Influência da espessura de Amostras de Alumínio no Sinal Fotoacústico Medido por meio da Célula Fotoacústica Aberta

WOICEICHOWSKI, Josué[1]; SOMER, Aloisi[1];

Universidade Estadual de Ponta Grossa – Departamento de Física[1]

Palavras-Chave: Fotoacústica; Difusividade térmica; Flexão termoelástica.

Resumo

Este trabalho investiga a influência da espessura de amostras de alumínio no sinal fotoacústico medido por meio de uma Célula Fotoacústica Aberta. Foram realizadas simulações e medidas experimentais em amostras com espessuras de 128 μm, 200 μm, 294 μm, 420 μm e 505 μm. Os resultados mostraram redução da amplitude com o aumento da frequência e da espessura, além de alterações na fase associadas à transição entre difusão térmica e flexão termoelástica. O comportamento previsto nas simulações foi observado experimentalmente, confirmando a validade do modelo utilizado.

I. Introdução

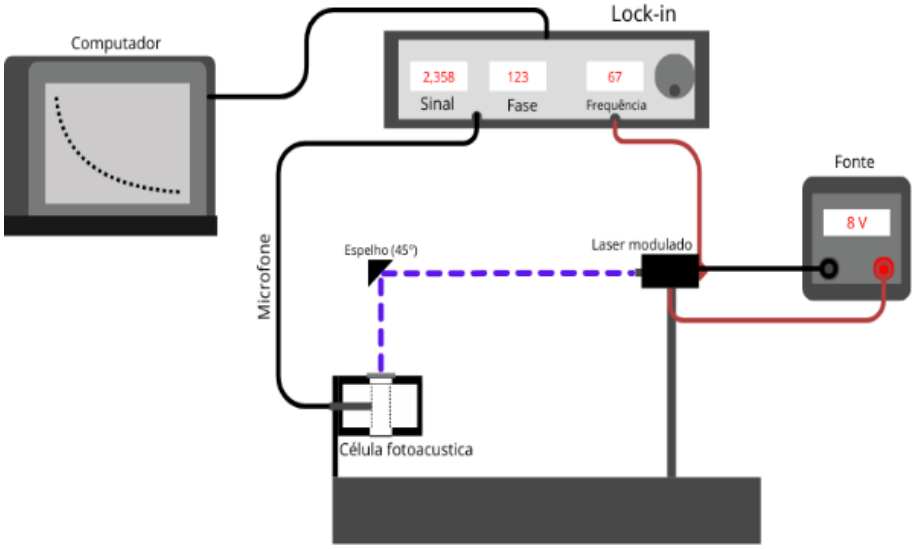
A caracterização de propriedades térmicas e ópticas de materiais é fundamental para aplicações em diversas áreas da Física e da Engenharia. Entre as técnicas utilizadas para essa finalidade, destaca-se a fotoacústica, baseada na geração de ondas de pressão decorrentes da absorção de radiação eletromagnética modulada por uma amostra (ROSENCWAIG; GERSHO, 1976). Desde os primeiros estudos envolvendo o efeito fotoacústico, a técnica passou por importantes avanços teóricos e experimentais, tornando-se uma ferramenta eficiente para a determinação de parâmetros térmicos de diferentes materiais (ROSENCWAIG; GERSHO, 1976; PERONDI; MIRANDA, 1982). Entre as diversas configurações experimentais existentes, a Célula Fotoacústica Aberta (*Open Photoacoustic Cell* – OPC) apresenta vantagens relacionadas à simplicidade de montagem, elevada sensibilidade e facilidade de operação (PERONDI; MIRANDA, 1982). Nessa configuração, a amostra é posicionada diretamente sobre o sistema de detecção, permitindo que variações térmicas e mecânicas produzidas pela incidência de luz modulada sejam convertidas em sinais acústicos mensuráveis. O comportamento desse sinal depende de diversos fatores, incluindo propriedades do material, espessura da amostra e características geométricas da

célula utilizada. Dessa forma, este trabalho busca investigar a influência do raio de abertura da célula fotoacústica sobre a resposta experimental obtida em amostras de alumínio, analisando a participação dos mecanismos de difusão térmica e flexão termoelástica na formação do sinal fotoacústico (DJORDJEVIC et al., 2022).

II. Fundamentação Teórica/Materiais e Métodos

Na Célula Fotoacústica Aberta, Figura 1, o sinal medido é proveniente de uma luz modulada que incide sobre a amostra. Conforme o material absorve essa luz, ele sofre oscilações de temperatura que criam variações de pressão detectadas pelo sistema (PERONDI; MIRANDA, 1982). Esse sinal captado junta dois efeitos principais: a difusão térmica, que vem do aquecimento do gás em contato com a amostra, e a flexão termoelástica, que é a deformação mecânica do material causada pela diferença de temperatura ao longo da sua espessura (SOMER, 2012). A geometria do sistema também dita o comportamento desse sinal, e o raio de abertura da célula é o fator principal que mexe direto na flexão termoelástica, alterando a amplitude e a fase do que é medido (DJORDJEVIC et al., 2022).

Fig. 1. Sistema fotoacústico utilizado no experimento.



Fonte: Os autores.

A difusão térmica resulta do aquecimento periódico do gás próximo à amostra, gerando variações de pressão que contribuem para o sinal fotoacústico. Sua descrição matemática é dada pela equação (1):

$$S_{TD} = C_1 \left(\frac{\sqrt{\alpha_s}}{f} \right) \frac{1}{\sinh\left(\sigma_s l_s\right)}, \tag{1}$$

com C_1 sendo a contribuição da difusão térmica dada por:

$$C_1 = \frac{\gamma P_0 I_0 \sqrt{\alpha_g}}{2\pi l_g k_s T_0}. \tag{2}$$

onde γ é a razão dos calores específicos do gás, P_0 e T_0 são a pressão e a temperatura ambiente, I_0 é a intensidade da luz, D_g é a difusividade térmica do gás, l_g é o comprimento da câmara de gás, k_s é a condutividade térmica da amostra, l_s é a sua espessura e σ_s é o coeficiente de difusão térmica complexo do sólido (PERONDI; MIRANDA, 1982). A flexão termoelástica ocorre devido à deformação da amostra causada por gradientes de temperatura, produzindo ondas acústicas detectáveis. Esse efeito é descrito por:

$$S_{TE} = \frac{C_2}{\sinh(\sigma_s l_s) f^{\frac{3}{2}}} \left[\cosh(\sigma_s l_s) - \frac{\sigma_s l_s}{2} \sinh(\sigma_s l_s) - 1 \right], \tag{3}$$

com C_2 sendo o peso da contribuição termoelástica, dado por:

$$C_2 = \frac{3\gamma P_0 l_0 \alpha_T R^4 \alpha_s^{\frac{3}{2}}}{2\sqrt{2} k_s l_g R_c^2 l_s^3 \pi^{\frac{3}{2}}}. \tag{4}$$

onde α_T representa o coeficiente de expansão térmica linear do material e R_c define o raio efetivo de abertura da célula fotoacústica e R é o raio da amostra (SOMER, 2012; SOMER, 2016).

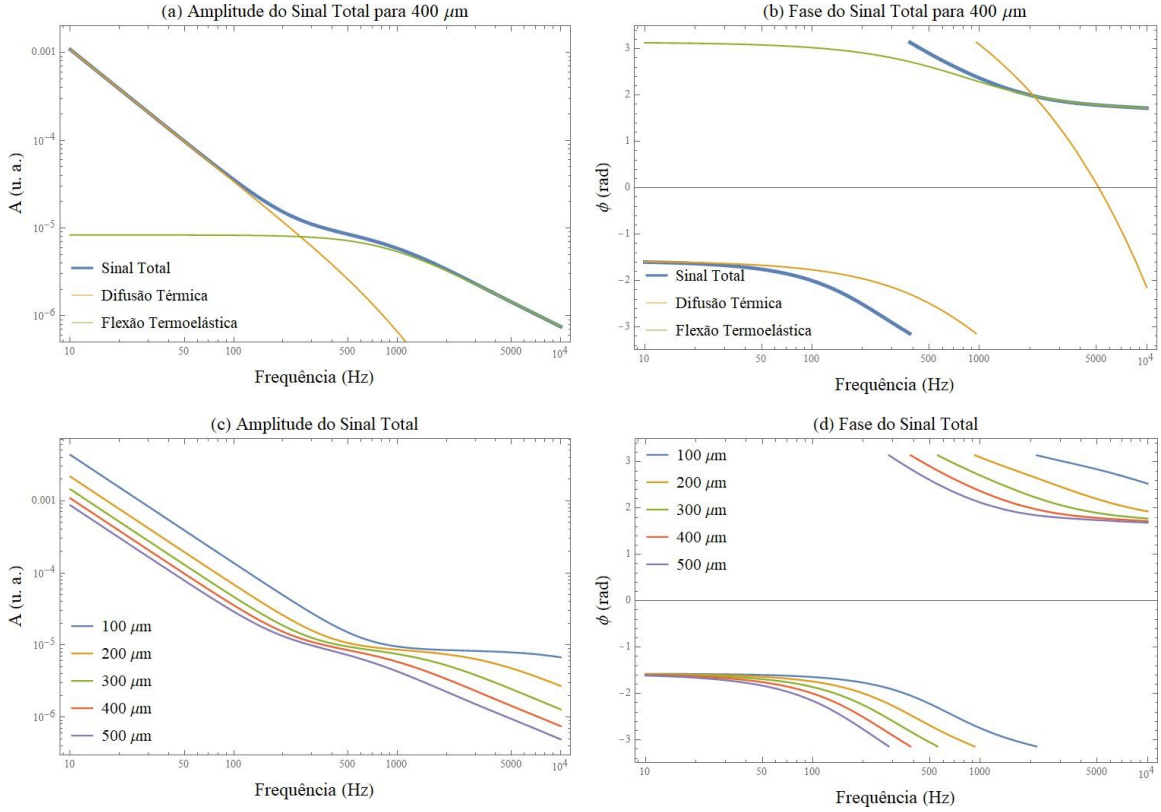
III. Resultados

A Figura 2 apresenta simulações de amplitude e fase do sinal fotoacústico para amostras de 100 μm a 500 μm. Com estas simulações, vemos que a difusão térmica e a flexão termoelástica atuam de formas diferentes no sinal fotoacústico total.

Na difusão térmica, a amplitude do sinal cai com o aumento da frequência e da espessura da amostra, fazendo também com que a fase atrase mais rápido em materiais espessos. Por outro lado, a flexão termoelástica mantém a amplitude estável em frequências baixas antes de cair, e sua intensidade é menor em amostras espessas, o que também antecipa a transição de fase do sinal. A junção desses dois efeitos gera o sinal fotoacústico total, onde a difusão térmica domina em baixas frequências e a flexão termoelástica assume o controle em frequências mais altas, criando uma região intermediária onde os dois fenômenos acontecem ao mesmo tempo.

Para validar os modelos de difusão térmica e flexão termoelástica, foram realizadas medições fotoacústicas em amostras de alumínio com espessuras de 128 μm, 200 μm, 294

Fig. 2. Simulações da amplitude e da fase do sinal fotoacústico em função da frequência para alumínio.

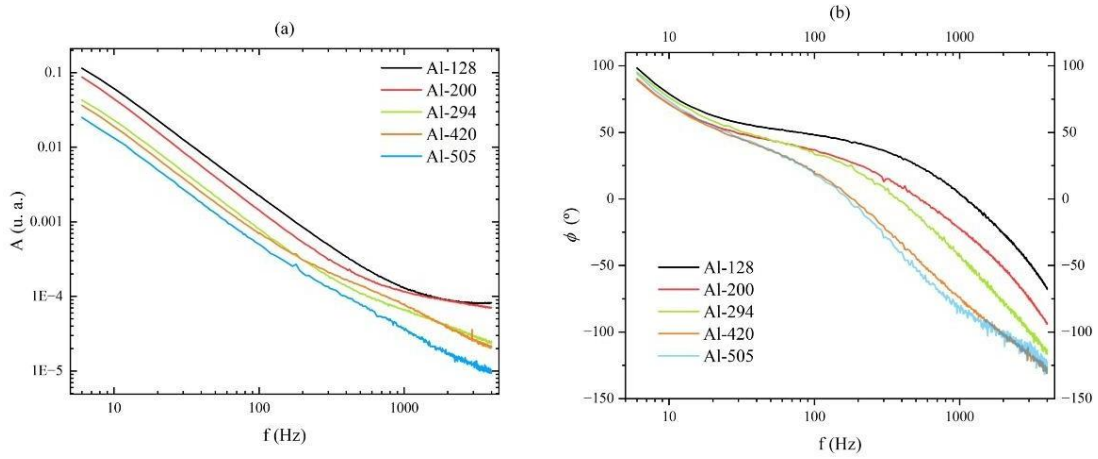


Fonte: Os autores.

μm, 420 μm e 505 μm. As simulações iniciais já previam que o aumento da espessura deslocaria as frequências características do sistema para valores menores, alterando diretamente a resposta do sinal (SOMER, 2012; SOMER, 2016).

Os resultados experimentais de amplitude confirmam a tendência prevista pelas simulações, indicando redução do sinal com o aumento da frequência e da espessura da amostra. Esse comportamento está associado à maior atenuação da onda térmica no interior do alumínio, o que diminui a contribuição da difusão térmica para amostras mais espessas. Na análise da fase, observa-se que as amostras de maior espessura apresentam transições mais acentuadas em frequências menores, evidenciando a mudança gradual entre os regimes dominados pela difusão térmica e pela flexão termoelástica. Nesse conjunto de resultados, a amostra de 420 μm apresentou comportamento intermediário, permitindo identificar com maior clareza a região de transição entre os dois mecanismos. Assim, os dados reforçam que a espessura da amostra influencia diretamente a resposta fotoacústica, modificando tanto a intensidade do sinal quanto o comportamento de fase medido na célula fotoacústica aberta.

Fig. 3. Resultados experimentais da amplitude e da fase do sinal fotoacústico em função da frequência para amostras de alumínio.



Fonte: Os autores.

IV. Conclusões

As simulações e as medidas experimentais confirmaram a influência da espessura das amostras de alumínio no sinal fotoacústico medido por meio da célula fotoacústica aberta. O comportamento previsto teoricamente foi observado experimentalmente, especialmente na redução da amplitude com o aumento da frequência e da espessura, bem como nas alterações da fase associadas à transição entre os mecanismos de difusão térmica e flexão termoelástica. Dessa forma, os resultados indicam que o modelo utilizado descreve de maneira satisfatória a resposta fotoacústica das amostras analisadas. Além disso, a concordância entre simulação e experimento reforça a importância da análise conjunta de amplitude e fase para identificar os regimes dominantes do sinal e compreender o papel da espessura na resposta térmica e mecânica do material.

Agradecimentos

Agradeço ao Grupo de Propriedades Eletrônicas e Vibracionais em Materiais (GPEViM) da UEPG pela estrutura e à Fundação Araucária/PIBIC pelo fomento.

Referências

DJORDJEVIC, K. et al. Si plate radius influence on the photoacoustic signal. **Journal of Applied Physics**, v. 132, n. 8, 2022.

PERONDI, L. F.; MIRANDA, L. C. M. Theoretical aspects of the photoacoustic signal generation. **Journal of Applied Physics**, v. 52, n. 5, 1982.

ROSENCWAIG, A.; GERSHO, A. Theory of the photoacoustic effect with solids. **Journal of Applied Physics**, v. 47, n. 1, p. 64–69, 1976.

SOMER, A. **Influência da flexão termoelástica na medida da difusividade térmica de amostras de alumínio**. Ponta Grossa: UEPG, 2012.

SOMER, A. **Efeitos de modificações estruturais sobre a difusividade térmica efetiva**. Ponta Grossa: UEPG, 2016.