

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

**Utilização da metrologia óptica para medição de placas
automotivas**

M. C. Henrique¹, Luiz F. G. Dib², E. A. Barbosa³, V. N. Meneses⁴, C. da Costa⁵

Resumo – Os métodos ópticos são bastante utilizados para medir relevo de superfícies por meio de projeção de padrões de franjas de interferência. A luz estruturada como meio de medição proporciona uma série de vantagens, principalmente na medição de grandezas no processo de fabricação, aumentando as possibilidades de inspeção e controle de qualidade com total ausência de contato entre o objeto e o sistema de medição. O objetivo deste artigo é apresentar uma técnica de medição de contorno de superfícies sub milimétricas por meio de um arranjo óptico, utilizando o interferômetro de *Michelson*, para medição do relevo de amostras plásticas milimétricas de painel automotivo. A técnica utilizada demonstra que o método proposto é viável e corrobora para que a técnica seja utilizada em larga escala nos processos de fabricação.

Palavras-chave: Luz estruturada, Projeção de franjas, Perfilometria.

Abstract - Optical methods are widely used to measure surface relief by projecting interference fringe patterns. Structured light as a means of measurement provides several advantages, particularly in measuring quantities in the manufacturing process, increasing the possibilities for inspection and quality control with no contact between the object and the measuring system. The objective of this paper is to present a technique for measuring sub-millimeter surface contour by means of an optical arrangement using the Michelson interferometer to measure the relief of automotive panel millimeter plastic samples. The technique used demonstrates that the proposed method is viable and corroborates that the technique is used on a large scale in manufacturing processes.

Keywords: Structured light, Fringe projection, Perfilometry

1. Introdução

Com o avanço crescente dos sistemas computacionais e com o aumento da velocidade de processamento de imagens, a medida do relevo de superfícies por métodos ópticos, também chamada perfilometria óptica, encontra uma série de aplicações em vários setores da indústria (BARBOSA, et al., 2018).

¹ Unidade de Pós-Graduação, Extensão e Pesquisa, CEETEPS, São Paulo, marlene.c.henrique@gmail.com 1

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, ebarbosa@fatecsp.br

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

As amostras plásticas milimétricas medidas neste experimento foram produzidas de duas maneiras: processo a laser e processo por ataque químico, conforme mostra a Figura 3 (SANTOS, 2018).

As técnicas de *four stepping* (CREATH, 1988) e *phase unwrapping* (LANGLEY, et al., 2010) foram utilizadas para a análise quantitativa das imagens coletadas. Para o tratamento das imagens, utilizaram-se dois softwares: *ImageJ* e *Rising Sun Moiré*.

Para a varredura e captura de imagens deste experimento utilizaram-se: um interferômetro de *Michelson*, uma câmera de vídeo *charge-coupled device* (CCD) e uma interface de captura de imagem para que os interferogramas pudessem ser tratados por softwares de computador (*ImageJ* e *Rising Sun Moiré*), e dessa maneira os contornos das amostras texturizadas por processo a laser e químico pudessem ser reconstruídos.

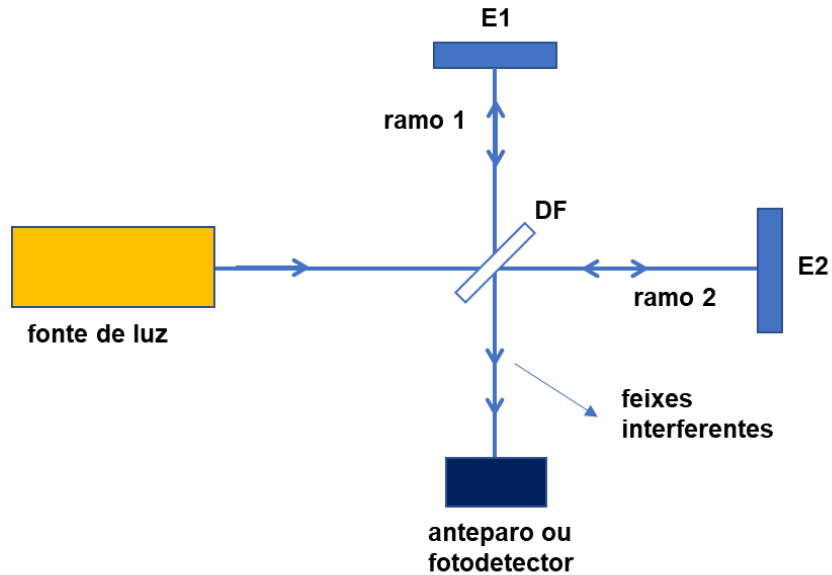
Este artigo tem o objetivo de apresentar um método óptico automatizado para medição de relevo de superfícies milimétricas de geometria simples, por projeção de padrões de franjas de interferência utilizando o interferômetro de *Michelson* e propõe uma técnica para leitura de superfícies sub milimétricas.

2. Referencial Teórico

Entre os métodos ópticos, a projeção de padrões luminosos de franjas geometricamente bem determinados sobre objetos – a chamada luz estruturada –, tem-se apresentado ao longo dos anos como uma ferramenta poderosa no campo da metrologia tridimensional 3D de superfícies (GENG, 2011).

O interferômetro de *Michelson*, apresentado na Figura 1 consiste de dois espelhos e um divisor de feixes. Quando a luz incide sobre o divisor de feixes (DF) faz com que cerca da metade da potência da luz incidente seja refletida e desviada de 90°, enquanto a outra metade é transmitida. A parte refletida do feixe atinge o espelho E1, enquanto que a componente transmitida atinge o espelho E2. Ambos os feixes voltam a se combinar no DF e o resultado da interferência dos feixes, refletido e transmitido após o DF, pode ser observado no anteparo ou medido por um fotodetector. No momento em que os feixes se recombinam formam um padrão de interferência e geram franjas que incidem sobre o objeto estudado (MONCHALIN, et al., 1981).

Figura 1 – Representação do interferômetro de *Michelson*

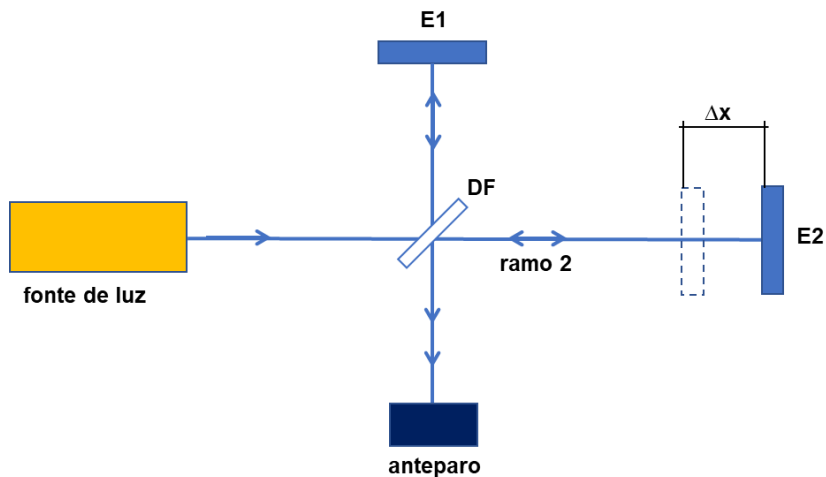


Fonte: os autores

O padrão de franjas projetado em um anteparo depende do alinhamento dos espelhos E1 e E2 do interferômetro e da geometria da frente de onda incidente.

Para a medida de pequenos deslocamentos, acopla-se um dos espelhos da montagem, por exemplo o espelho E2, ao objeto cujo o deslocamento deseja-se medir e quando o objeto é deslocado de Δx , o espelho E2 sofre o mesmo deslocamento como mostra a Figura 2.

Figura 2 - Medida de deslocamentos pelo interferômetro de *Michelson*



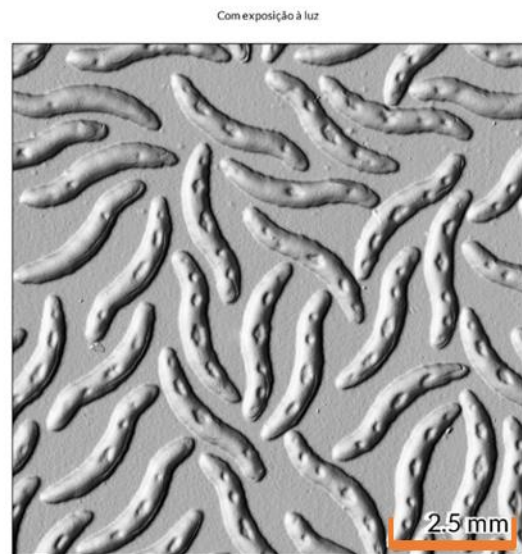
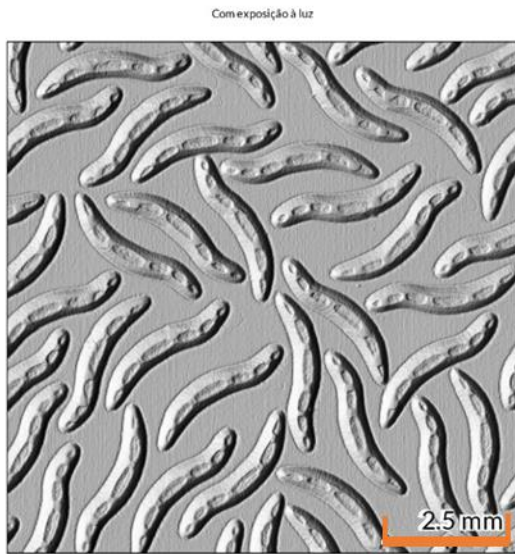
Fonte: os autores

A Figura 3 apresenta as amostras plásticas texturizadas por processo a laser e químico a serem medidas neste experimento.

Figura 3 - Amostra de painel automotivo do experimento: a) processo a laser b) processo químico

a) Processo de texturização a laser

b) Processo de texturização por ataque químico

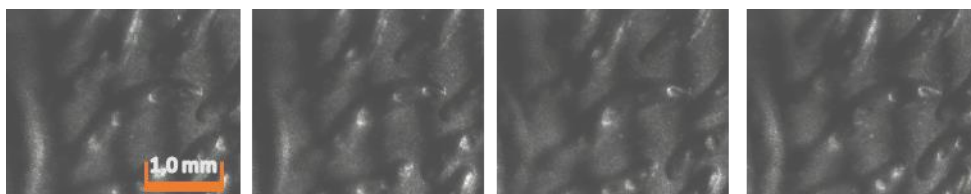


Fonte: Edney Santos

3. Método

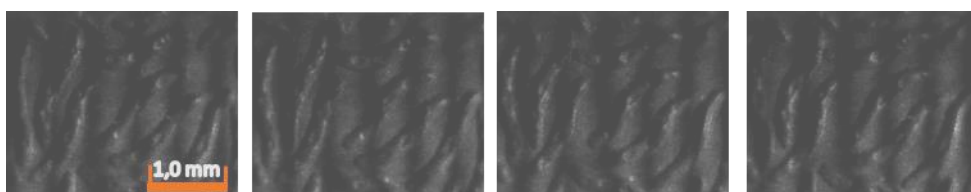
Para aplicar a técnica de *four stepping* houve a necessidade de capturar quatro imagens para cada placa texturizada do processo a laser e do processo por ataque químico. O software *ImageJ* processou as imagens e apresentamos os resultados nas Figura 4 e Figura 5.

Figura 4 - Quatro imagens capturadas (defasadas de $\pi/2$) da amostra texturizada a laser



Fonte: os autores

Figura 5 - Quatro imagens capturadas (defasadas de $\pi/2$) da amostra texturizada por processo químico



Fonte: os autores

A técnica de *four stepping* baseia-se na mudança de intensidade devido a uma diferença de fase, de $\pi/2$, provocada em um dos feixes na montagem experimental, como mostra a Figura 2, onde o espelho E2 mais o objeto do experimento, se deslocam gradativamente.

Inicia-se um avanço de fase no feixe referência na sequência $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ rad, e cada avanço gera interferogramas de intensidade I_0, I_1, I_2 e I_3 (BARBOSA, et al., 2007).

As equações Eq. (1), (2), (3) e (4) demonstram as intensidades em função de cada deslocamento de fase com uma defasagem entre eles de $\pi/2$:

$$I_0 = \cos^2\left(\frac{\emptyset}{2}\right) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\cos(\emptyset) \quad \text{Eq. (01)}$$

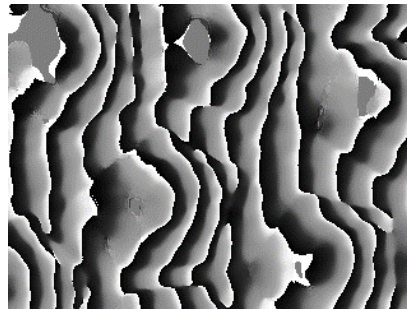
$$I_1 = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\cos\left(\emptyset + \frac{\pi}{2}\right) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2}\text{sen}(\emptyset) \quad \text{Eq. (02)}$$

$$I_2 = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\cos(\emptyset + \pi) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2}\cos(\emptyset) \quad \text{Eq. (03)}$$

$$I_3 = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\cos\left(\emptyset + \frac{3\pi}{2}\right) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\text{sen}(\emptyset) \quad \text{Eq. (04)}$$

As imagens ou interferogramas gerados pelo *software ImageJ* estão prontas para que se gere o mapa de fase como mostra a Figura 6 . E este processamento é feito pelo *software Rising Sun Moiré*.

Figura 6 - Mapa de fase calculado a partir dos quatro interferogramas



Fonte: os autores

Apenas o mapa de fase empacotado não é suficiente para reconstruir as frentes de onda ou a topografia do objeto analisado.

Para a reconstrução da frente de onda utiliza-se a técnica de *phase unwrapping* ou desempacotamento de fase. Esta técnica faz uma varredura no mapa de fase a procura dos pontos críticos da função arco tangente em que a fase passa de $-\pi$ (preto) para π (branco) ou vice-versa. Judge (1994) analisou diversos algoritmos de *phase unwrapping*.

Utilizando-se a técnica de *phase unwrapping*, a fase pode ser então reconstruída por meio da Eq. (05).

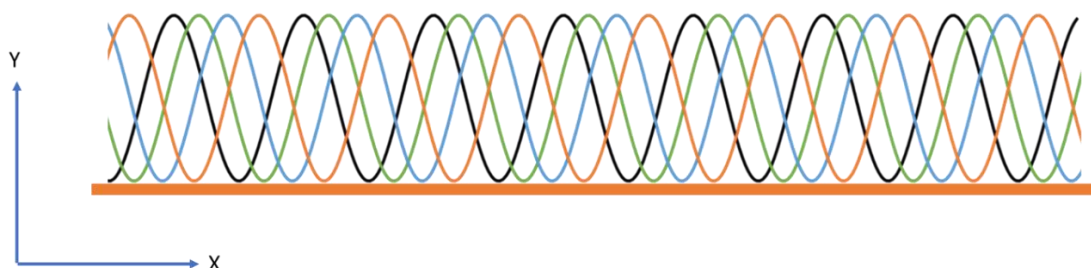
$$\emptyset = \arctan\left(\frac{I_3 - I_1}{I_0 - I_2}\right) \quad \text{Eq. (05)}$$

Assim a Eq. (05) apresenta uma função do tipo arco tangente onde os valores estão restritos a faixa de $-\pi$ a π .

4. Resultados e Discussão

Ao registrarmos as quatro imagens defasadas de $\pi/2$, garante-se que toda a superfície do objeto estudado está sendo contemplada, como mostra a Figura 7.

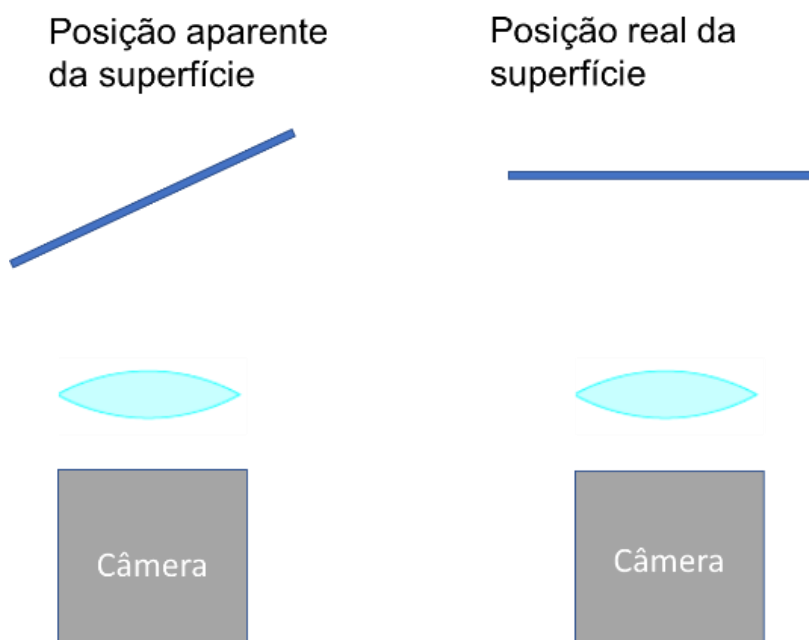
Figura 7 - Representação das quatro frente de ondas sobre a superfície estudada



Fonte: os autores

Observou-se que os métodos citados anteriormente de *four stepping* e *phase unwrapping*, ao interpretar as franjas do objeto em estudo, reproduz o plano como se ele estivesse inclinado em relação à câmera CCD (posição aparente da superfície) conforme mostra a Figura 8.

Figura 8 - Geração do plano inclinado em relação à câmera pelos métodos *four-stepping* e *phase unwrapping*

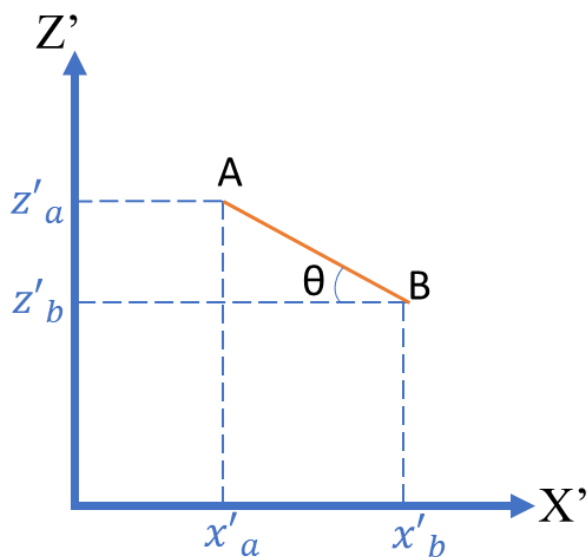


Fonte: os autores

Desta forma, deve-se utilizar um procedimento para corrigir a orientação da imagem em relação à referência da câmera CCD.

A imagem obtida por meio do método *phase unwrapping* deve sofrer uma rotação modificada, representada na Figura 9.

Figura 9 - Sistema de coordenadas $X'Z'$ com a reta \overline{AB} representando a imagem logo após o *phase unwrapping* (antes da correção)

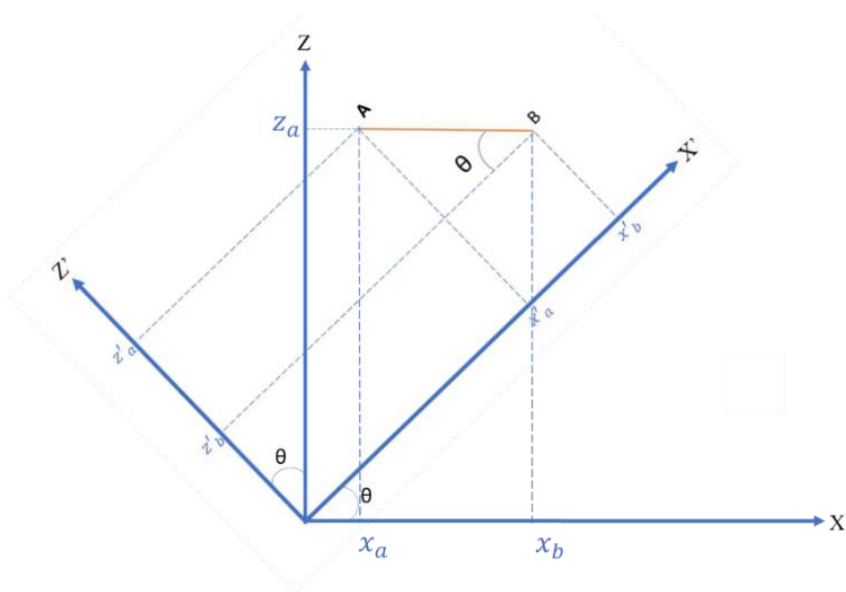


Fonte: os autores

Imaginar que a correção deva ser feita mediante uma rotação, no sentido horário, do ângulo θ representado na Figura 9.

A rotação deve acontecer do sistema de coordenadas $X'Z'$ para o sistema de coordenadas XZ , como mostra a Figura 10.

Figura 10 - Rotação do sistema de coordenadas $x'z'$



Fonte: os autores

As coordenadas (x_p, z_p) e (x'_p, z'_p) relacionam-se de acordo com o sistema:

$$\begin{cases} x_p = x'_p \cos\theta - z'_p \sin\theta & \text{Eq. (06)} \\ z_p = x'_p \sin\theta + z'_p \cos\theta & \text{Eq. (07)} \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} x_p \\ z_p \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_p \\ z'_p \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (08)}$$

Onde Z e Z' são as cotas de altura da imagem para uma dada coordenada X ou X'. Para o exemplo deste experimento, X'Z' representam o sistema de coordenadas antes da correção e X,Z representam o sistema de coordenadas depois da correção.

No sistema de coordenadas X'Z' da Figura 10, vemos que z'_a e x'_a relacionam-se na forma:

$$z'_a = -tg\theta x'_a + x'_0 tg\theta \quad \text{Eq. (09)}$$

Da mesma maneira, vemos que z'_b e x'_b relacionam-se na forma:

$$z'_b = -tg\theta x'_b + x'_0 tg\theta \quad \text{Eq. (10)}$$

Onde x'_0 é o ponto de cruzamento do eixo X' com a reta AB. Assim, para o ponto A, a Eq. (07) combinada com a Eq. (09) pode ser escrita como:

$$z_a = x'_a \sin\theta + (-tg\theta x'_a + x'_0 tg\theta) \cos\theta \quad \text{Eq. (11)}$$

$$z_a = x'_a \sin\theta - tg\theta x'_a \cos\theta + x'_0 tg\theta \cos\theta \quad \text{Eq. (12)}$$

$$z_a = x'_a \sin\theta - x'_a \sin\theta + x'_0 \sin\theta \quad \text{Eq. (13)}$$

$$z_a = x'_0 \sin\theta \quad \text{Eq. (14)}$$

Da mesma maneira a Eq. (07) combinada com a Eq. (09) pode ser escrita para o ponto B como:

$$z_b = x'_b \sin\theta + (-tg\theta x'_b + x'_0 tg\theta) \cos\theta \quad \text{Eq. (15)}$$

$$z_b = x'_b \sin\theta - tg\theta x'_b \cos\theta + x'_0 tg\theta \cos\theta \quad \text{Eq. (16)}$$

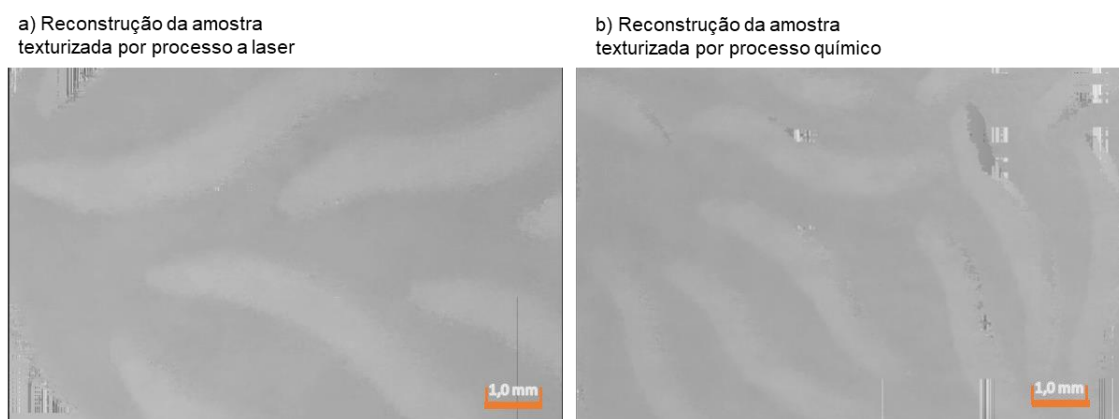
$$z_b = x'_b \sin\theta - x'_b \sin\theta + x'_0 \sin\theta \quad \text{Eq. (17)}$$

$$z_b = x'_0 \sin\theta \quad \text{Eq. (18)}$$

Como esperado, comparando as Eq. (14) e Eq. (18), tem-se que $z_a = z_b$ e no sistema de coordenadas XZ corrigido, o segmento fica na horizontal, conforme a Figura 10.

Após aplicar o procedimento para corrigir a orientação da imagem em relação à referência da câmera CCD, como resultado, apresenta-se a reconstrução dos contornos das duas amostras plásticas texturizadas por processo a laser e por ataque químico como mostra a Figura 11.

Figura 11 – Reconstrução dos relevos das amostras plásticas texturizadas por processo a laser e por processo químico



Fonte: os autores

5. Considerações finais

Neste artigo apresentou-se um método óptico automatizado para medição de relevo de superfícies sub milimétricas de geometria simples, por projeção de padrões de franjas de interferência utilizando o interferômetro de *Michelson*. As técnicas de *four stepping* e *phase unwrapping* utilizadas para a medição das superfícies plásticas texturizadas por processo a laser e químico apresentaram um resultado aceitável. Usualmente não se aplica esta técnica de projeção de franjas para leitura de superfícies com relevos sub milimétricos. Foi possível aplicar o procedimento para corrigir a orientação da imagem em relação à referência da câmera CCD e esta correção permitiu a reconstrução do relevo das amostras texturizadas pelos processos a laser e químico. Ao comparar as imagens a e b da Figura 11 constatou-se que a técnica aplicada foi capaz de reproduzir os contornos milimétricos das superfícies estudadas.

Referências

BARBOSA, E. A. e HENRIQUE, M. C. *Medida de relevo de superfícies por projeção de padrões de franjas de interferência: teoria e simulações*. Anais XII Workshop de Pós-Graduação e pesquisa do Centro Paula Souza. [Online] 2018. [Citado em: 24 de 08 de 2019.] http://www.portal.cps.sp.gov.br/pos-graduacao/workshop-de-pos-graduacao-e-pesquisa/013-workshop-2018/artigos/SistemasProdutivos/Tecnologia_Materiais/Medida_de_relevo_de_su perficies_por_projecao_de_padroes_de_franjas_de_interferencia.pdf.

BARBOSA, E. A. e LINO, A. C. L. *Multiwavelength electronic speckle pattern interferometry for surface shape measurement*. Applied Optics, 2007, Vol. 46, 14, pp. 2624-2631, 2007.

CREATH, K. *Phase-measurement interferometry techniques*. Prog. Opt. 26:349. 1988.

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

JUDGE, T. R. e BRYANSTON-CROSS, P. J. *A review of phase unwrapping techniques in fringe analysis*. Optics and Lasers in Engineering, 1994, Vol. 21, 4, pp. 199-239, 1994.

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

MONCHALIN, J. -P., et al. *Accurate laser wavelength measurement with a precision two-beam scanning Michelson interferometer*. Applied Optics, 1981, Vol. 20, 5, pp. 736-757, 1981.

SANTOS, E. E. dos. *A Aplicação da Biomimética no Desenvolvimento de Texturas Automotivas pelo Design de Color & Trim*. Dissertação (Mestrado em Gestão e Tecnologia em sistemas Produtivos) - CPS. São Paulo : s.n., 2018.