Análise da Propagação de Calor em Tecidos Biológicos *ex vivo* por Termografia Infravermelha

GRUBE, Camila Vitória Bizarri[1]; NOVATSKI, Andressa[1,2]; SOMER, Aloisi[1,2];

Universidade Estadual de Ponta Grossa – Programa de Pós-Graduação em Ciências/Física[1]
Universidade Estadual de Ponta Grossa – Departamento de Física[2]

camilabizarri@gmail.com[1]

Palavras-Chave: Difusão térmica; Laser modulado; Perfil de temperatura.

Resumo

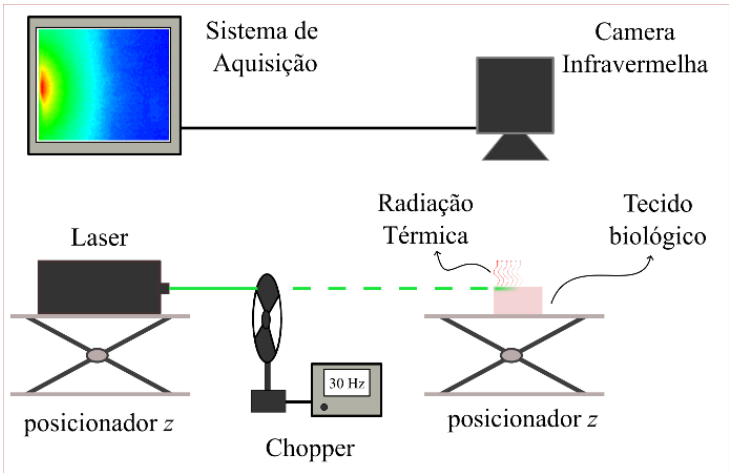
O trabalho investiga a propagação de calor em tecidos biológicos *ex vivo* por meio de termografia infravermelha e excitação laser modulada. São analisadas amostras suínas de pele, tecido adiposo e músculo, considerando sistemas com uma e duas camadas. As amostras são aquecidas por um feixe laser periodicamente modulado, enquanto uma câmera térmica registra a distribuição superficial de temperatura. São comparados qualitativamente os resultados dos diferentes tipos de amostras, verificando a sensibilidade da técnica para diferentes propriedades térmicas e ópticas dos tecidos. O estudo contribui para a caracterização térmica de tecidos biológicos e aplicações em estudos biomédicos, biofotônicos e em interação laser-tecido.

I. Introdução

A interação entre laser e tecidos biológicos tem importante relevância em áreas como biofotônica, medicina, odontologia, física médica e engenharia biomédica, pois variados procedimentos diagnósticos e terapêuticos envolvem geração, propagação e redistribuição de calor em meios biológicos (CORREA, 2013; METZLER; KLAFTER, 2000). Quando a radiação óptica é absorvida por cromóforos ou por regiões com maior coeficiente de absorção, parte da energia incidente é convertida em calor, produzindo aumento local de temperatura que pode ser registrado por métodos radiométricos ou por câmeras térmicas (BOUZIN et al., 2022; TELENKOV et al., 2002).

Tecidos biológicos *ex vivo* apresentam composição estrutural complexa, com diferentes frações de água, lipídios, proteínas, minerais e interfaces internas. Por isso, sua resposta térmica pode variar significativamente de acordo com o tipo de tecido, sua espessura, grau de hidratação, organização microestrutural e presença de camadas adjacentes (FRAHM et al., 2010). Em sistemas reais, como pele sobre tecido adiposo ou

Fig. 1. Sistema experimental da análise termográfica infravermelha com laser modulado em tecidos *ex vivo*.



Fonte: O autor.

músculo sobre cartilagem, a propagação de calor não depende apenas de uma propriedade térmica isolada, mas da interação entre camadas com diferentes difusividades térmicas e capacidades de armazenamento de calor (BOUZIN et al., 2022).

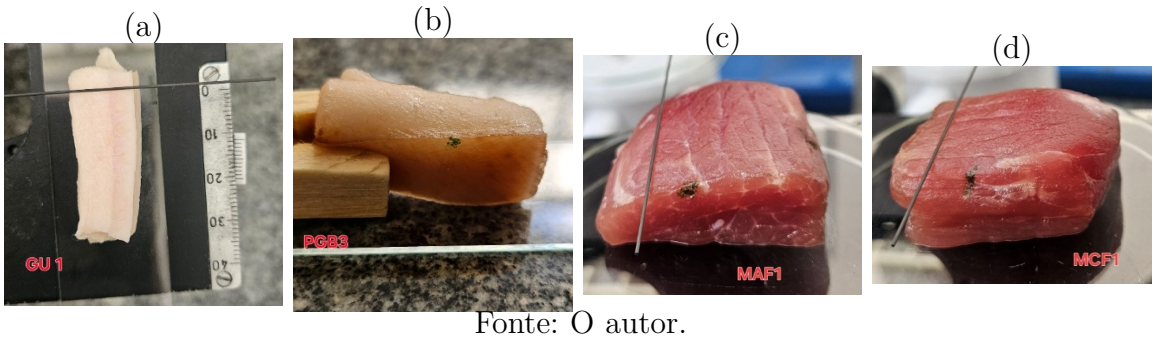
Apesar dos avanços em técnicas de imagem térmica, grande parte dos estudos ainda se concentra em análises temporais completas, reconstruções bidimensionais ou tridimensionais, extração de amplitude e fase por técnicas de *lock-in*, ou ajustes integrais da região aquecida (BOUZIN et al., 2022; CORREA, 2013; TELENKOV et al., 2002). Neste trabalho, propõe-se uma abordagem voltada à análise dos pixels centrais da imagem térmica, nos quais os efeitos laterais podem ser minimizados e a resposta térmica pode ser tratada, em primeira aproximação, por um modelo espacial unidimensional (SOMER et al., 2026).

II. Fundamentação Teórica/Materiais e Métodos

Os materiais utilizados para o procedimento experimental foram: um computador conectado a uma câmera HIKMICRO M30 com detector de infravermelho de resolução 384 × 288 pixels, com SuperIR de 768 × 576 pixels, resolução espacial (IFOV) de 1,75 mrad e faixa de temperatura do objeto de −20 °C a 550 °C; um modulador óptico-mecânico Chopper equipado com um disco de abertura contendo quinze fendas, operando em frequências de 30, 50, 75, 100 e 200 Hz; um laser verde de 532 nm e um grafite de 0,5 mm, utilizado para o ajuste dos pixels no eixo x, conforme Figura 1. As amostras analisadas e aplicadas à técnica de termografia infravermelha com laser modulado consistem em tecidos adiposos, pele, composta por epiderme, derme e hipoderme, e músculo, todos suínos de origem biológica *ex vivo*.

A amostra é posicionada sob o foco abaixo da câmera infravermelha. O laser é ajustado a uma altura próxima à borda da amostra, de modo que possibilite a visualização da propagação do calor no interior do material. Para converter o feixe contínuo do laser em pulsos luminosos, o disco do modulador óptico-mecânico é colocado entre a amostra e o feixe de luz, permitindo a modulação do sinal em diferentes frequências. As frequências utilizadas foram 30, 50, 75, 100 e 200 Hz. Em amostras de músculo, utilizaram-se dois modos: a favor da fibra e contra a fibra, para analisar a propagação do calor em diferentes direções devido à anisotropia.

Fig. 2. Foto das amostras de tecidos *ex vivo*: (a) tecido adiposo, (b) pele, (c) músculo a favor da fibra e (d) músculo contra a fibra.



Fonte: O autor.

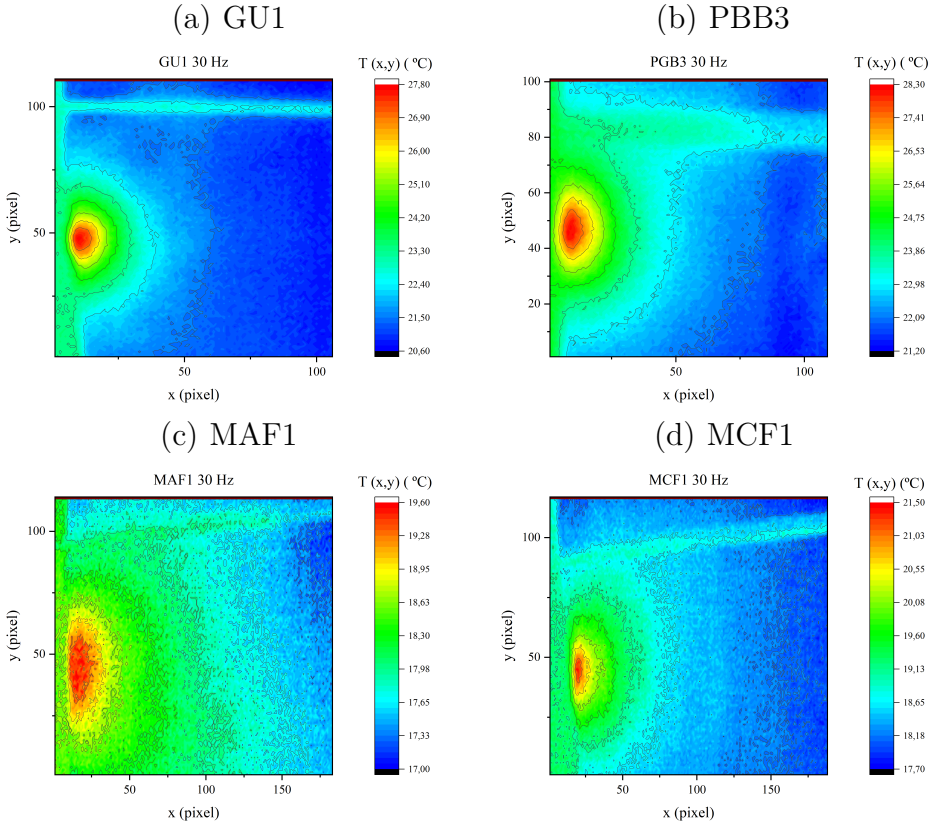
As amostras utilizadas são apresentadas em fotografias na Figura 2: tecido adiposo (GU1), pele com tecido adiposo (PGB3), músculo medido a favor da fibra (MAF1) e músculo medido contra a fibra (MCF1). O ponto em preto é uma marcação com caneta permanente após as medidas para representar a posição do ponto de incidência do laser. Para cada frequência, os dados do perfil de temperatura bidimensional foram coletados após o material biológico ser aquecido por 20 minutos, seguido de um período de relaxação térmica de 10 minutos, mantendo-se o mesmo ponto de incidência do laser para cada frequência analisada.

III. Resultados

Na Figura 3 são apresentados os resultados obtidos para os diferentes tecidos biológicos estudados, permitindo analisar o comportamento bidimensional da temperatura e da propagação de calor induzida pelo laser quando aquecidos com pulso de 30 Hz. Podemos observar que o perfil de temperatura apresenta comportamentos distintos para cada material. No tecido adiposo (Fig.3a), o calor permanece mais localizado na região de incidência do laser, indicando uma provável difusão térmica menor quando comparado ao resultado da pele. Já no músculo, especialmente ao longo da direção a favor das fibras(Fig.3c), observa-se uma maior propagação do calor, evidenciando uma provável

maior difusão térmica do que contra a fibra(Fig.3d).

Fig. 3. Termografia da dissipação de calor para os diferentes tecidos: (a) tecido adiposo, (b) pele, (c) músculo a favor da fibra e (d) músculo contra a fibra.



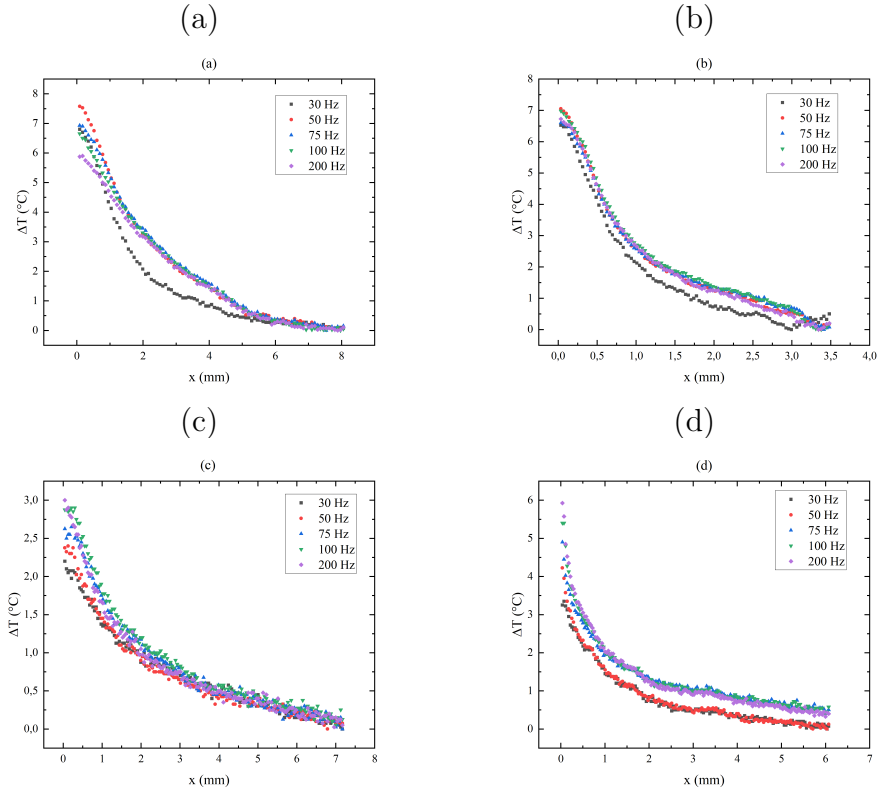
Fonte: O autor.

Na Figura 4 são apresentados os resultados da média dos 4 pixels centrais da temperatura em função do eixo x, correspondente à direção de absorção de radiação a partir do ponto de incidência do laser, para cada frequência. Em todos os casos, observa-se um decréscimo assintótico da temperatura até um ponto de mínimo. Ainda, à medida que a frequência aumenta, o feixe do laser é interrompido com maior frequência pelo chopper, resultando em uma menor profundidade de difusão térmica. É possível observar nos gráficos que cada amostra apresenta um comportamento térmico distinto devido às suas diferentes não homogeneidades, que influenciam na absorção óptica e na difusão de calor.

IV. Conclusões

Concluímos que o sistema desenvolvido apresentou bom desempenho na diferenciação entre os diferentes tipos de tecidos analisados, demonstrando potencial para a detecção de anomalias e variações estruturais. A comparação qualitativa dos resultados obtidos para as distintas amostras evidenciou a sensibilidade da técnica às propriedades

Fig. 4. Perfil de temperatura em função da posição para todas as frequências para os diferentes tecidos: (a) tecido adiposo, (b) pele, (c) músculo a favor da fibra e (d) músculo contra a fibra.



Fonte: O autor.

térmicas e ópticas específicas de cada tecido. Esses resultados reforçam a aplicabilidade da metodologia como ferramenta de caracterização térmica de tecidos biológicos.

Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente financiado por projeto do CNPq (304374/2024-5). Agradecemos ao Grupo de Propriedades Eletrônicas e Vibracionais em Materiais (GPEViM) da UEPG pela estrutura. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Referências

BOUZIN, M. et al. Melanin concentration maps by label-free super-resolution photo-thermal imaging on melanoma biopsies. **Biomedical Optics Express**, v. 13, n. 3, p. 1173–1185, 2022.

CORREA, P. R. **Desenvolvimento de uma interface de comunicação para determinação da difusividade térmica em função da temperatura, por termografia no infravermelho**. Dissertação (Mestrado) — Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

FRAHM, K. S. et al. Spatial temperature distribution in human hairy and glabrous skin after infrared co_2 laser radiation. **Biomedical Engineering Online**, v. 9, p. 69, 2010.

METZLER, R.; KLAFTER, J. The random walk's guide to anomalous diffusion: a fractional dynamics approach. **Physics Reports**, v. 339, p. 1–77, 2000.

SOMER, A. et al. **Modulated-Laser Infrared Thermography of Fractional Heat Diffusion in Ex Vivo Biological Tissue: A One-Dimensional Spatial Approach**. 2026. Manuscrito submetido à Fractal and Fractional, em revisão por pares.
TELENKOV, S. A. et al. Coherent thermal wave imaging of subsurface chromophores in biological materials. **Physics in Medicine and Biology**, v. 47, n. 4, p. 657–671, 2002.