

## MEDIÇÃO DA FORMA DE CILINDROS INTERNOS E EXTERNOS COM INTERFEROMETRIA DE LUZ BRANCA

*Armando Albertazzi G. Jr.<sup>1</sup>, Matias R. Viotti<sup>2</sup>, Analucia V. Fantin<sup>1</sup>, Rafael M. Miggiolin<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, albertazzi@labmetro.ufsc.br

<sup>2</sup> Photonita – Metrologia Óptica, Florianópolis, Brasil, matias@photonita.com.br, rafael@photonita.ufsc.br

**Resumo:** O trabalho apresenta uma nova configuração de interferômetro de luz branca que usa espelhos cônicos para medir superfícies cilíndricas externas e internas. Um programa de computador reconstrói, extrai parâmetros e representa resultados de medições com grande riqueza de detalhes. O trabalho apresenta também dados sobre a incerteza do interferômetro e exemplos de aplicação de interesse industrial.

**Palavras chave:** cilíndricidade, interferometria, forma, metrologia mecânica, metrologia geométrica.

### 1. INTRODUÇÃO

A interferometria de luz branca tem sido usada há algumas décadas para medir formas de pequenos e médios objetos com incertezas que hoje podem chegar a poucos nanômetros.<sup>[1 a 4]</sup> A configuração básica envolve um interferômetro de Michelson iluminado por uma fonte de luz de baixa coerência temporal. Embora lâmpadas halógenas de luz branca possam ser usadas para este fim, dispositivos semicondutores como LEDs (*Light Emitting Diodes*) ou SLDs (*Super Luminescent Diodes*) são mais frequentes.

O comprimento de coerência limitado da fonte de luz faz com que as figuras de interferência só se formem quando a diferença de caminho óptico entre os dois braços do interferômetro é muito pequena. O máximo contraste das figuras de interferência é obtido quando a diferença de caminho óptico é nula. A medição envolve um processo de varredura em que se busca a posição de máximo contraste para cada ponto da imagem da peça medida. A posição correspondente do dispositivo de varredura é atribuída como a coordenada vertical ( $Z$ ) de cada ponto medido. Forma-se, ao final, uma numerosa nuvem de pontos da superfície medida, da qual são extraídos diversos parâmetros geométricos.<sup>[1 a 4]</sup>

Interferômetros de luz branca comerciais estão disponíveis para medir desde regiões pequenas, de poucos micrometros de extensão, até peças com 100 mm de comprimento. A totalidade dos sistemas disponíveis no mercado mede em coordenadas retangulares (Cartesianas), o que é apropriado para um grande número de aplicações de interesse laboratorial e industrial.

Há demandas de medição as quais seriam atendidas mais efetivamente por interferômetros capazes de naturalmente medir em coordenadas cilíndricas. Este é o principal motivador do trabalho apresentado neste artigo.

### 2. OBJETIVO

O objetivo do trabalho reportado neste artigo é desenvolver e avaliar o desempenho metrológico de uma nova configuração de interferômetro de luz branca para medir formas de superfícies cilíndricas internas e externas.

### 3. USO DE ESPELHOS CÔNICOS

O elemento central do interferômetro é um espelho cônico de 45°. É um componente óptico especial, produzido em alumínio por torneamento de ultraprecisão usando uma ferramenta de diamante. O cilindro a ser medido é posicionado de forma coaxial com o espelho cônico. A parte esquerda da Figura 1 mostra o efeito óptico da reflexão da superfície de um cilindro externo em um espelho cônico interno. Os raios de luz paralelos e horizontais são defletidos pelo espelho cônico na direção radial. A percepção que um observador situado na esquerda da figura teria é que o cilindro foi transformado em um *disco plano*. A idéia é medir interferometricamente a forma do “disco plano” e transportar os erros de forma encontrados para a geometria cilíndrica. A parte direita da figura mostra a imagem de um pistão de compressor hermético refletida no espelho cônico. Os furos na lateral do cilindro são vistos de forma ovalizada em função das distorções provocadas pelo espelho.

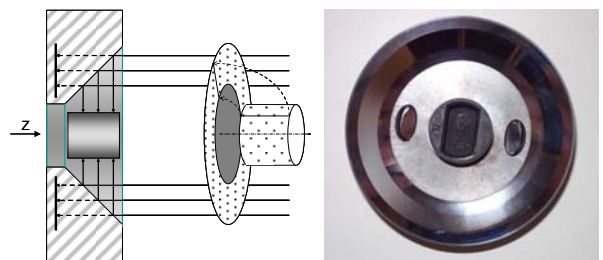


Figura 1 – Reflexão de um cilindro externo em um espelho cônico interno.

A Figura 2 mostra o efeito equivalente quando um espelho cônico externo é inserido em uma superfície cilíndrica interna. Também aqui a superfície cilíndrica é transformada em um disco plano, cuja geometria é medida. Neste caso, para que a medição possa ser feita de uma vez é necessário que o raio do espelho cônico seja maior que a extensão axial  $h$  do cilindro a ser medido. Caso contrário, a medição deve ser feita em partes e então combinada.

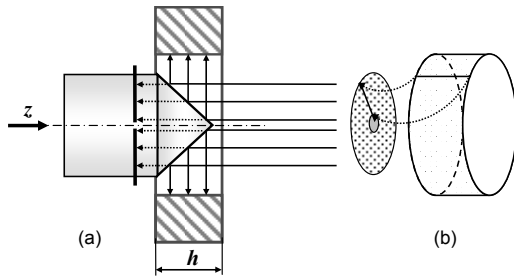


Figura 2 – Reflexão de um cilindro interno em um espelho cônico externo.

### 3. INTERFERÔMETRO DE LUZ BRANCA PARA SUPERFÍCIES CILÍNDRICAS INTERNAS

A Figura 3 mostra a configuração básica do interferômetro para medição de cilindros internos.<sup>[5]</sup> A fonte de luz, mostrada na parte baixa da figura, é colimada pela lente  $L_1$  e é dirigida ao espelho parcial EP. Neste caso, um LED ultrabrilhante com comprimento de onda 880 nm foi usado. 50% da luz é defletida para a esquerda, atinge o espelho cônico sendo defletida radialmente para a superfície cilíndrica medida. A luz refletida de volta segue o caminho oposto e atravessa o espelho parcial sendo sua imagem formada no sensor da câmera. A câmera também recebe a luz do braço vertical, que é refletida pelo espelho plano usado para varredura. Uma lente telecêntrica é utilizada na câmera o que assegura que apenas os raios de luz paralelos ao eixo óptico formam a imagem.

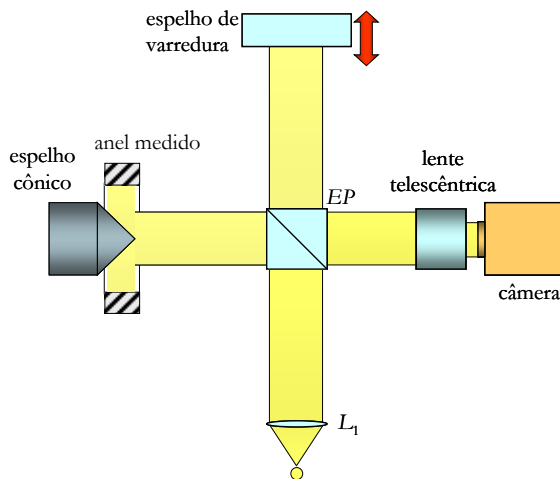


Figura 3 – Configuração básica do interferômetro para medição de cilindros internos.

A figura de interferência resultante da superposição da luz refletida nos dois braços é apenas visível quando a diferença de caminho óptico entre os dois braços do interferômetro é menor que o comprimento de coerência da luz utilizada, que é da ordem de 20  $\mu\text{m}$ . O máximo contraste da figura de interferência é obtido quando os dois braços têm comprimentos iguais. Assim, a figura de interferência é captada pela câmera e analisada pelo programa de computador. O movimento de varredura do espelho de referência é controlado por um dispositivo de microdeslocamento com resolução de posicionamento de

50 nm. O programa de computador busca para cada elemento da imagem (pixel) a posição do espelho de varredura correspondente à situação de máximo contraste da figura de interferência. Nesta condição a posição do espelho de varredura que resulta no máximo contraste é atribuída como a coordenada radial de cada ponto medido.

Erros de forma dos espelhos cônicos, imperfeições das lentes e desalinhamentos entre os componentes ópticos dão origem a erros sistemáticos. Para determiná-los e compensá-los padrões cilíndricos (anéis padrão) são repetidamente medidos pelo sistema. Os erros de forma obtidos são atribuídos aos erros sistemáticos do interferômetro. Estes erros são digitalmente armazenados e corrigidos em futuras medições. Erros decorrentes do desalinhamento entre o cilindro medido e o eixo do interferômetro se manifestam na forma de translações e rotações de corpo rígido, que são facilmente identificados e numericamente compensados pelo programa de computador.

O gráfico polar da Figura 4 corresponde a uma seção de um anel padrão, medido pelo interferômetro da Figura 3. Note que se trata de uma superfície de excelente qualidade. O valor da divisão da escala radial é de apenas 0,2  $\mu\text{m}$ .

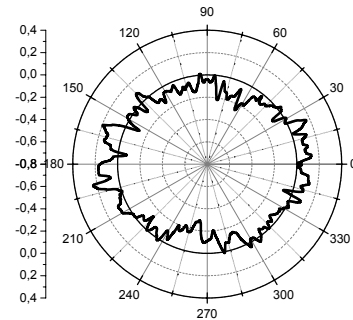


Figura 4 – Exemplo de medição de um anel padrão. Cada divisão na escala radial corresponde a 0,2  $\mu\text{m}$ .

Quando o comprimento axial da superfície a medir é menor ou igual a 2/3 do raio do espelho cônico, a medição pode ser feita de uma única vez, como na Figura 5(a). Quando esta condição não é satisfeita, a medição deve ser feita em etapas, movimentando-se a peça medida entre as etapas, como mostra a Figura 5 (b), de forma a assegurar que haja pelo menos uma região comum superposta em ambas os trechos medidos. As medições de cada etapa são alinhadas usando o trecho comum e combinadas para formar uma única nuvem de pontos.

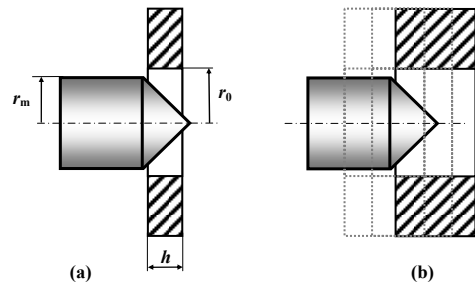
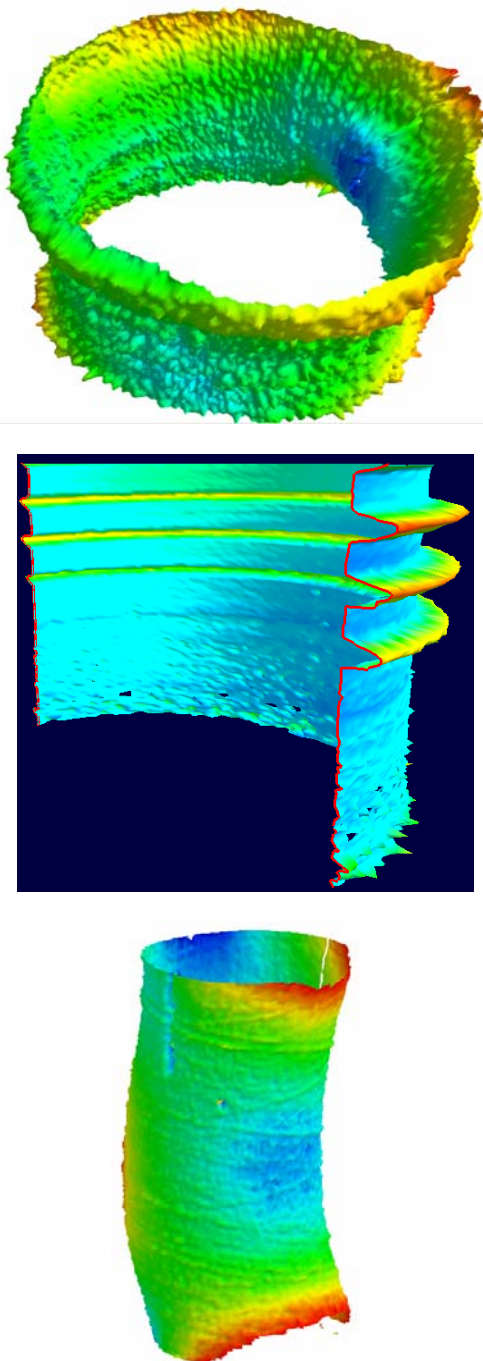


Figura 5 – Medição de superfícies cilíndricas internas: (a) através de um único posicionamento e (b) em etapas com a movimentação da peça a medir, alinhamento e combinação dos trechos medidos em uma única nuvem de pontos.

A Figura 6 exemplifica as potencialidades do interferômetro para cilindros internos. Ela representa em três dimensões, e em escala exagerada, resultados de medições de superfícies cilíndricas internas.



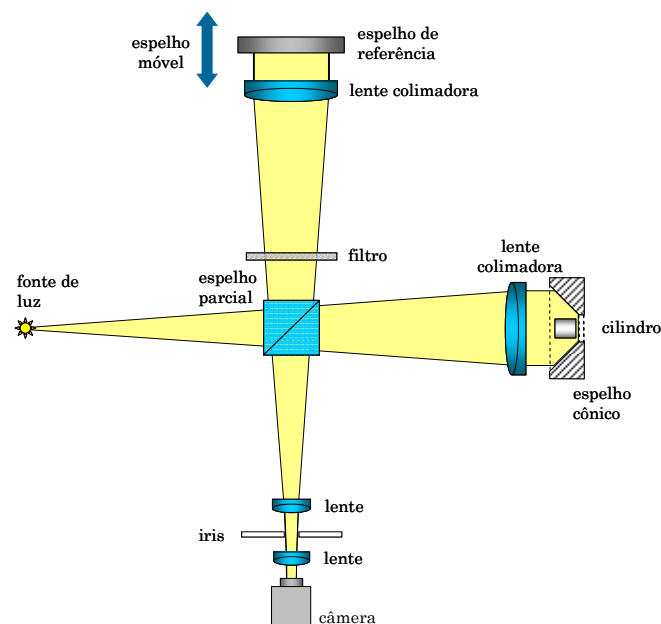
**Figura 6 – Representação 3D de resultados de medições de cilindros internos.**

A parte superior da Figura 6 corresponde à superfície interna do olhal maior de uma biela de compressor hermético (direita), medida usando quatro posicionamentos. Os erros de forma não superam  $2,0\ \mu\text{m}$ . A parte central corresponde a uma bucha ranhurada, medida a partir de um único posicionamento. A profundidade das ranhuras é da ordem de  $60\ \mu\text{m}$ . A parte inferior da figura corresponde a

uma bucha longa, com cerca de  $45\text{mm}$  de comprimento, medida com dados de onze posicionamentos. Note que os erros de forma da bucha, bem como as micro-ranhas resultantes do processo de usinagem, são claramente visíveis.

#### 4. INTERFERÔMETRO DE LUZ BRANCA PARA SUPERFÍCIES CILÍNDRICAS EXTERNAS

A Figura 7 mostra a configuração básica do interferômetro usada para medir superfícies cilíndricas externas.<sup>[6]</sup> A fonte de luz é um LED ultra-brilhante com comprimento de onda médio de  $880\ \text{nm}$  e comprimento de coerência de cerca de  $20\ \mu\text{m}$ . A luz do LED é dividida pelo espelho parcial de forma que cerca de 50% da energia é desviada para o espelho de referência e 50% para o espelho cônico. A luz do LED se propaga com frente de onda esférica e é colimada nas proximidades dos espelhos pelas lentes colimadoras, que são objetivas acromáticas com comprimento focal igual à sua distância até o LED.



**Figura 7 - Configuração básica do interferômetro para medição de cilindros internos.**

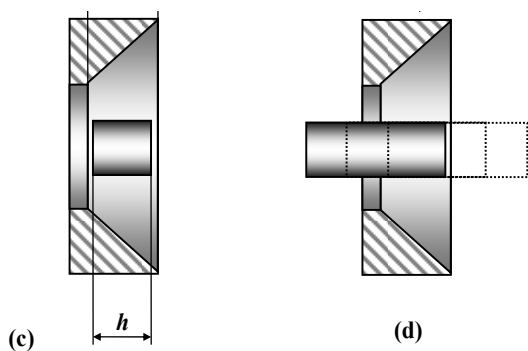
No braço horizontal a luz colimada incide num espelho cônico externo e é defletida na direção radial para atingir o cilindro medido da maneira mostrada na Figura 1. A luz, refletida pelo cilindro medido, segue o caminho de volta até o espelho parcial, quando parte dela é desviada para a câmera de vídeo, equipada com óptica telecêntrica. A parte da luz do LED que incidiu no espelho parcial e foi desviada para cima é também colimada e refletida pelo espelho plano de referência, cuja posição é alterada por um dispositivo microdeslocador controlada pelo computador. A luz refletida retorna ao espelho parcial e parte dela segue em direção à câmera e é combinada com a luz que foi refletida pelo espelho cônico e pela peça medida.

Também aqui a figura de interferência só é visível se a diferença dos caminhos ópticos percorridos pelos feixes que interferem for menor que o comprimento de coerência do LED. O máximo contraste é obtido quando os dois caminhos são iguais. Da mesma forma, o programa de computador desloca o espelho plano de forma progressiva e busca para cada elemento da imagem (pixel) a posição de máximo contraste. Esta posição é atribuída ao raio da posição correspondente da peça medida.

Também aqui um cilindro de referência (calibrador cilíndrico liso) é usado como padrão de calibração. Assim, os erros de forma resultantes da média de várias medições repetidas do padrão são determinados e considerados como erros sistemáticos do interferômetro. Em medições subsequentes estes erros são corrigidos.

Os autores desenvolveram uma técnica que usa uma sequência de 24 medições de um mesmo cilindro. Doze medições são feitas aplicando rotações de 30° em torno do eixo do cilindro. Posteriormente o cilindro é invertido, isto é, posicionado de forma que seu topo passe a ser o fundo e vice-versa, e outras 12 medições são realizadas. Os dados das 24 medições são combinados e usados para determinar de forma separada os erros absolutos do cilindro e do interferômetro. Embora ainda não tenha sido publicada, esta técnica se mostrou eficiente. Foi possível confirmar que a incerteza expandida do interferômetro se situa na casa de 0,35  $\mu\text{m}$  quando peças espelhadas são medidas. No caso de peças com maior rugosidade, os resíduos presentes na imagem são da ordem da rugosidade da superfície medida.

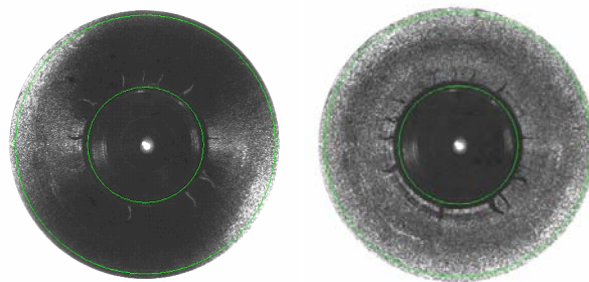
Se o comprimento ( $h$ ) da peça a medir é menor ou igual a 2/3 da variação radial correspondente à área espelhada do espelho cônico, a medição pode ser feita em uma única etapa. Caso contrário, a medição deve ser feita por partes. Também aqui a peça deve ser movida entre cada etapa. O movimento da peça deve preservar uma área de superposição entre 20 e 30% para que o alinhamento entre as partes medidas possa ser feito de forma apropriada. A Figura 8 mostra estas duas situações.



**Figura 8 - Medição de superfícies cilíndricas externas: (a) através de um único posicionamento e (b) em etapas com a movimentação da peça a medir.**

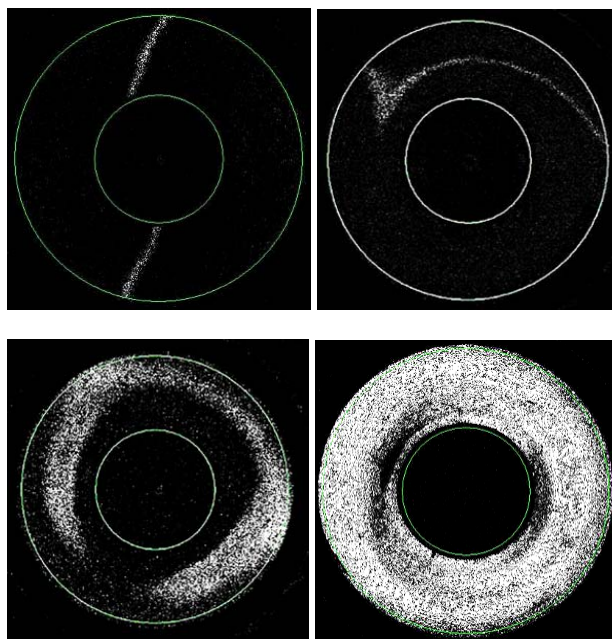
Nas duas configurações de interferômetro o alinhamento entre a peça medida e o eixo do espelho cônico é um fator crítico. Há três tipos de alinhamentos: grosseiro, fino e matemático.<sup>[7]</sup> O alinhamento grosseiro inicia com a observação visual da superfície a ser medida através da imagem captada pela câmera. Se o alinhamento

peça/espelho cônico não está bem feito, a imagem resultante não será homogênea, apresentando regiões mais claras ou escuras. O operador deverá aplicar translações em X e Y (horizontal e vertical respectivamente), e rotações em torno dos eixos X e Y até obter uma condição de melhor uniformidade. A Figura 9 mostra imagens da peça medida refletida no espelho cônico antes e depois do alinhamento grosseiro. Note que a intensidade da imagem da peça alinhada é mais uniforme.



**Figura 9 – Etapas do alinhamento grosseiro. A imagem esquerda corresponde a uma peça muito desalinhada. A da direita, a uma peça grosseiramente alinhada.**

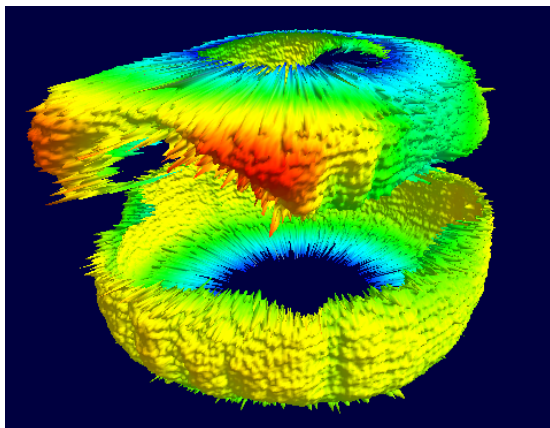
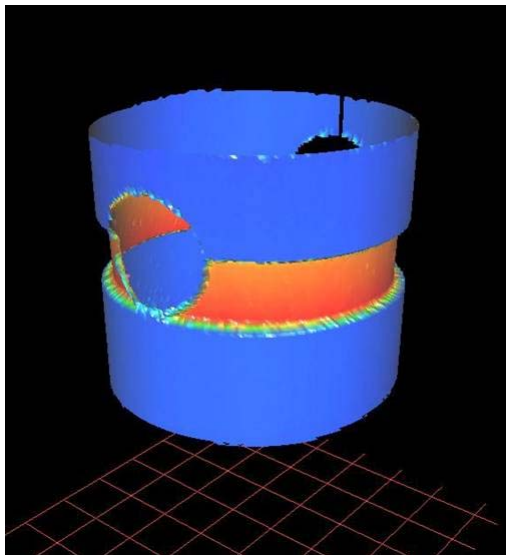
O alinhamento fino é realizado com auxílio do programa de computador. Na tela é mostrado o quadrado da diferença entre uma imagem de referência obtida em campo distante, (condição em que nenhum ponto da imagem apresenta diferença zero entre os braços do interferômetro) e a imagem na condição em que se pretende alinhar. Assim, a presença das figuras de interferência é visível na forma das regiões esbranquiçadas mostradas na figura. A espessura e forma das linhas dão indicações sobre a intensidade e a direção do desalinhamento. Com base nestas figuras, um operador com prática consegue fazer o alinhamento fino. A Figura 10 mostra uma sequência de quatro imagens de um cilindro sendo progressivamente alinhado.



**Figura 10 – Sequência de imagens usadas para o alinhamento fino.**

Na condição de melhor alinhamento as regiões esbranquiçadas ocupam praticamente toda a área medida. Um operador com prática consegue efetuar o alinhamento em cerca de 15 minutos. Recentemente um trabalho de mestrado desenvolveu e validou um programa de computador capaz de fazer o alinhamento automaticamente. [7] O programa adquire imagens das linhas brancas e as ajusta através de um modelo matemático que determina os movimentos necessários nas direções X, Y e nas rotações em torno dos eixos X e Y, que são aplicadas através de motores de ajuste fino controlados pelo computador. Com este procedimento automatizado o alinhamento (grosseiro e fino) pode ser feito por uma pessoa sem prática em uma faixa entre quatro e dez minutos dependendo do tipo de peça e acabamento superficial da mesma.

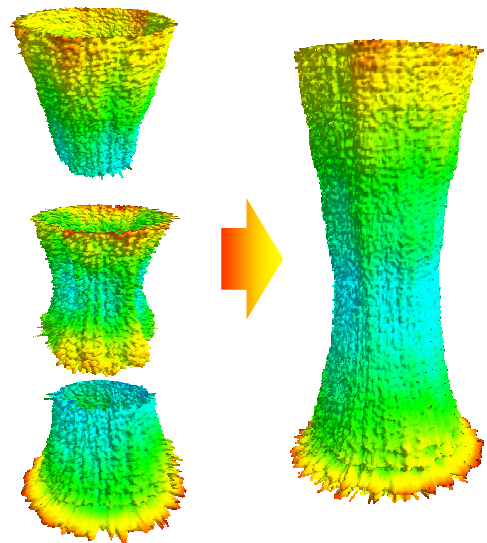
A terceira e última etapa do alinhamento é feita pelo programa de computador. A nuvem de pontos medida é ajustada a um cilindro matematicamente perfeito e as translações e rotações determinadas para seu eixo são usadas para numericamente deslocar a nuvem de pontos visando alinhá-la com o eixo matemático. Nesta etapa não há alteração na forma ou dimensões medidas, pois apenas translações e rotações são aplicadas.



**Figura 11 – Medição de um pistão de compressor hermético. A parte superior mostra a nuvem de pontos em escala normal. A parte superior, em escala exagerada.**

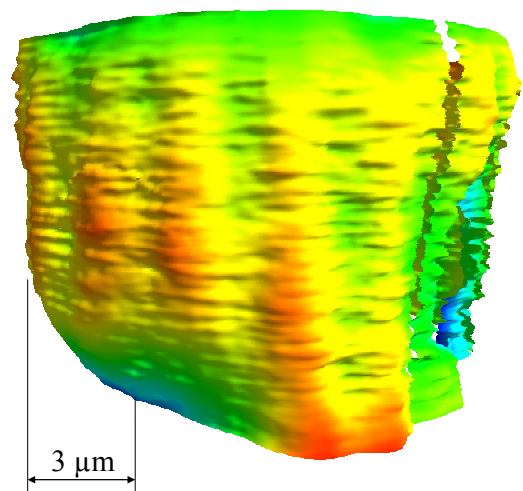
A Figura 11 mostra dois resultados da medição de um mesmo pistão de compressor hermético, com 22 mm de diâmetro. Na parte superior a nuvem de pontos do pistão é representada na escala natural. Na parte inferior a superfície medida é representada em escala muito exagerada, evidenciando de maneira muito clara erros de forma.

Um exemplo de medição em etapas de um pino longo é representado na Figura 12. As três medições da esquerda foram feitas de forma a manter regiões de superposição, que são usadas para o alinhamento relativo e fusão dos dados. A parte direita mostra o pino composto da combinação das três medições da esquerda. O processo resulta em superfícies suaves, sem descontinuidades entre as regiões unidas.



**Figura 12 – Pino longo medido por etapas e posteriormente combinado.**

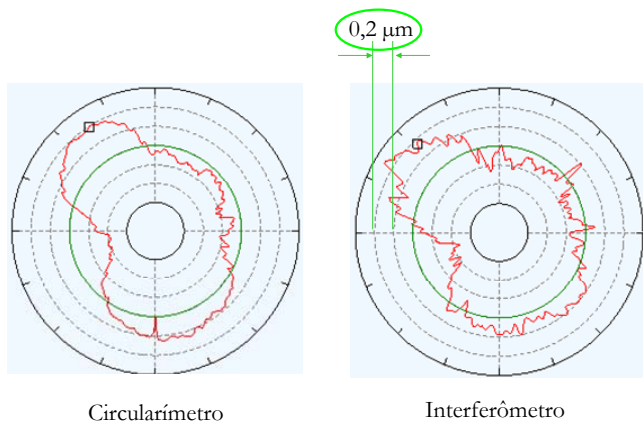
A Figura 13 mostra um cilindro desgastado na parte inferior esquerda. A remoção de material foi da ordem de  $3\ \mu\text{m}$ . [8]



**Figura 13 – Cilindro desgastado na parte esquerda inferior.**

Finalmente, a Figura 14 mostra os resultados da comparação da medição da mesma seção de um cilindro realizada por

contato em um circularímetro e pelo interferômetro.<sup>[9]</sup> Note que o valor da divisão da escala radial do gráfico é de apenas  $0,2\ \mu\text{m}$ . As diferenças entre os resultados em nenhum ponto supera  $0,2\ \mu\text{m}$ . A medição com o interferômetro mostra um pouco mais de detalhes da seção medida, o que é natural, tendo em conta o efeito de filtragem do apalpador mecânico.



**Figura 14 – Comparação do erro de forma de uma mesma peça medida por um circularímetro (com contato) e pelo interferômetro. O valor da divisão da escala é de apenas  $0,2\ \mu\text{m}$ .**

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho mostra que é possível medir superfícies cilíndricas com interferômetros de luz branca. A configuração óptica é modificada através da introdução de espelhos cônicos de alta qualidade com ângulo de  $45^\circ$  para transformar coordenadas cilíndricas em retangulares. Dois protótipos deste interferômetro foram desenvolvidos, construídos, alinhados e calibrados usando calibradores e anéis padrão como referência. Com uma única medição é possível adquirir nuvens com centenas de milhares de pontos sobre a superfície cilíndrica e, com eles, visualizar erros de forma com grande riqueza de detalhes, e medir circularidade, cilíndricidade e linearidade da geratriz.

Em função das limitações de tamanho dos componentes ópticos ambos os sistemas medem apenas superfícies cilíndricas com comprimento máximo limitado pelas dimensões dos espelhos cônicos. Entretanto, as medições por partes, combinando as nuvens de pontos parciais medidas, permitem estender a capacidade do sistema de forma praticamente ilimitada.

O desempenho metrológico do sistema óptico foi avaliado através de um amplo balanço de incertezas e verificado através de medições comparativas. Anéis padrões e calibradores foram usados. Medições comparativas com sistemas com contato foram também realizadas e são apresentadas no artigo. Diferenças não superiores a  $0,2\ \mu\text{m}$  foram encontradas entre as duas medições. Em condições de laboratório incertezas de  $0,35\ \mu\text{m}$  foram estimadas para medições de formas de cilindros externos de excelente acabamento superficial.

Os interferômetros construídos se mostraram extremamente úteis pra um grande número de aplicações industriais. A transformação dos protótipos de laboratório em produtos está em estado avançado e sendo realizado pela empresa Photonita ([www.photonita.com.br](http://www.photonita.com.br)).

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer as contribuições valiosas de Alex Dal Pont, Yara Lerm, Fabricio Broering, Osvino Koch, Ricardo Hatanaka, Darlan Becker, Fabio Alves da Silva, Pedro Zamuner e o apoio financeiro e técnico decisivo da EMBRACO e da FINEP.

## 7. REFERÊNCIAS

1. T. Yatagi, "Recent progress in white-light interferometry," In Proc. SPIE Interferometry '94: New techniques and analysis in optical measurements, M. Kujawinska and K. Patorsky eds., vol. 2340, 338-345 (1994).
2. P. De Groot, "Method and apparatus for surface topography measurement by spatial-frequency analysis of interferograms," U. S. Patent 5, 398, 113 (14 March 1995).
3. P. De Groot, "Surface profiling by analysis of white-light interferograms in the spatial frequency domain," J. Mod. Opt. 42, 389-401 (1995).
4. A. Harasaki, J. Schmit and J. C. Wyant. "Improved vertical-scanning interferometry," Appl. Opt. 39(13), 2107-2115 (2000).
5. M. R. Viotti; A. Albertazzi Jr; A. Dal Pont; A. V. Fantin. "Evaluation of a novel algorithm to align and stitch adjacent measurements of long inner cylindrical surfaces with white light interferometry". Opt.Lasers Eng., v. 45, p. 852-859 (2007).
6. A. Albertazzi and A. Dal Pont, "A white light interferometer for measurement o external cylindrical surfaces," In 5th International workshop on automatic processing of fringe patterns, Fringe'05. W. Osten, ed. 632-639 (2005).
7. R. M. Miggiorin, "Automatização do alinhamento e da operação do sistema IRAD - interferômetro radial de luz incoerente para peças cilíndricas", Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial da Universidade Federal de Santa Catarina, 12/2007. p 1-117.
8. M. R. Viotti; A. Albertazzi Jr; A. V. Fantin; A. Dal Pont. "White light interferometry applied to measure form and wear of external and internal cylindrical surfaces". In: RIAO/OPTILAS'07 - VI Reunión Iberoamericana de Óptica (VI RIAO) y IX Encuentro Latinoamericano de Óptica, Lasers y sus Aplicaciones (IX OPTILAS), 2007, Campinas/SP. RIAO/OPTILAS'07 - VI Reunión Iberoamericana de Óptica (VI RIAO) y IX Encuentro Latinoamericano de Óptica, Lasers y sus Aplicaciones (IX OPTILAS) (2007). p. 1-6.
9. M. R.Viotti, A. Albertazzi Jr; A. V. Fantin. "Comparison between a white-light interferometer and a tactile formtester for the measurement of long inner cylindrical surfaces". Opt. Lasers Eng., v. 46, p. 396-403 (2008).