

**Tecnologia, inovação e sustentabilidade:
50 anos de Cursos de Tecnologia no Brasil.**

Medição de potência de lentes por projeção de franjas

E. A. Barbosa¹, Luiz F. G. Dib², M. C. Henrique³, V. N. Meneses⁴, C. da Costa⁵

Resumo – Neste trabalho desenvolveu-se um método para a caracterização de lentes por projeção de franjas de interferência. A imagem de franjas retas e paralelas projetadas em uma tela plana foi obtida com e sem a lente de prova. Para cada uma destas configurações, e por meio de procedimentos de *phase-stepping* e *phase-unwrapping*, obtiveram-se duas reconstruções tridimensionais da tela plana, com diferentes inclinações. Derivou-se uma expressão em que a potência da lente foi obtida em função da relação entre as duas inclinações e dos parâmetros da configuração óptica. O padrão de interferência foi gerado por meio de um interferômetro de *Michelson* usando-se um laser de 532 nm, e a avaliação do interferograma foi realizada pelo método de *four stepping*.

Palavras-chave: Projeção de franjas, análise de franjas, caracterização de lentes.

Abstract - In this work a method was developed for the characterization of projection lens with interference fringes. The straight and parallel fringes projected onto a flat screen were taken with and without the test lens. For each of these configurations, and by phase-stepping and phase-unwrapping procedures, two three-dimensional flat-screen reconstructions with different inclinations were obtained. An expression was derived whereby the power of the lens was obtained as a function of the relationship between the two inclines and the parameters of the optical configuration. The interference pattern was generated by a Michelson interferometer using a 532 nm laser, and the interferogram evaluation was performed by the four-stepping method.

Keywords: Fringe projection, fringe analysis, lens characterization

1. Introdução

Tradicionalmente, a medição de lentes é essencialmente baseada em óptica geométrica. No entanto, a exigência de testes mais precisos e exatos e que medissem a distribuição da potência da lente em toda sua abertura deram origem a outras técnicas que fazem uso de outras áreas da óptica, notadamente a óptica ondulatória, como interferometria, holografia e difração, entre outras (BARBOSA, 2013).

¹ Unidade de Pós-Graduação, Extensão e Pesquisa, CEETEPS, São Paulo, ebarbosa@fatecsp.br

² Unidade de Pós-Graduação, Extensão e Pesquisa, CEETEPS, São Paulo, lfgdib@fatecsp.br

³ Unidade de Pós-Graduação, Extensão e Pesquisa, CEETEPS, São Paulo, marlene.c.henrique@gmail.com

⁴ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, São Paulo, vinicius.meneses@aluno.ifsp.edu.br

⁵ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, São Paulo, ccosta@ifsp.edu.br

Para este experimento, utilizou-se uma fonte de laser, um interferômetro de Michelson, uma tela plana e uma câmera CCD. A lente de prova foi colocada entre a câmera e a tela. O interferograma formado por franjas paralelas e retas ilumina obliquamente uma tela opaca plana e sua imagem é formada no arranjo CCD. Devido à potência dióptrica da lente, o interferograma visto por meio da lente de prova e o interferograma formado na região ao redor da lente têm diferentes frequências espaciais (TAY, 2005). Ao avaliar as franjas por *four stepping* (CREATH, 1988) e deconvoluir o mapa de fase por *phase unwrapping* (LANGLEY, et al., 2010), as frentes de onda reconstruídas em ambas as regiões aparecem como superfícies inclinadas em relação ao eixo óptico do sistema. Devido à potência da lente, as inclinações da imagem da lente e a imagem de fundo são diferentes. Derivou-se uma expressão que fornece o poder da lente como uma função da razão entre essas inclinações. Lentes positivas e negativas foram testadas. Demonstrou-se que o método proposto neste trabalho fornece testes mais simples e menos dispendiosos do que a grande maioria dos métodos relatados na literatura, o que aponta a possibilidade de desenvolvimento de um dispositivo comercial baseado nesta técnica.

2. Referencial Teórico

Considerou-se um sistema óptico formado por duas lentes delgadas L1 e L2 formando a imagem de uma tela plana opaca S em uma câmera CCD como mostrado na Figura 1a (BARBOSA, 2008). A tela é iluminada por luz estruturada (GENG, 2011) – um padrão de franjas retas e paralelas – e as lentes L1 e L2 têm potências dióptricas ϕ_1 e ϕ_2 , respectivamente. A distância entre a tela e L1 é s e a distância entre as lentes é d . A distância entre a lente L1 e o alvo CCD – isto é, o plano da imagem – é s' . A ótica geométrica na aproximação paraxial fornece a ampliação lateral M da imagem do objeto como mostra a Eq. (1) (GÅSVIK, 2002).

$$M = \frac{1}{(-\phi_1 - \phi_2 + \phi_1\phi_2d)(s-d) + 1 - d\phi_1} \quad \text{Eq. (1)}$$

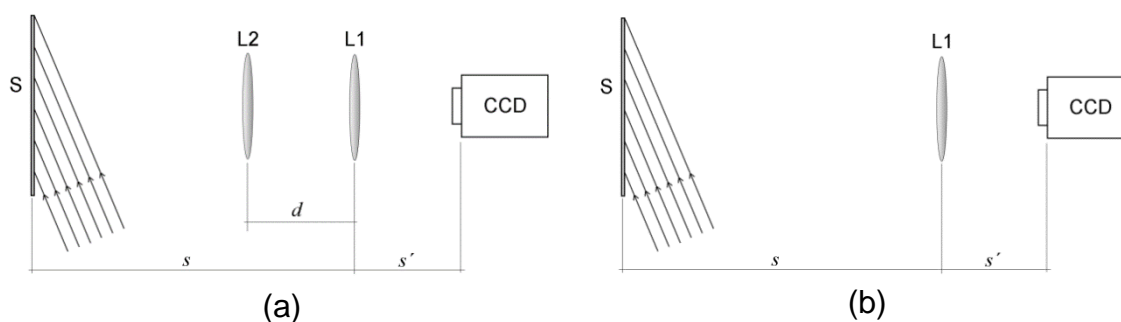
Se a lente L2 for removida, o sistema óptico restante, como mostrado na Figura 1b, fornece a magnificação.

$$M' = \frac{1}{1 - s\phi_1} \quad \text{Eq. (2)}$$

As lentes L1 e L2 estão posicionadas de tal modo que a profundidade de campo de ambas as configurações ópticas permite a formação das imagens do padrão de luz no alvo CCD com diferentes magnificações. Da Eq. (1) e (2), obtemos ϕ_2 como:

$$\phi_2 = \frac{1 - s\phi_1}{(\phi_1d - 1)(s - d)} \left(\frac{M}{M'} - 1 \right) \quad \text{Eq. (3)}$$

Figura 1: arranjo óptico



Fonte: os autores

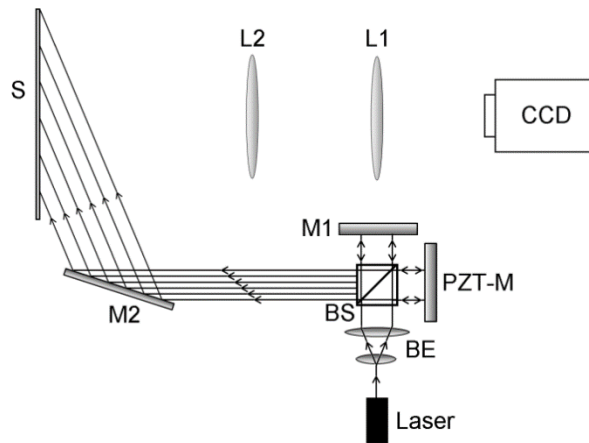
Neste arranjo experimental, a luz estruturada é formada por franjas de interferência retas, paralelas e regularmente espaçadas. Uma vez que a área da tela é um pouco maior que a área da lente L2, a imagem resultante do padrão de franjas tem uma frequência espacial dentro da região limitada por L2 e uma frequência espacial diferente na região ao redor de L2, isto é, o interferograma de fundo. A razão M/M' entre as magnificações é também a razão entre o período espacial do interferograma dentro de L2 e o período espacial do interferograma de fundo. Uma maneira possível de determinar essa relação é apenas medir o período espacial dos padrões de franja ou, correspondentemente, contar o número de franjas de ambos os padrões em um determinado comprimento. No entanto, uma desvantagem deste método pode ocorrer quando as franjas dentro da lente de teste não estão igualmente espaçadas, o que é típico, por exemplo, de lentes progressivas (SHEEDY, 2005). Para superar esta desvantagem, propõe-se avaliar os padrões de franja por meio de *four stepping* e por *phase unwrapping*.

3. Método

O feixe de um laser Nd: YAG bombeado por diodo, dobrado em frequência, emitindo a 532 nm, com potência 100 mW, é filtrado espacialmente e colimado pelo expensor de feixe BE para iluminar um interferômetro de Michelson. O feixe é então direcionado pelo espelho M2 e colide com uma tela plana de 20 cm x 20 cm. O interferômetro foi alinhado para gerar interferogramas com franjas de interferência verticais ou horizontais regularmente espaçadas. Um dos espelhos do interferômetro de Michelson é movido por um transdutor piezoelétrico, acionado por uma fonte de tensão para realizar os processos de *phase stepping*. O arranjo está mostrado na Figura 2.

A imagem do interferograma é capturada por uma câmera CCD de 640 linhas (Sony) com a objetiva L1 de comprimento focal 28 mm. As lentes L1 e L2 são posicionadas ao longo do eixo óptico, de modo que tanto o interferograma dentro dos limites da lente de prova quanto o interferograma de fundo são visualizados no alvo CCD.

Figura 2: montagem experimental



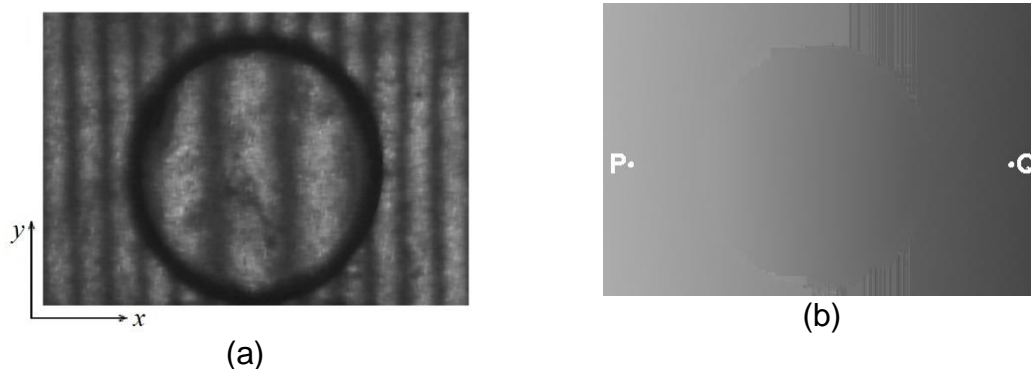
Fonte: os autores

4. Resultados e Discussão

Caracterização de uma lente positiva - o padrão de franjas produzido por uma lente positiva de 50 mm de diâmetro (que desempenha o papel de lente L2 na Figura 1) é mostrado na Figura 3a. O comprimento focal nominal da lente é $f_{2NOM} = 40$ cm, o que corresponde a uma potência dióptrica de $\phi_{2NOM} = 2,5$ dp. Nota-se nitidamente a diferença de períodos espaciais entre o padrão de franjas dentro e o padrão de franjas fora da abertura da lente. Na configuração óptica, $s = 126$ cm e $d = 98$ cm e $\phi_1 = 35.7$ dp. A Figura 3b mostra a fase deconvoluída. Os padrões de fase deconvoluída nas regiões dentro e fora dos limites da lente de prova apresentam diferentes gradientes de nível de cinza: na região da lente de teste, o gradiente $\partial z/\partial x$ é inversamente proporcional a M , enquanto que na fase deconvoluída do fundo o gradiente $(\partial z/\partial x)'$ é inversamente proporcional a M' . Neste caso, assumimos que a intensidade do padrão de interferência senoidal varia ao longo da direção x , como mostrado na Figura 3b. Assim, a Eq. (3) torna-se

$$\phi_2 = \frac{1 - s\phi_1}{(\phi_1 d - 1)(s - d)} \left[\frac{(\partial z/\partial x)'}{\partial z/\partial x} - 1 \right] \quad \text{Eq. (4)}$$

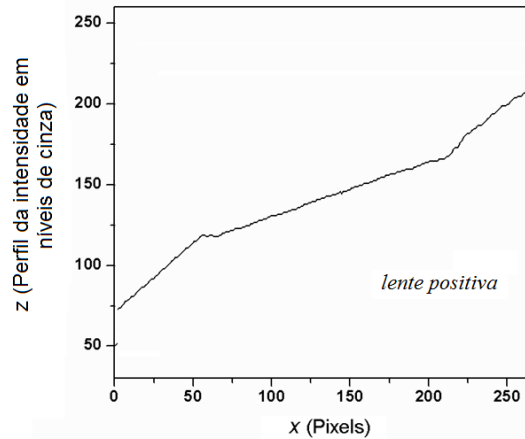
Figura 3: a - Interferograma por meio da lente; b – fase deconvoluída



Fonte: os autores

A Figura 4 mostra os valores do perfil de intensidade z do mapa de fase desembrulhado. A partir desse gráfico, obtém-se a inclinação da curva dentro da região da lente como $(\partial z/\partial x)=0.140 \text{ pixel}^{-1}$, enquanto a inclinação da curva fora da lente é $\partial z/\partial x = 0.284 \text{ pixel}^{-1}$. Da Eq. (4), a potência dióptrica da lente é determinada experimentalmente como sendo $\phi_{2EXP} = 2.43 \text{ dp}$. Por comparação com o valor nominal, obtém-se um erro percentual de 2,8%.

Figura 4: perfil dos níveis de cinza ao longo da linha que une P a Q



Fonte: os autores

5. Considerações finais

Neste trabalho, desenvolveu-se uma técnica para a medição do comprimento de onda de lentes por meio da projeção de franjas de interferência sobre uma tela plana e da interpretação quantitativa do padrão formado pela lente em análise. A técnica permite a obtenção de mapas de fase deconvoluída nas regiões interna e adjacente à lente. A determinação do comprimento focal e da potência dióptrica da lente é obtida por meio da razão entre as derivadas destes dois mapas de fase. O resultado da potência da lente analisada neste trabalho apresentou um erro aceitável de 2,8 %, se comparado ao valor nominal. Por sua simplicidade experimental, pela facilidade na coleta e no processamento dos dados e pelo bom resultado obtido, este método mostra-se promissor, por apontar para a possibilidade de caracterização de lentes mais complexas, como as lentes tóricas e as lentes progressivas.

Referências

BARBOSA, E. A. et al. *Progressive power lens measurement by low coherence speckle interferometry*. Optics and Lasers in Engineering, 2013, v. 51, n. 7, pp. 898-906. 2013.

BARBOSA, E. A. et al. *Refractive and geometric lens characterization through multi-wavelength digital speckle pattern interferometry*. Optics Communications, 2008, vol. 281, no. 5, pp. 1022–1029, 2008.

CREATH, K, *Phase-measurement interferometry techniques*. Prog. Opt. 26:349. doi: [10.1016/S0079-6638\(08\)70178-1](https://doi.org/10.1016/S0079-6638(08)70178-1), 1988.

LANGLEY, Jason A., BRICE Robert G., ZHAO Qun, *Recursive approach to the moment-based phase unwrapping method*, Applied Optics, v. 49, n. 16, p. 3096-3101. 2010

GENG, J. *Structured-light 3D surface imaging; a tutorial*. Advances in Optics and Photonics, 2011, Vol. 3, 2, pp. 128-160, 2011.

GÅSVIK, Kjell J. Optical metrology. 3^a ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2002

SHEEDY, J. E. et al. *Progressive Powered Lenses: the Minkwitz Theorem*. Optometry and Vision Science, 2005, vol. 82, no. 10, pp. 916–924, 2005.

TAY, C. J. et al. *Measurement of focal length of lens using phase shifting Lau phase interferometry*. Optics Communications, 2005, vol. 281, no. 5, pp. 1022–1029, 2005.