

CARACTERIZAÇÃO DO REGIME TÉRMICO DE UMA AMOSTRA UTILIZANDO CÉLULA FOTOACÚSTICA ABERTA (OPC)

Iuri Rojahn da Silva¹, Paulo Roxo Barja²

^{1,2}Universidade do Vale do Paraíba / IP&D. Avenida Sishima Hifumi, 2911, Urbanova, 12244-000 São José dos Campos – SP, iuri@univap.br

Resumo - O efeito fotoacústico é obtido através do som produzido em uma câmera fechada após a absorção da luz pulsada; a amplitude do som gerado depende da condução de calor pelo material analisado. Todos os materiais podem ser classificados segundo o regime térmico apresentado. O comprimento de difusão térmica μ_s está relacionado com a difusividade térmica e a frequência de modulação, caracterizando os regimes térmicos: i) termicamente fino, quando as ondas térmicas se propagam significativamente através da amostra (μ_s maior que a espessura da amostra); e ii) termicamente espesso, as ondas térmicas são significativamente atenuadas dentro da própria amostra (μ_s menor que a espessura). Utilizando uma célula fotoacústica aberta (OPC) desenvolvida na UNIVAP, caracterizou-se o regime térmico de lâminas de alumínio, vidro, ouro e fita isolante, através de varredura de frequência efetuada entre 145Hz e 335Hz.

Palavras-chave: Fotoacústica, OPC transição regimes térmicos.

Área do Conhecimento: Engenharias

Introdução

A técnica fotoacústica permite caracterizar um material em termos de suas propriedades ópticas (absorção) e térmicas (difusividade e efusividade térmica). O efeito fotoacústico consiste na produção de som pela absorção da luz modulada. A energia luminosa modulada absorvida pela amostra se converte em calor também modulado. Segundo o modelo de pistão acústico para o mecanismo de difusão térmica (ROSENCWAIG; GERSHO, 1976), o calor modulado produzido na amostra difunde-se até o gás dentro da célula fotoacústica, onde a camada de gás mais próxima da amostra sofre expansão e contração periódicas, atuando como um pistão vibratório no restante do gás. As respectivas variações de pressão geram as ondas acústicas captadas pelo microfone acoplado à célula fotoacústica. Deste modo, o microfone detecta um sinal acústico proporcional ao calor produzido na amostra pela absorção de luz.

Em sólidos, o calor modulado produzido na amostra precisa atravessá-la e atingir sua superfície antes de gerar ondas sonoras; como a amplitude das ondas térmicas diminui exponencialmente com a distância, só a parcela de radiação absorvida a uma distância de até um comprimento de difusão térmica μ_s da superfície será responsável pela componente térmica do sinal fotoacústico.

As informações dos parâmetros térmicos de uma amostra podem ser obtidas a partir da análise da dependência do sinal fotoacústico com a frequência de modulação da radiação incidente sobre a amostra. Para classificar uma amostra

quanto ao seu regime térmico (fino ou espesso), pode-se comparar sua espessura (l) ao comprimento de difusão térmica (μ_s), que varia com a frequência de modulação da luz incidente e com a espessura do material. Quando $l > \mu_s$, a amostra é termicamente espessa, e o calor recebido não se transmite significativamente através da amostra; quando $l < \mu_s$, a amostra é termicamente fina, ocorrendo transmissão de calor através da amostra.

Através de medições na célula fotoacústica, pretende-se caracterizar valores de frequência que correspondam aos regimes termicamente fino e termicamente espesso. De acordo com o modelo de Rosencwaig e Gersho (1976), conforme aumenta a frequência de modulação e o material passa do regime termicamente fino para o regime termicamente espesso, a dependência do sinal fotoacústico com a frequência é alterada de $f^{-1,0}$ para $f^{-1,5}$. O objetivo das medições de varredura de frequência apresentadas no presente trabalho é monitorar a transição entre estes dois regimes térmicos, o que permite determinar a difusividade térmica de um material, conhecendo sua espessura, ou determinar a espessura, conhecendo a difusividade térmica.

Materiais e Métodos

O experimento utilizou um sistema fotoacústico contendo lâmpada de Tungstênio halógena de 24V e 250W como fonte de luz, um modulador mecânico (Stanford Research Systems – SRS, modelo SR540), amplificador síncrono (*lock-in*, Stanford Research Systems – SRS, modelo SR530), uma lente e uma célula fotoacústica

aberta (OPC) fabricada na UNIVAP com microfone de eletreto comercial acoplado. Os dados gerados foram analisados através do software Microcal Origin®.

Para o cálculo do comprimento de difusão térmica, utilizou-se a fórmula

$$\mu_s = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f}}$$

onde μ_s é o comprimento de difusão térmica, α é o valor da difusão térmica e f a frequência. Os valores encontrados na literatura para a difusividade térmica (DOMEN et al., 1980; YAMANE et al., 1997; TAKETOSHI et al., 2001; BALDERAS-LOPEZ et al., 2002; KIM et al., 2006; OPUKU et al., 2006) são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores de difusividade térmica

Material	Difusividade térmica α (m ² /s)
Alumínio	$0,96 \cdot 10^{-4}$
Ouro	10^{-4}
Plástico	$\sim 2-3 \cdot 10^{-7}$
Vidro	$\sim 6-7 \cdot 10^{-7}$
Prata	$1,74 \cdot 10^{-4}$

Para o trabalho foi utilizada uma célula fotoacústica aberta (OPC) (MARQUEZINI et al., 1991). O esquema da OPC utilizada no trabalho é visualizado na Figura 1.

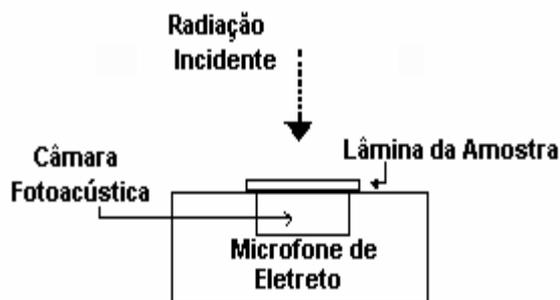


Figura 1- Corte transversal da célula OPC. A radiação modulada incide sobre a superfície externa da amostra.

Os materiais com suas espessuras utilizadas para construir as amostras foram lâminas de alumínio (30 μ m), vidro (3mm), ouro (30 μ m) e fita isolante (150 μ m). Para obtenção dos dados, foi realizada uma varredura de frequência entre 145Hz e 335Hz, com intervalo de 10Hz entre pontos sucessivos, totalizando 20 medições, para cada material.

Após a realização das medidas, foi construído para cada amostra o gráfico logarítmico da amplitude do sinal em função da frequência e efetuado o ajuste linear correspondente. A inclinação da reta corresponde à dependência do sinal com a frequência e permite determinar o respectivo regime térmico.

Resultados

As Figuras 2, 3, 4 e 5 mostram os resultados obtidos nas varreduras de frequência para valores maiores que 150Hz. O regime térmico de cada amostra é determinado pela inclinação da reta.

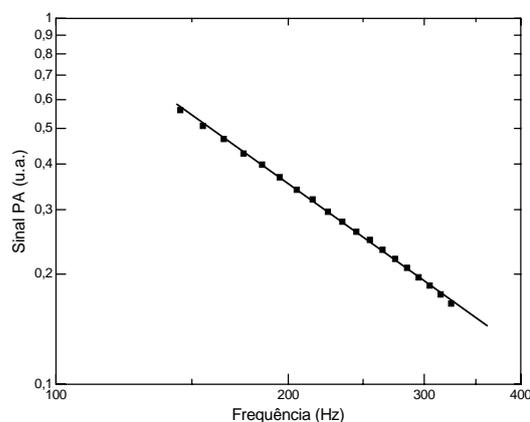


Figura 2- Amplitude do sinal fotoacústico para amostra de alumínio.

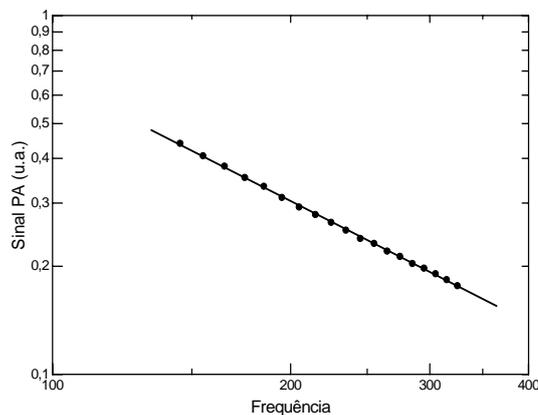


Figura 3- Amplitude do sinal fotoacústico para amostra de vidro.

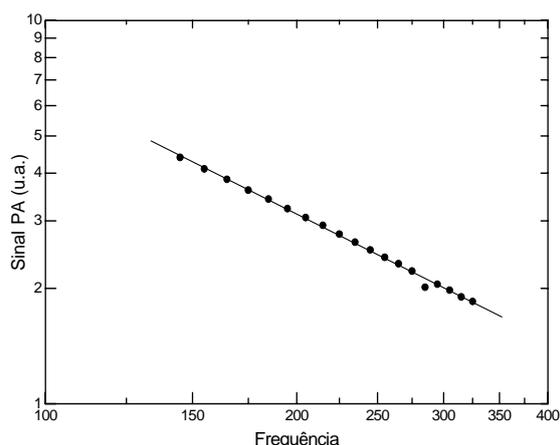


Figura 4- Amplitude do sinal fotoacústico para a lâmina de fita isolante.

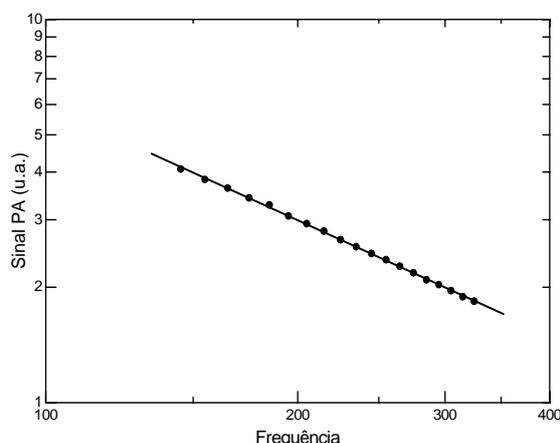


Figura 5- Amplitude do sinal fotoacústico para a amostra de fita isolante com o ouro.

A Tabela 2 mostra os valores de comprimento de difusão calculados para a frequência inicial e final de varredura, a espessura de cada amostra e o regime térmico esperado.

Tabela 2- Comprimento de difusão ($f=140\text{Hz}$ e $f=335\text{Hz}$), espessura (E) e regime térmico das amostras

Amostra	μs (μm , 140Hz)	μs (μm , 335Hz)	E (μm)	Regime
Alumínio	460	300	30	Fino
Vidro	37	~ 24	3000	Esp
Ouro	480	~ 310	30	Fino
Fita	~ 66	~ 45	150	Esp

A Tabela 3 mostra a dependência do sinal com a frequência para cada amostra, obtida a partir do ajuste linear dos dados experimentais.

Tabela 3- Dependência do sinal com a frequência para cada amostra (valor \pm erro)

Amostra	Dependência com a frequência
Alumínio	$-1,50 \pm 0,01$
Vidro	$-1,12 \pm 0,01$
Fita	$-1,09 \pm 0,01$
Fita/Ouro	$-0,995 \pm 0,005$

Discussão

Para a amostra de alumínio, a inclinação da reta obtida pelo gráfico logarítmico (Figura 2) é de $-1,5$, o que caracteriza uma amostra em regime termicamente fino, conforme descrito na literatura para medidas realizadas utilizando-se uma célula OPC (MARCIANO et al., 2004; MARQUEZINI et al., 1991).

O ajuste dos dados para a amostra de vidro forneceu a inclinação aproximada de $-1,1$ (Tabela 3), valor próximo ao esperado ($-1,0$) para materiais transparentes com regime termicamente espesso (DOMEN et al., 1980).

A inclinação da reta de ajuste para a lâmina de fita isolante também ficou em torno de $-1,1$ (Tabela 3), enquanto os valores obtidos na literatura para materiais com regime termicamente espesso são de $-1,0$ (TAKETOSHI et al., 2001). Esta diferença entre o resultado obtido e o esperado pode ser atribuída à elasticidade da fita, que pode ter ocasionado o efeito de flexão termoelástica nesta amostra.

Para atenuar os efeitos termoelásticos, inseriu-se uma lâmina de ouro em contato com a superfície inferior da fita, servindo assim como base para esta amostra com o objetivo de impedir efeitos de vibração. Isto não altera a dependência do sinal com a frequência, uma vez que o ouro apresenta difusividade térmica cerca de 1000 vezes maior que a da fita isolante (Tabela 1). Para a amostra assim constituída, obteve-se como inclinação da reta de ajuste o valor de $-0,995$, bastante próximo do esperado teoricamente ($-1,0$).

Não foi observada transição entre os regimes térmicos para nenhuma das amostras, devido às restrições experimentais para as frequências de modulação: o microfone utilizado não possui resposta plana para frequências abaixo de 140Hz

e o modulador mecânico só apresenta estabilidade para frequências abaixo de 350Hz.

Conclusão

A célula fotoacústica aberta (OPC) permitiu a obtenção de um sinal confiável, favorecendo a correta determinação do regime térmico previsto pela relação entre o comprimento de difusão térmica e a espessura da amostra, de acordo com a literatura citada.

Atualmente, o laboratório FASBio realiza um trabalho amplo de caracterização da pele humana através da técnica fotoacústica (Projeto Fapesp JP 04/02193-1). Neste contexto, uma perspectiva a partir do presente trabalho é o estudo da difusividade térmica da pele *in vitro* e/ou *in vivo* e o desenvolvimento de um sistema fotoacústico com modulação eletrônica, o que permitirá trabalhar num intervalo de frequências mais amplo (de 0,1Hz a 10KHz, por exemplo) e, desta forma, estudar de modo mais efetivo a transição do regime termicamente fino para o termicamente espesso.

Agradecimentos

P.R.B. agradece à Fapesp pelo apoio concedido (Projeto JP 04/02193-1).

Referências

- BALDERAS-LOPEZ, J.A; MANDELIS, A; GARCIA, J.A. Normalized photoacoustic techniques for thermal diffusivity measurements of buried layers in multilayered systems. **Journal of Applied Physics**. n.92, n.6, p.3047-3055, 2002.

- DOMEN, S.R. Thermal diffusivity, specific heat, and thermal conductivity of A-150 plastic (tissue-equivalent). **Phys. Med. Biol.** n.25, p.93-102, 1980.

- KIM, S.W; KIM, J.C; LEE, S.H. Analysis of thermal diffusivity by parameter estimation in converging thermal-wave technique. **Int. J. Heat Mass Transfer**. n.49, p. 611-616, 2006.

- MARCIANO, F.R; BARJA, P.R; ACOSTA – AVALOS, BELOTO, A.F; SILVA, M.D. Medição da efusividade térmica de líquidos através da técnica fotoacústica utilizando uma célula aberta (opc). **VIII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica**. p, 59-62, 2004.

- MARQUEZINI, M. V; CELLA, N; MANSANARES, A.M; VARGAS H; AND MIRANDA, L. C. M. Open photoacoustic cell spectroscopy. **Meas. Sci. Technol**. n.2, p. 396-401, 1991.

- OPUKU, A; TABIL, L.G; CRERAR, B; SHAW, M.D. Thermal conductivity and thermal diffusivity of timothy hay. **Can. Biosystems Eng.** n.48, p.31-37, 2006.

- ROSENCWAIG, A.; GERSHO, A. Theory of the photoacoustic effect with solids. **J. Appl. Phys.** n. 47, p. 64-69, 1976.

- TAKETOSHI, N.; BABA, T; ONO, A. Development of a thermal diffusivity measurement system for metal thin films using a picosecond thermoreflectance technique. **Meas. Sci. Technol**. n.12, p. 2064-2073, 2001.

- YAMANE, T; MORI, Y; KATAYAMA, S; TODOKI, M. Measurement of thermal diffusivities of thin metallic films using the ac calorimetric method. **J. Appl. Phys**. V.3, n.82, p. 1153-1156, 1997.