

MEDIÇÃO DE VIBRAÇÕES POR ANÁLISE DE VISIBILIDADE DE LUZ ESTRUTURADA: INSPEÇÃO VISUAL

Felipe Cazzarini Ohqui¹, Eduardo Acedo Barbosa^{1,2}

¹ Departamento de Física, Centro Universitário da FEI

² Departamento de Ensino Geral, Faculdade de Tecnologia de São Paulo

e-mail felipeohqui@gmail.com e ebarbosa@fei.edu.br

Resumo: Neste trabalho, estudou-se projeção oblíqua de luz estruturada na forma de um padrão senoidal de franjas para a análise de vibrações fora-do-plano de superfícies. Pela modelagem teórica, mostrou-se que a visibilidade do padrão de franjas é a função de Bessel da amplitude de vibração e que esta propriedade do padrão de franjas permite uma análise qualitativa da vibração e uma estimativa semi-quantitativa da distribuição de amplitudes de vibração.

1. Introdução

Análises de amplitudes de vibração são muito importantes para a engenharia, em áreas de manutenção preditiva e preventiva, de controle de qualidade, entre muitas outras.

A projeção de luz estruturada vem sendo largamente utilizada em medidas de relevo de superfícies, com aplicações em odontologia, medicina, engenharia reversa, restauração histórica e segurança, especificamente em reconhecimento facial. Neste trabalho, realizou-se a análise teórica do comportamento da luz estruturada – uma padrão senoidal de franjas – obliquamente incidente sobre um objeto vibratório, e, na parte experimental, coletaram-se imagens de padrões de franjas de baixa visibilidade e realizaram-se estimativas da distribuição de amplitudes de vibração a partir da análise teórica.

2. Superfície vibratória iluminada por um padrão luminoso senoidal

Considere-se uma superfície paralela ao plano xy vibrando harmonicamente ao longo do eixo z com frequência ω e amplitude a , iluminada por um padrão senoidal de franjas, mostrado na forma de setas na figura 1. As franjas são observadas ao longo de z . Sendo θ o ângulo de incidência, as franjas projetadas na superfície têm um deslocamento máximo lateral $\Delta x_{\max}(t) = a \tan \theta$. Assim, uma franja ou grupo de franjas oscila de acordo com a relação $x(t) = a \tan \theta \cos(\omega t)$. Desta forma, o padrão luminoso projetado será dado por [1]

$$I_1(x, t) = \frac{I_0}{2} + \frac{I_0}{2} \cos \left[\frac{2\pi}{d} \cos \theta x + \frac{2\pi}{d} \sin \theta \cdot a \cdot \sin(\omega t + \phi_{ob}) \right] \quad (1)$$

onde d é a distância entre duas franjas vizinhas, I_0 é a intensidade luminosa máxima e ϕ_{ob} é uma fase

arbitrária de vibração do objeto. Se a frequência de vibração é significativamente mais alta do que o tempo de aquisição da imagem, a intensidade da luz projetada será obtida fazendo-se uma média de $I_1(x, t)$ no intervalo de tempo de um período de vibração [1]:

$$I_2(x) = \frac{I_0}{2} + \frac{I_0}{2} J_0[\delta_{ob}(x)] \cos \left(\frac{2\pi}{d} \cos \theta x \right), \quad (2)$$

Onde J_0 é a função de Bessel de ordem zero de primeiro tipo [2] e $\delta_{ob} \equiv 2\pi a \sin \theta / d$. Na eq. (2), fez-se, por conveniência, $\phi_{ob} = 0$. Nota-se pela eq. (2) que a função de Bessel faz o papel de contraste, ou visibilidade, do padrão projetado, e que esta visibilidade depende explicitamente da amplitude de vibração da superfície. O gráfico da função de Bessel em função da fase δ_{ob} da figura 1 permite identificar a influência da amplitude de vibração sobre a visibilidade do padrão luminoso.

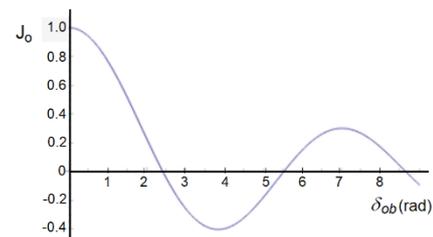


Figura 1 – função de Bessel de ordem zero

Nota-se pela figura 1 que, para $\delta_{ob} = 0$, com a superfície sem vibrar, a visibilidade é máxima, ou seja, o padrão tem máximo contraste, como esperado. Se o corpo vibra, então $\delta_{ob} > 0$, e de acordo com o comportamento da função de Bessel, a visibilidade do padrão de franjas decresce até ser completamente nula para o valor $\delta_{ob} = 2,4$ rad, a primeira raiz de J_0 . Neste caso, as franjas aparecerem indistinguíveis, totalmente borradas. Um efeito interessante ocorre para amplitudes de vibração ainda maiores, que geram valores $\delta_{ob} > 2,4$ rad. Nesta faixa de valores, a visibilidade torna-se não nula, mas negativa, o que gera uma mudança na fase do padrão luminoso, ou seja, nessa região as franjas escuras ocupam o lugar das claras, e vice-versa. Com o aumento da amplitude de vibração, a visibilidade torna-se novamente nula para $\delta_{ob} = 5,5$ rad, e para $\delta_{ob} > 5,5$ rad, a visibilidade é novamente positiva, mas com franjas menos distinguíveis, se comparadas ao trecho $0 < \delta_{ob} < 2,4$ rad. Quando $\delta_{ob} = 8,6$ rad, as franjas voltam a ficar totalmente borradas. Estas informações fornecem subsídios para a inspeção visual, semi-

quantitativa do padrão de franjas e da distribuição de amplitudes de vibração.

3. Montagem experimental e resultados

O arranjo óptico utilizado está mostrado na figura 2, e consiste de um projetor PR que gera franjas e as faz incidir sobre uma placa de acrílico branco e opaco de 150 mm x 120 mm presa em uma de suas extremidades por uma morsa. A placa de acrílico é excitada por um *shaker* (Pasco, modelo SF 9324) na extremidade oposta, movido pelo um gerador de funções GF com o auxílio de um amplificador.

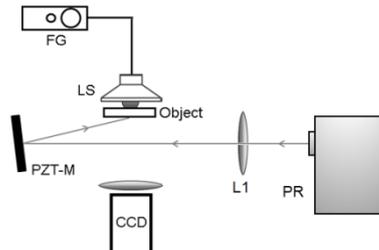
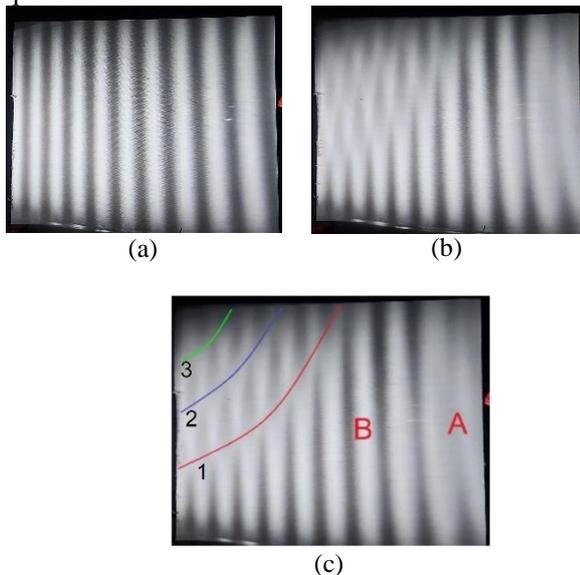


Figura 2 – Montagem óptica

O projetor PR consiste de uma fonte de luz LED, uma lente projetora L1, que ilumina uma máscara com o padrão de franjas impresso em acetato, e uma segunda lente L2, que forma a imagem do padrão no acetato sobre o corpo analisado. A imagem da placa vibratória é coletada por uma câmera CCD. No caso, utilizaram-se câmeras de telefone celular.

A figura 3a mostra a placa estática, não excitada, iluminada pelo padrão de franjas verticais. A figura 3b mostra a mesma placa quando excitada pelo *shaker* vibrando a 48 Hz. A figura 3c repete a figura 3b, destacando as regiões de interesse para análise semi-quantitativa.



Nota-se pela figura 3c que a região A à direita apresenta franjas de menor visibilidade do que na figura 3a. Ou seja, na região A ocorre vibração, com amplitude tanto maior quanto menor for o contraste das franjas. Na região B nota-se que a visibilidade das franjas

praticamente não se alterou, em comparação com a fig. 3a. Desta forma, conclui-se que na região B não há vibração, ou as amplitudes de vibração são as mais baixas da placa.

Para a análise das linhas coloridas 1, 2 e 3 deve-se levar em conta que a visibilidade ao longo delas é nula, e que a amplitude de vibração pode ser determinada através da fase, como

$$a = \delta_{ob} \cdot d / 2\pi \sin\theta \quad (3)$$

Sendo o ângulo de incidência $\theta = 70^\circ$ e $d = 5$ mm, tem-se $a = 0,85\delta_{ob}$ (mm). Desta forma, na região da linha vermelha 1, que é adjacente à região B, corresponde à primeira raiz da função de Bessel, $\delta_{ob1} = 2,4$ rad, o que leva à conclusão de que a amplitude a_1 ao longo dessa linha é $a_1 = 0,85 \cdot 2,4 = 2,0$ mm. A região da linha azul 2, adjacente à linha 1, corresponde à segunda raiz da função de Bessel, $\delta_{ob2} = 5,5$ rad, de modo que a amplitude de vibração nesta região é $a_2 = 0,85 \cdot 5,5 = 4,7$ mm. Ao longo da linha verde 3, adjacente à 3, a amplitude é obtida usando-se a terceira raiz da função de Bessel $\delta_{ob3} = 8,7$ rad, levando ao resultado $a_3 = 0,85 \cdot 8,7 = 7,4$ mm.

4. Conclusões

A análise semiquantitativa permite estimar com boa exatidão a distribuição de amplitudes de vibração de um objeto, com o auxílio da função de Bessel e seguindo os padrões das suas raízes. Isso pode ser realizado sem a necessidade de processamento de imagens ou outros recursos computacionais. A técnica também fornece um panorama qualitativo da vibração, apenas através da observação da visibilidade das franjas.

5. Referências

[1] M.T. Saita, L.F.G. Dib, E.A. Barbosa. Modeling of structured light projection on vibrating surfaces: Amplitude and phase mapping by fringe visibility evaluation, *Optik - International Journal for Light and Electron Optics* 258 (2022). <https://doi.org/10.1016/J.IJLEO.2022.168833>.

[2] G. B. Arfken, *Física matemática: métodos matemáticos para engenharia e física*, Elsevier (2007).

¹ Aluno de IC do Centro Universitário FEI (PIBIC -CNPq). Projeto com vigência de 08/2021 a 07/2022.