração utilizando a interferometria de luz branca (Photonita)

EXTRAÇÃO DE PARÂMETROS DE NUVENS DE PONTOS TRIDIMENSIONAIS

Não é raro que resulte da medição de uma superfície por uma técnica de medição óptica como shadow moiré ou interferometria uma nuvem de algumas dezenas ou centenas de milhares de pontos tridimensionais. Frequentemente o controle dimensional deve ser feito com um conjunto de 5 a 20 parâmetros. Ângulos, distâncias, alturas e raios são exemplos de alguns desses parâmetros.

Extrair um conjunto de parâmetros de uma massa tão grande de informações não é uma tarefa muito simples. Os programas de medição hoje existentes para operar as máquinas tridimensionais (máquinas de medir por coordenadas) são voltados à medição de um número muito pequeno de pontos “tocados” na superfície a medir e, portanto, não são convenientes para lidar com nuvens de pontos. Para escrever programas de medição de forma adequada e suficientemente flexível, foi desenvolvida uma nova linguagem de programação, específica para lidar com nuvem de pontos^[3].

A estrutura de um programa de medição típico é representada na figura 12. Após a aquisição da nuvem de pontos por uma técnica de medição óptica, deve ser feito o referenciamento da peça a medir. Para isto, são definidos sobre a nuvem de pontos regiões de interesse bidimensionais, que delimitam subconjuntos de dados definidos de acordo com as conveniências da peça a medir.

Regiões de interesse circulares, retangulares e poligonais são alguns exemplos.

Elementos de busca podem ser associados às regiões de interesse para identificar na nuvem de pontos, por exemplo, as coordenadas de centros de círculos e a posição de bordas ou cantos. Estes pontos são normalmente utilizados para posicionar um sistema de coordenadas local na peça medida. Esta providência permite ao sistema absorver pequenos erros de posicionamento e orientação naturais da peça quando colocada no magazine de medição.

Usando o sistema de coordenadas da peça como referência, são definidas diversas regiões de interesse, de acordo com as características da peça a medir. O programa de medição pode, por exemplo, associar planos aos pontos delimitados por regiões de interesse. As relações entre planos, como ângulos, distâncias, e entre planos e dados (planeza de superfícies) são usadas para calcular vários parâmetros de interesse para o controle dimensional.

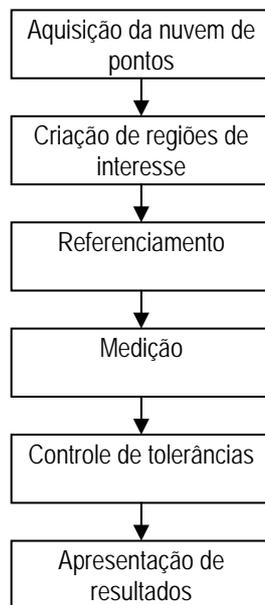


Figura 12 – Medição da forma de um bico de injeção de combustível com interferometria de luz branca ^[3]

Os parâmetros calculados são comparados com valores de referência e tolerâncias. Em função do resultado da comparação o programa de medição gera uma tabela de resultados que aponta que parâmetros medidos obedecem à tolerância (impressos na cor verde) e quais parâmetros estão acima ou abaixo dos limites aceitáveis (impressos na cor vermelha). A identificação visual dos parâmetros que atendem ou não atendem às tolerâncias torna-se muito cômoda.

A combinação destes diferentes elementos de programação, com base nos subconjuntos delimitados por regiões de interesse e nas regiões planas associadas, permitem grande flexibilidade para medir diversas geometrias de interesse prático. Programas simples são concebidos com grande facilidade. A junção ordenada de vários elementos simples permite a criação de programas de medição densos e capazes de medir algumas dezenas de parâmetros de forma rápida.

Esta linguagem de programação foi recentemente implementada em um sistema comercializado pela empresa Photonita. Nesta implementação diversos recursos gráficos auxiliam na tarefa de criar o programa de medição e visualizar o seu desempenho.

CONCLUSÕES

Métodos ópticos de medição têm ocupado cada vez mais o lugar dos métodos tradicionais de medição por contato, especialmente quando peças pequenas e de geometria complexa são envolvidas. A facilidade e elevada velocidade com que pequenos detalhes geométricos de peças complexas são medidas, e a riqueza de informações obtidas são aspectos que têm motivado mais e mais usuários de todos os segmentos industriais a adotar este tipo de solução. Neste trabalho, a ênfase foi dada em duas técnicas ópticas de medição: *shadow moiré* e *interferometria de luz branca*. Operacionalmente essas duas técnicas ópticas permitem medições rápidas e com elevado grau de automação e incertezas convenientes, tornando o processo de medição bastante prático e de fácil manuseio. Aquisições de nuvens de 200.000 pontos sobre a superfície da peça medida em cerca de 15 segundos e incertezas melhores que $\pm 2 \mu\text{m}$ são possíveis.

Uma nova linguagem de medição, apropriada para lidar com nuvens de pontos, foi desenvolvida e está sendo usada para extrair e medir diversos parâmetros de peças de geometrias variadas. Através desta linguagem, é possível escrever programas de medição para a grande maioria das superfícies de interesse prático da indústria automobilística e mecânica em geral. Comparações entre as superfícies medidas e modelos geométricos (CAD) são passos que estarão sendo implementados nesta linguagem em um futuro breve.

Acompanhando a tendência mundial, espera-se no Brasil considerável expansão do uso de técnicas ópticas de medição para o controle dimensional. Quando este momento chegar, as indústrias brasileiras não serão pegadas de surpresa. Felizmente já há tecnologia desenvolvida no Brasil capaz de atender em boa parte as principais demandas do mercado. É preciso acreditar na nossa capacidade de resolver nossos problemas.

REFERÊNCIAS

- [1] Malacara, D. (Editor) “Optical Shop Testing”, John Wiley & Sons, 2nd Edition, ISBN: 0-471-52232-5, Janeiro 1992.
- [2] Hariharan, P., Malacara, D. (Editors) “Selected Papers on Interference, Interferometry, and Interferometric Metrology”, SPIE Press, Milestones Series, ISBN 0-8194-1936-2, Abril 1995.
- [3] Albertazzi Jr, A., Pezzotta, C. A., “Linguagem de Medição para Extração de Características Geométricas de Nuvens de Pontos Tridimensionais”, Anais do III Congresso Internacional de Metrologia, Recife, Setembro de 2003.

SOBRE O AUTOR PRINCIPAL

Armando Albertazzi Gonçalves Jr. é professor do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina desde 1987. Atua na área de metrologia óptica voltada para a solução de problemas de medição de interesse industrial. Além de considerável produção técnico-científica, coordenou cerca de duas dezenas de projetos de pesquisa, alguns destes resultaram em sistemas ópticos hoje em uso na indústria.

Email: albertazzi@labmetro.ufsc.br