

Tendências, Expectativas e Possibilidades no Cenário Contemporâneo em Educação Profissional e Sistemas Produtivos.

Método para medição do comprimento de onda sintético em arranjos de interferometria speckle

Marcelo T. Saita¹; Adalberto M. Joaquim²; Eduardo A. Barbosa³; Francisco T. Degasperi⁴

Resumo - O objetivo deste trabalho é propor um método para medir o comprimento de onda sintético em arranjos de interferometria speckle. O método proposto consiste na utilização de um padrão de franjas de interferência, geradas por um objeto com geometria e propriedades ópticas conhecidas, para medir o comprimento de onda sintético. O método proposto mostrou-se adequado. Utilizando o comprimento de onda sintético calculado pelo método proposto foi possível realizar a reconstrução das frentes de onda em cinco configurações de emissão distintas. Utilizando as frentes de ondas reconstruídas, o ângulo interno do objeto de referência foi calculado e os erros e desvios encontrados foram menores que a incerteza de medição estimada para o arranjo óptico.

Palavras-chave: Speckle, Comprimento de onda sintético, Superfícies.

Abstract - The objective of this work is to propose a method to measure the synthetic wavelength of a speckle interferometer. The proposed method consists in using a pattern of interference fringes generated by an object with known geometry and optical properties to measure the synthetic wavelength. The proposed method has proven itself adequate. Using the synthetic wavelength calculated by the proposed method it was possible to rebuild the wavefront in five different emission configurations. Using the reconstructed wavefront, the internal angle of the reference object was calculated and found errors and deviations were lower than the estimated measurement uncertainty for the optical arrangement.

Keywords: Speckle, Synthetic wavelength, Surface.

¹ Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza; marcelo.saita@cpspos.sp.gov.br

² Faculdade de Tecnologia de São Paulo; adalberto.machadojoaquim@hotmail.com

³ Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza; ebarbosa@fatecsp.br

⁴ Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza; ftd@fatecsp.br

Tendências, Expectativas e Possibilidades no Cenário Contemporâneo em Educação Profissional e Sistemas Produtivos.**1. Introdução**

De acordo com o apresentado por Jacquot (2008), as técnicas de interferometria speckle apresentam uma ampla gama de aplicações na metrologia mecânica, permitindo medições de superfícies, deslocamentos, vibrações, rugosidade, deformações e tensões com uma grande sensibilidade e precisão. Estas técnicas permitem a medição de uma grande área em vez de medições ponto a ponto e o processo de medição é completamente não destrutivo, não invasivo e não intrusivo.

Dentre as técnicas de interferometria speckle, podemos destacar as técnicas com dois comprimentos de onda, estas técnicas apresentam como principal vantagem a utilização de um comprimento de onda sintético que pode ser ajustado para melhor se adequar ao objeto em estudo permitindo medições com uma sensibilidade que varia de alguns micrometros a algumas dezenas de milímetros. Para interpretar corretamente os interferogramas é indispensável o conhecimento do comprimento de onda sintético, uma vez que a sensibilidade do sistema depende diretamente deste parâmetro. Os métodos mais comuns para o monitorar o espectro de emissão dos lasers utilizados são por meio de um interferômetro de varredura Fabry-Perot ou por meio de um espectrômetro, no entanto estes sistemas apresentam um custo elevado de fabricação e podem nem sempre estar disponíveis. Outro método disponível consiste em introduzir uma diferença de caminho óptico numa das frentes de onda até que o padrão de franjas sofra um deslocamento de fase de 2π , neste caso o caminho óptico introduzido é equivalente ao comprimento de onda sintético. Este segundo método é altamente suscetível ao desalinhamento do arranjo e a incerteza do sistema escolhido para introduzir a diferença de caminho óptico.

O objetivo deste trabalho é propor um método para medir o comprimento de onda sintético de um arranjo de interferometria speckle. O método adotado consiste na utilização de um padrão de franjas de interferência, geradas por um objeto com geometria e propriedades ópticas conhecidas, para medir o comprimento de onda sintético.

2. Referencial Teórico

Conforme o relatado por Fercher (1985), a soma de dois padrões de interferência com comprimentos de ondas distintos λ_1 e λ_2 gera um padrão de franjas com um intervalo de contorno proporcional a um comprimento de onda sintético λ_s dado pela equação 1 abaixo.

$$\lambda_s = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|} \quad \text{Eq. (1)}$$

Tendências, Expectativas e Possibilidades no Cenário Contemporâneo em Educação Profissional e Sistemas Produtivos.

Se os comprimentos de onda λ_1 e λ_2 forem suficientemente próximos é possível obter um intervalo de contorno muito maior que os próprios comprimentos de onda, resultando num intervalo de contorno de alguns micrometros até algumas dezenas de milímetros.

Barbosa e Lino (2007) demonstraram que utilizando um arranjo de interferometria speckle com um laser de diodo operando em regime multimodo é possível obter um padrão de franjas de interferência com um intervalo de contorno muito maior que o comprimento de onda central do laser. Neste caso o intervalo de contorno é dado por um comprimento de onda sintético que é inversamente proporcional ao intervalo espectral livre do laser (FSR). Utilizando este arranjo foram feitas imagens de uma barra de vidro inclinada a 20° e os desvios encontrados foram de 0,3 a 1,5 milímetros. Posteriormente Barbosa e Dos Santos (2008) utilizaram um arranjo similar para caracterizar a geometria de três lentes tipos de lentes (Biconvexa, Parabólica e Tórica).

Utilizando uma abordagem diferente Barbosa, Da Silva e Lima. (2012) caracterizaram uma lente progressiva. A nova abordagem consistia em utilizar dois lasers de diodo. A sintonia dos lasers era realizada variando suas correntes de alimentação. Da Silva (2011) utilizou um arranjo similar para estudar o fenômeno de lentes térmicas. O arranjo utilizava dois lasers de diodo emitindo comprimentos de onda ligeiramente diferentes.

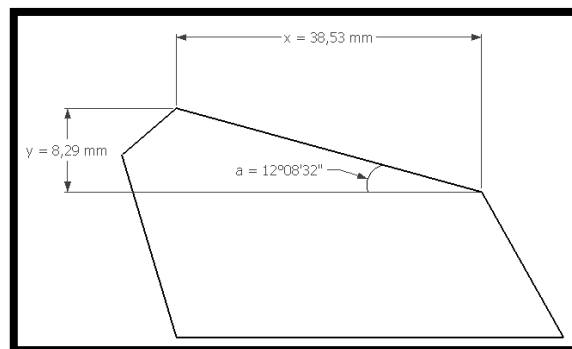
Pouco tempo depois, Da Silva, Barbosa e Wetter (2015) desenvolveram um arranjo de interferometria speckle com dois comprimentos de onda utilizando um laser de diodo sintonizável com cavidade externa. A configuração utilizada para sintonizar o laser foi do tipo Littman-Metcalf e foram relatados comprimentos de onda sintéticos de 184,47 micrometros até 4,2 centímetros. A principal vantagem em utilizar um laser de diodo sintonizável com cavidade externa é o aumento do intervalo de sintonia e a maior estabilidade na emissão do laser. Neste arranjo, os modos de emissão do laser foram monitorados por um espectrômetro e o comprimento de onda sintético foi calculado pela Eq. (1).

3. Método

Foi montado no Laboratório de Óptica Aplicada da Fatec-SP um arranjo óptico de interferometria speckle. O comprimento de onda sintético do arranjo foi calculado utilizando como referência um padrão de franjas de interferência gerado por um objeto de geometria e propriedades ópticas conhecidas. O objeto selecionado foi um prisma de vidro óptico BK7. A inclinação do prisma foi medida no Laboratório de Metrologia da Fatec-SP e seu índice de refração no Laboratório de Óptica Técnica da Fatec-SP.

Tendências, Expectativas e Possibilidades no Cenário Contemporâneo em Educação Profissional e Sistemas Produtivos.**3.1. Medição do ângulo de referência do prisma**

Para determinar o comprimento de onda sintético no arranjo foi utilizada como referência a inclinação de uma das faces do prisma. O prisma foi medido no Laboratório de Metrologia da Fatec-SP por uma máquina de medição por coordenadas. A Figura 1 mostra a vista superior do prisma e os resultados das medições.

Figura 1 - Prisma objeto.

Fonte: Própria autoria.

3.2. Medição do índice de refração do prisma

O índice de refração do prisma foi calculado a partir do ângulo de Brewster do material do prisma. O ângulo de Brewster foi medido no Laboratório de Óptica Técnica da Fatec-SP com o auxílio de um laser de He-Ne, um polarizador e um goniômetro. A Tabela 1 mostra o ângulo de Brewster medido e o respectivo índice de refração. Foi considerando o índice de refração do ar $n_{ar} = 1$.

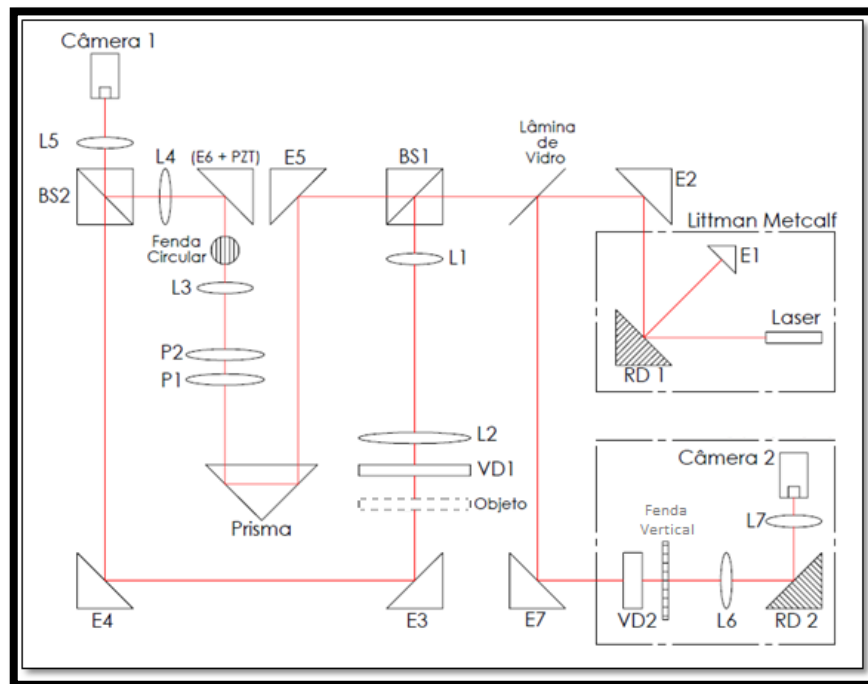
Tabela 1 - Ângulo de Brewster e índice de refração do prisma.

Ângulo de Brewster	n_{prisma}
56°30''	1,51

Fonte: Própria autoria.

3.3. Arranjo óptico

Foi montado um arranjo óptico de interferometria speckle conforme ao apresentado por Da Silva, Barbosa e Wetter (2015). A Figura 2 mostra o arranjo óptico montado.

Tendências, Expectativas e Possibilidades no Cenário Contemporâneo em Educação Profissional e Sistemas Produtivos.**Figura 2 – Arranjo Óptico.**

Fonte: Própria autoria.

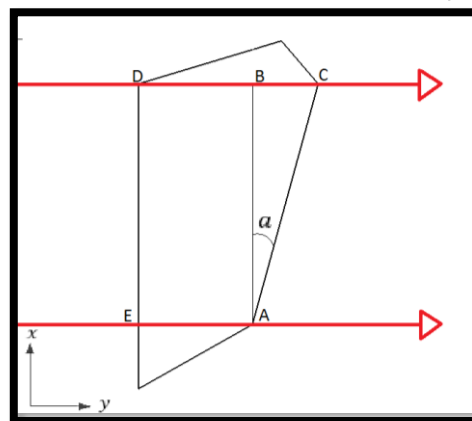
O laser incide na rede de difração RD1 de modo que sua ordem zero seja difratada para o arranjo pelo espelho E2 e sua primeira ordem para o espelho E1. O espelho E1 direciona a primeira ordem difratada novamente para a cavidade do laser pela rede difração RD1. A seleção dos modos de emissão do laser é feita pelo alinhamento do espelho E1. O espelho E2 direciona o feixe para o divisor de feixe BS1 enquanto uma lâmina de vidro divide e direciona parte do feixe para o espelho E7. No divisor de feixe BS1 o feixe é dividido em duas partes, o feixe objeto e o feixe referência. O feixe objeto é colimado pelas lentes L1 e L2, logo à frente, o vidro despolido VD1 espalha o feixe colimado e ilumina o objeto. Os espelhos E3 e E4 direcionam o feixe objeto para o divisor de feixes BS2. O feixe referência é direcionado pelo espelho E5 para um prisma montado sobre uma base móvel com um fuso micrométrico e em seguida a um par de polarizadores P1 e P2. O feixe então passa por um filtro espacial composto por uma lente L3 e uma fenda circular. Por fim, o espelho E6 acoplado a uma cerâmica piezoelétrica (PZT) direciona o feixe referência para o divisor de feixe BS2. O par de lentes L4 e L5 colima o feixe referência. No divisor de feixes BS2, os feixes referência e objeto são reunidos novamente e direcionados para a lente L5 que, além de colimar o feixe referência, cria a imagem do objeto na Câmera 1. O sistema composto pelo vidro despolido VD2, fenda vertical, rede de difração RD2, par de lentes L6, L7 e câmera 2 é responsável pelo monitoramento dos modos de emissão do laser. O feixe depois de passar pelo vidro despolido e pela fenda vertical incide na rede de difração. O par de lentes forma a imagem da primeira ordem difratada na câmera 2. Como cada comprimento de onda é difratado com um ângulo diferente é possível avaliar qualitativamente a quantidade de modos de emissão do laser assim como o espaçamento entre os modos.

Tendências, Expectativas e Possibilidades no Cenário Contemporâneo em Educação Profissional e Sistemas Produtivos.

3.4. Calibração do comprimento de onda sintético

A Figura 3 mostra a vista superior do esquema de iluminação do prisma e o sistema de coordenadas adotado. Na Figura 3 a iluminação acontece da esquerda para a direita.

Figura 3 - Esquema de iluminação.



Fonte: Própria autoria.

O caminho óptico percorrido pela luz no intervalo definido pelo retângulo ABDE é igual para todos os feixes, portanto pode ser desconsiderado. Pelo triângulo ABC temos o seguinte;

$$\tan a = \frac{\Delta y}{\Delta x} \tag{Eq. (2)}$$

Onde: a é o ângulo de referência do prisma, Δx é a distância em x entre dois pontos e Δy é a diferença em y entre os dois pontos.

A diferença de caminho óptico entre dois pontos é dada pela Eq. (3).

$$\Delta\Gamma = \Delta y \cdot n_{prisma} - \Delta y \cdot n_{ar} \tag{Eq. (3)}$$

Sabendo que a diferença de caminho óptico entre dois pontos de máximo consecutivos é igual ao comprimento de onda sintético e que a diferença de caminho óptico entre os pontos é dada pela Eq. (3), podemos substituir a Eq. (3) na Eq. (2) para obter a Eq. (4).

$$\lambda_s = \Delta\Gamma = \tan a \cdot \Delta x' \cdot (n_{prisma} - n_{ar}) \tag{Eq. (4)}$$

Onde: a é o ângulo de referência do prisma, $\Delta x'$ é a distância entre dois pontos de máximo consecutivos, n_{prisma} é o índice de refração do prisma e $n_{ar} = 1$ é o índice de refração do ar.

Tendências, Expectativas e Possibilidades no Cenário Contemporâneo em Educação Profissional e Sistemas Produtivos.

Conhecendo a inclinação do prisma, seu índice de refração e a distância entre dois pontos de máximo consecutivos a Eq. (4) pode ser utilizada para calcular o comprimento de onda sintético.

3.5. Calibração da matriz de pixels

Os padrões de interferência são registrados numa câmera CCD, portanto a partir das imagens obtêm-se uma relação de distâncias em pixels. Para obter uma relação entre os pixels e a distância real, foram utilizadas como referência as imagens de um paquímetro analógico. O paquímetro foi montado no arranjo e foram capturadas imagens das garras abertas em 6 posições diferentes (5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm e 30 mm). A distância em pixels entre as garras foi medida e o fator de proporcionalidade foi calculado para cada posição. Por fim, o valor médio do fator foi adotado como referência. A Tabela 2 mostra os resultados de cada medição e os fatores calculados. Na última linha é apresentado o fator médio.

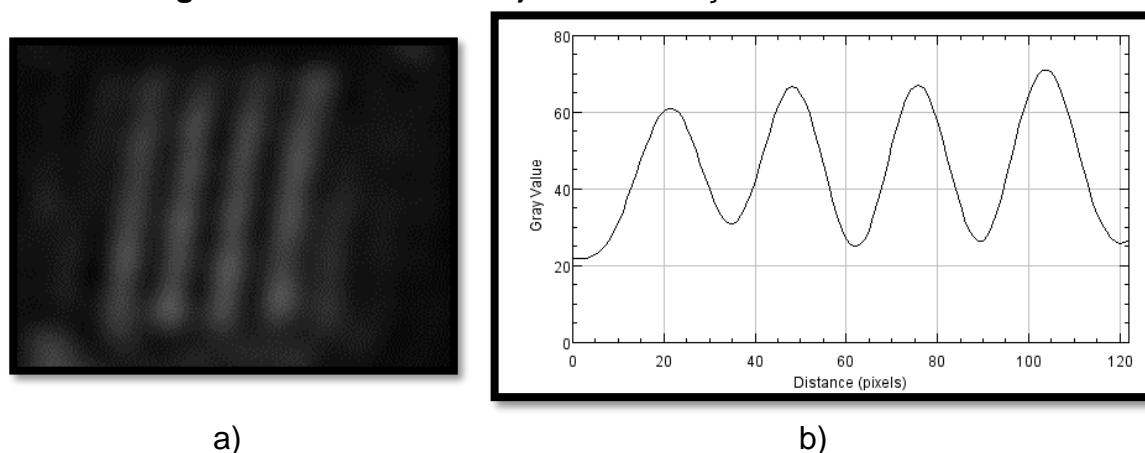
Tabela 2 - Resultados da medição do paquímetro.

Abertura do paquímetro	Distância em pixels	Fator (mm/pixel)
5 mm	17	0,294
10 mm	35	0,286
15 mm	52	0,288
20 mm	69	0,290
25 mm	85	0,294
30 mm	104	0,288
-	-	0,290

Fonte: Própria autoria.

3.6. Aquisição das imagens

O prisma foi montado no arranjo e o laser foi ajustado para emitir dois comprimentos de onda distintos. Foram capturadas duas imagens consecutivas e as imagens foram subtraídas entre si. Uma transformada rápida de Fourier foi utilizada para filtrar o resultado da subtração. A Figura 4 a) mostra o padrão de franjas obtido e a Figura 4 b) mostra a distribuição de intensidade ao longo de uma linha horizontal traçada à meia altura do padrão de franjas.

Tendências, Expectativas e Possibilidades no Cenário Contemporâneo em Educação Profissional e Sistemas Produtivos.**Figura 4 – Padrão de franjas e distribuição de intensidades.**

Fonte: Própria autoria.

As distâncias entre os pontos de máximo consecutivos foram medidas e os valores em pixels foram convertidos para milímetros pelo fator médio da Tabela 2. A distância média entre os pontos de máximo foi utilizada para calcular o comprimento de onda sintético pela Eq. (4). A Tabela 3 mostra o resultado dos cálculos.

Tabela 3 – Distâncias entre os máximos.

	Distância em pixels	Distância em mm	Comprimento de onda sintético
1º máximo até o 2º máximo	27,0	7,8	-
2º máximo até o 3º máximo	27,0	7,8	-
3º máximo até o 4º máximo	28,0	8,1	-
Distância média	27,3	7,9	0,87 mm

Fonte: Própria autoria.

3.7. Modelo simplificado de propagação de incertezas

A incerteza de medição do ângulo do prisma foi estimada com base em Taylor (1997). As principais componentes de incerteza na determinação do ângulo do prisma são as componentes associadas à incerteza de medição das distâncias Δy e Δx da Eq. (2). O fator mais restritivo na determinação destas distâncias é a resolução da câmera. Como pode ser visto pela Tabela 2, cada pixel equivale a aproximadamente a uma distância de 0,290 mm. Aplicando propagação de

Tendências, Expectativas e Possibilidades no Cenário Contemporâneo em Educação Profissional e Sistemas Produtivos.

incertezas e utilizando os resultados da Figura 1, obtêm-se uma incerteza na determinação do ângulo do prisma de $0,8^\circ$ com um intervalo de confiança de aproximadamente 95%.

4. Resultados e Discussão

Os cálculos do Item 3.6. foram repetidos para mais quatro configurações de emissão do laser, totalizando cinco configurações. Para cada uma das configurações foram calculados os mapas de fase e suas respectivas deconvoluções de fase utilizando as técnicas de deslocamento de fase com quatro passos e deconvolução de fase apresentadas por Barbosa e Lino (2007). O comprimento de onda sintético calculado pela Eq. (4) foi utilizado para aplicar a técnica de deslocamentos de fase com passos.

A partir das frentes de onda reconstruídas, a inclinação do prisma foi calculada por meio de um ajuste linear. A inclinação foi calculada ao longo de três linhas horizontais igualmente distribuídas ao longo da superfície do prisma.

A Tabela 4 mostra para cada um dos comprimentos de onda sintético utilizados (λ_s), os valores de inclinação encontrados para cada linha (a_1 , a_2 e a_3), a inclinação média ($a_{Média}$), o desvio padrão entre as medições (σ) e o erro do valor médio (E).

Tabela 4 – Resultados.

Comprimento de onda sintético	Inclinação				Desvio padrão	Erro
	a_1	a_2	a_3	$a_{Média}$		
λ_s					σ	E
0,87 mm	11,76 °	11,78 °	11,75 °	11,76 °	0,01 °	-0,38 °
0,77 mm	11,99 °	11,43 °	11,57 °	11,66 °	0,24 °	-0,48 °
0,63 mm	12,27 °	12,28 °	11,87 °	12,14 °	0,19 °	0,00 °
0,53 mm	11,40 °	11,74 °	11,72 °	11,62 °	0,16 °	-0,52 °
0,36 mm	12,03 °	12,11 °	12,11 °	12,08 °	0,04 °	-0,06 °

Fonte: Própria autoria.

5. Considerações finais

O método proposto mostrou-se adequado para medir o comprimento de onda sintético de arranjos de interferometria speckle. Com os comprimentos de onda sintéticos calculados pela Eq. (4) foi possível realizar todos os passos descritos por Barbosa e Lino (2007) para se obter a reconstrução das frentes de onda. O método foi aplicado em cinco configurações distintas de emissão do laser

Tendências, Expectativas e Possibilidades no Cenário Contemporâneo em Educação Profissional e Sistemas Produtivos.

e os erros e desvios encontrados foram menores que a incerteza de medição estimada no item 3.7.

Tendências, Expectativas e Possibilidades no Cenário Contemporâneo em Educação Profissional e Sistemas Produtivos.**Referências**

JACQUOT, Pierre. *Speckle interferometry: a review of the principal methods in use for experimental mechanics applications*. Strain, v. 44, n. 1, p. 57-69, 2008.

FERCHER, A.F., HU, H.Z., VRY, U. *Rough surface interferometry with a two-wavelength heterodyne speckle interferometer*. Applied optics, v. 24, n. 14, p. 2181-2188, 1985.

BARBOSA, E.A., LINO, A.C.L. *Multiwavelength electronic speckle pattern interferometry for surface shape measurement*. Applied optics, v. 46, n. 14, p. 2624-2631, 2007.

BARBOSA, E.A., DOS SANTOS, S.C. *Refractive and geometric lens characterization through multi-wavelength digital speckle pattern interferometry*. Optics Communications, v. 281, n. 5, p. 1022-1029, 2008.

BARBOSA, E.A., DA SILVA, D.M., LIMA, F.G. *Progressive Power Lenses (PPL) Characterization with Multi-Wavelength Speckle Interferometry*. Latin America Optics and Photonics Conference. Optical Society of America, 2012. p. LS3C.2, 2012.

DA SILVA, Danilo Mariano. *Interferometria speckle com lasers de diodo multimodo para análise de materiais e dispositivos*. 2011. 74 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2011.

DA SILVA, D.M., BARBOSA, E.A., WETTER, N.U. *Real-time contour fringes obtained with a variable synthetic wavelength from a single diode laser*. Applied Physics B, v. 118, n. 1, p. 159-166, 2015.

TAYLOR, J.R. *An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements*, 2nd ed. Sausalito: University Science Books, 1997. 327 p.