

Obtenção das Propriedades Térmicas do Tecido Ósseo na Furação

Fábio Garcia Temístocles Ferreira, Universidade Federal de Uberlândia, fgarciamec@gmail.com
Gilmar Guimarães, gguima@mecanica.ufu.br

Resumo. O calor gerado durante a furação de tecidos ósseos é um fator de risco para o bom êxito do tratamento, permanecendo, porém, uma variável de complexa determinação. Com o objetivo de determinar, não só o calor gerado, como o campo térmico no interior de um tecido ósseo submetido ao processo de furação; o presente trabalho propõe uma metodologia baseada em técnicas inversas (método da impedância generalizada) para a obtenção das propriedades térmicas efetivas de uma estrutura óssea. Uma vez determinadas as propriedades térmicas, é possível, também por meio de técnicas inversas, encontrar o fluxo de calor que entra no domínio do tecido devido ao processo de furação. Assim, é possível determinar bem as condições de contorno do problema de maneira a controlar a temperatura no tecido tendo em vista as condições de corte.

Palavras chave: Furação de Tecido ósseo, Condutividade, Difusividade térmica, Experimental, Numérico.

1. INTRODUÇÃO

As cirurgias em tecidos ósseos são variadas e recorrentes, e têm sido alvo de grandes avanços (Shoham et. al., 2003; Alam, 2009; Bertollo e Walsh, 2011).

O processo de furação óssea é um procedimento cirúrgico recorrente na ortopedia, cirurgia caniomaxilofacial, plástica, etc. Consiste no posicionamento de pinos, parafusos e demais dispositivos destinados ao processo de reintegração óssea (Bertollo e Walsh, 2011).

Uma vez que há atrito entre a ferramenta e o tecido mineralizado e um processo de fratura da matriz óssea, há também a inerente geração de calor. Em 1986, Biyikli e colaboradores, pontuam a importância do conhecimento das propriedades térmicas no controle da temperatura local. Hillery e Shuaib (1999) registram que se a temperatura do tecido ósseo for elevada acima de 55°, por mais de 30s, sérios danos serão causados ao tecido. Apontam ainda que o tecido ósseo caracteriza de um material anisotrópico cuja condutividade térmica está na faixa de 0,38 a 2,3 W/mK. Outras contribuições ainda são feitas no sentido de se determinar um limiar de temperatura e tempo de exposição além do qual, o tecido ósseo sofreria danos irreversíveis (Eriksson e Albrektsson, 1983).

A temperatura atingida no processo de furação depende dos parâmetros de corte (Lee et. al., 2011; Hillery e Shuaib, 1999), da geometria da ferramenta (Augustin et. al., 2007).

Vários são os autores que se dedicaram à medição das propriedades térmicas do tecido ósseo, em especial a condutividade térmica: Zelenov (1985), Moses et. al. (1995), Davidson e James (2000); com valores de condutividade térmica bastante variáveis: ~12W/mK (Fêmur humano), ~0,8 W/mK (Pata de equino), ~0,58 W/mK (Fêmur bovino). Poucos trabalhos trazem a informação tanto de condutividade quanto de Capacidade Térmica (ou calor específico ou ainda a difusividade térmica).

A estrutura óssea pode ser classificada, macroscopicamente, em duas classes: Tecido ósseo esponjoso, com cavidades delimitadas pela matriz óssea e preenchidas pela medula óssea; e tecido ósseo compacto, de maior densidade disposto na periferia do órgão (ver Fig. 1).

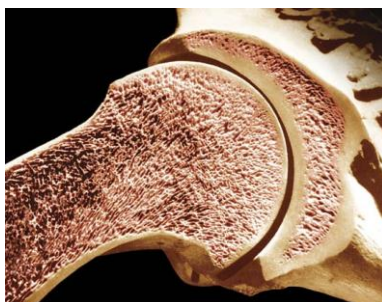


Figura 1 – Características macroscópicas do tecido ósseo. Fonte: Enciclopédia Britânica (<http://global.britannica.com/EBchecked/topic/129490/compact-bone>).

Este trabalho propõe a medição das propriedades térmicas da amostra de tecido ósseo, e a experimentação em procedimentos de furação para que seja possível controlar a temperatura no processo de corte. A análise numérica faz-se necessária tanto para a técnica inversa a ser usada na medição de propriedades térmicas; quanto na compreensão de todo o processo de propagação de calor no domínio da peça, uma vez que o local de furação é conhecido como de difícil acesso.

Em fase inicial de execução, apresenta-se neste trabalho uma proposta de metodologia para a solução do problema, bem como vários aspectos de sua abordagem.

2. METODOLOGIA

A proposta deste estudo consiste no desenvolvimento de uma metodologia baseada em técnicas inversas. Propõe-se o desenvolvimento de um experimento controlado, com uma amostra de fêmur bovino, para a obtenção das propriedades térmicas. A estimativa destas propriedades se dará através da aplicação de técnicas de problemas inversos em dados teóricos e experimentais de temperatura e fluxo de calor impostos na amostra óssea (Guimarães, 1993).

2.1. Análise Experimental

Para a realização do experimento, com vistas à obtenção das propriedades do tecido ósseo, propõe-se um experimento baseado no método da impedância generalizada (Guimarães, 1993) onde é possível conhecer o fluxo de calor imposto nos contornos do domínio. Assim, medindo-se a temperatura em dois pontos, temos as informações necessárias para a determinação de duas propriedades.

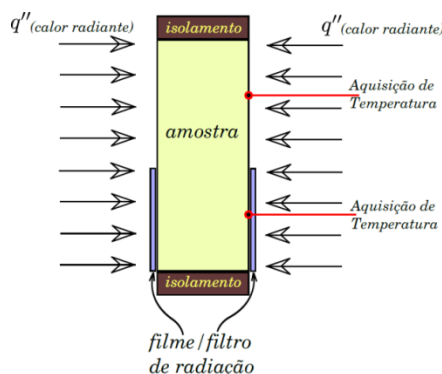


Figura 2 – Proposta de aparato experimental para medição de propriedades da amostra de tecido ósseo.

Por razões de facilidade de acesso, propõe-se a utilização de fêmur bovino, proveniente da indústria de corte, destinado ao descarte. A porção mediana (Diáfise) é separada e armazenada adequadamente para posterior experimentação.

2.2. Análise Numérica

O trabalho de Sousa (2009) traz simulações numéricas com aspectos realísticos: a geometria do domínio computacional varia com o tempo modelando o avanço da ferramenta sobre o corpo da peça, enquanto o contorno correspondente ao contato ferramenta-peça prevê um fluxo de calor. O trabalho tem como interesse estimar o fluxo de calor por meio de técnicas inversas: “Observadores dinâmicos” e “Método Sequencial”. Este trabalho constitui um fundamento do presente trabalho, uma vez que é interesse comum determinar numericamente as condições de contorno do problema da furação do tecido ósseo.

Um modelo simplificado unidimensional é proposto por Lee et. al. (2011) onde consideram o fluxo de calor devido à retirada de “cavaco” e o fluxo de calor devido à troca térmica entre as paredes do furo e as superfícies laterais da broca.

Tu et. al. (2013) apresenta resultados do perfil de temperatura de simulações numéricas de um modelo em elementos finitos (ABAQUS®). Broca e tecido ósseo são simulados em interação termomecânica; A lei de atrito de Coulomb é aplicada para prever o calor gerado. Os dados experimentais e numéricos possuem desvios significativos; isto pode ser devido ao modelo inadequado da geração de calor ou à aquisição de dados experimentais se darem a certa distância da parede do furo.

A fim de proceder a simulação numérica, informações na literatura a respeito das propriedades térmicas foram adquiridas. Clattenburg et. al. (1975) obtiveram a condutividade térmica do tecido ósseo esponjoso $0,293 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, e uma capacidade térmica de $3,054 \cdot 10^4 \text{ J/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$, os autores trabalham com a hipótese de isotropia. Lundskog (1972) traz informações de condutividade e calor específico sensível, porém, os valores de condutividade são controversos por outros autores. Tu et. al. (2013) trazem as propriedades térmicas do tecido cortical e esponjoso dispostos na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades Térmicas do tecido ósseo. Fonte: Tu et. al. (2013).

Propriedades	Tecido Ósseo Cortical	Tecido Ósseo Esponjoso
Massa Específica [kg/m³]	1640	640
Calor específico [J/kg.K]	1640	1477
Condutividade [W/m.K]	0,452	0,087

A maioria dos trabalhos encontrados na literatura estima o fluxo de calor sobre o tecido ósseo de maneira empírica, o que tem se mostrado insuficiente para a precisão necessária à cirurgia óssea. Uma vez determinadas as propriedades efetivas do tecido ósseo, o presente trabalho propõe a aplicação de uma técnica inversa para a determinação do fluxo de calor no contato entre a ferramenta e o tecido.

Para proceder as simulações numéricas utiliza-se o pacote comercial Comsol®. Baseado em formulação de Volumes Finitos, o *software* prevê modelos para biopropagação de calor e variação de geometria do domínio computacional. Exige tratamento mais sensível na uniformidade e escolha dos elementos de malha.

3. METODOLOGIA

A determinação das propriedades de condutividade ' k ' e difusividade térmica ' $\alpha = k/\rho \cdot c_p$ ', sendo ' ρ ' e ' c_p ' a massa específica, e o calor específico sensível, se dá de maneira simultânea. Para tanto, o tecido ósseo, tomado como um sistema de entrada (fluxo de calor) e saída (temperaturas), de maneira que, no domínio da frequência se possa determinar a função resposta em frequência:

$$H(f) = \frac{\theta_1(f) - \theta_2(f)}{\phi_1(f) - \phi_2(f)} = \frac{Y(f)}{X(f)} = \text{função}(\alpha, \lambda) \quad (1)$$

Onde ' θ_1 ' e ' θ_2 ' são as temperaturas em duas superfícies acessíveis e ' ϕ_1 ' ' ϕ_2 ' são os fluxos de calor nestas respectivas superfícies. A função ' H ' é uma função complexa com módulo e fase. A fase ' φ ' é função unicamente de ' α ' enquanto que o módulo é função de ambas, condutividade e difusividade térmica.

$$\varphi(f) = \arctang[imH(f)/reH(f)] \quad (2)$$

$$S_\varphi = \sum_{i=1}^{Nf} (\varphi_e - \varphi)^2 \quad (3)$$

Minimizando a fase com relação aos dados experimentais, obtém-se a difusividade térmica. Uma vez determinada a difusividade, uma minimização simples no domínio do tempo determina a condutividade térmica.

4. RESULTADOS PRELIMINARES

Uma simulação preliminar segundo o modelo esquematizado na Figura 2, com propriedades uniformes, a fim de verificar as potencialidades do software Comsol.

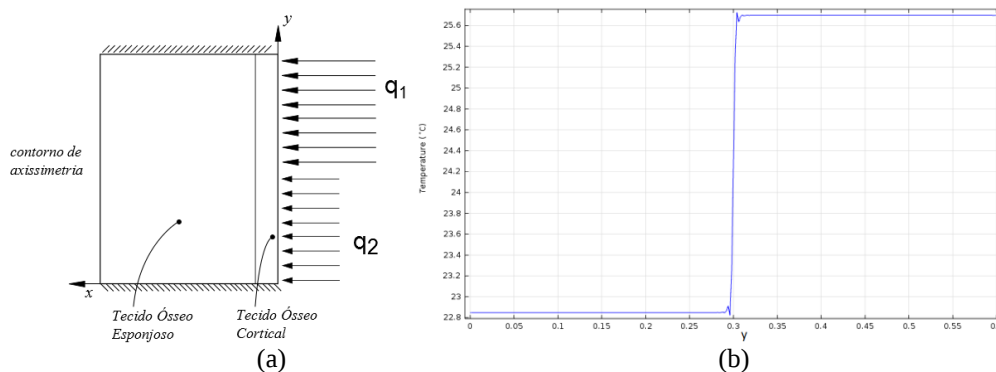


Figura 2 – (a) Modelo do experimento para obtenção de propriedades térmicas. (b) Perfil de temperatura na superfície exposta ao fluxo de calor ($x=0$) após 30s de simulação.

5. REFERÊNCIAS

- Alam, K., 2009, “Experimental and Numerical Analysis of Conventional and Ultrasonically Assisted Cutting of Bone”, Tese (Doutorado), Loughborough University.
- Augustin, G., Davila, S., Udiljak, T., Vedrina, D. S., Antabak, A., 2007, “Thermal Osteonecrosis and Bone Parameters Revisited”, *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*, Vol. 128, Pg. 71-77.
- Bertollo, N., Walsh, W. R., 2011, “Drilling of Bone: Practicality, Limitations and Complications Associated with Surgical Drill-Bits”, <http://www.intechopen.com/books/biomechanics-in-applications/drilling-of-bonepracticality-limitations-and-complications-associated-with-surgical-drill-bits>.
- Biyikli, S., Modest, M. F., Tarr, R., 1986, “Measurements of Thermal Properties for Human Femora” *Journal of Biomedical Materials Research*, Vol. 20, Pg. 1335-1345.
- Clattenburg, R., Cohen, J., Conner, S., Cook, N., 1975, “Thermal Properties of Cancellous Bone” *J. Biomed. Mater. Res.*, Vol. 9, Pg. 169-182.
- Davidson, S. R. H., James, D. F., 2000, “Measurement of Thermal Conductivity of Bovine Cortical Bone” *Medical Engineering and Physics*, Vol. 22, Pg. 741-747.
- Eriksson, A. R., Albrektsson, T., 1983, “Temperature Threshold Levels for Heat-Induced Bone Tissue Injury: A Vital-Microscopic Study in the Rabbit”, *The Journal of Prosthetic Dentistry*, Vol. 50, Pg. 101-107.
- Guimarães, G., 1993, “Estimação de Parâmetros no Domínio da Frequência para a Determinação Simultânea da Condutividade e da Difusividade Térmica”, Tese (Doutorado), Universidade Federal de Santa Catarina.
- Hillery, M. T., Shuaib, I., 1999, “Temperature Effects in the Drilling of Human and Bovine Bone”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 92, Pg. 302-308.
- Lee, J., Rabin, Y., Ozdoganlar, O. B., 2011, “A New Thermal Model for Bone Drilling with Applications to Orthopaedic Surgery”, *Medical Engineering Physics*, Vol. 33, Pg. 1234-1244.
- Moses, W. M., Witthaus, F. W., Hogan, H. A., Laster, W. R., 1995, “Measurement of the Thermal Conductivity of Cortical Bone by an Inverse Technique” *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 11, Pg. 34-39.
- Shoham, M., Burman, M., Zehavi, E., Joskowicz, L., Batkalin, E., Kunicher, Y., 2003, “Bone-Mounted Miniature Robot for Surgical Procedures: Concept and Clinical Applications”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 19, No. 5.
- Sousa, P. F. Barbosa de, 2009, “Estudos de Processos Térmicos Decorrentes da Usinagem: Aplicação de Problemas Inversos em Furação”, Tese (Doutorado), Universidade Federal de Uberlândia.
- Tu, Y.-K., Chen, L.-W., Ciou, J.-S., Hsiao, C.-K., Chen, Y.-C., 2013, “Finite Element Simulations of Bone Temperature Rise During Bone Drilling Based on a Bone Analog”, *Journal of Medical and Biological Engineering*, Vol. 33, Pg. 269-274.
- Zelenov, E. S., 1985, “Experimental Investigation of the Thermophysical Properties of Compact Bone” *Medical Instruments Scientific-Industrial Association. Traduzido de Mekhanika Kompozitnykh Materialov*, No. 6, Pg. 1092-1095

4. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.