

MEDIDAS DIELÉTRICAS DE OSSO CORTICAL DESIDRATADO ENTRE AS BANDAS SLF E VHF DE RADIOFREQUÊNCIA

Y. C. De Polli* e C. A. F. Sartori**

*Laboratório de Sistemas Eletromagnéticos/IEAv, São José dos Campos, Brasil

**Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado/EPUSP, São Paulo, Brasil

e-mail: yasmara@ieav.cta.br; sartori@pea.usp.br

Abstract: The knowledge of the dielectric properties of bones has become an important role regarding the medical and bioengineering applications. This work presents a methodology for evaluating the complex permittivity of dehydrated cortical bones by applying the impedance method and a coaxial transmission line. The permittivity and loss factor data were obtained considering the frequency range between 100 Hz and 1 MHz. The results show that the methodology employed is appropriate and they complement the experimental values available in literature, which are sparse and punctual in the considered electromagnetic spectrum.

Palavras-chave: Propriedades Dielétricas, Osso Cortical, Método de Impedância.

Introdução

As propriedades dielétricas do osso vêm sendo extensivamente estudadas, nas últimas décadas, principalmente, devido às respostas obtidas com a estimulação eletromagnética em suas estruturas. O tecido ósseo apresenta capacidade de se multiplicar (osteogênese) quando é submetido a determinados campos elétricos ou magnéticos pulsados. Essa característica já é utilizada nas terapias ortopédicas para ativação da formação do tecido ósseo. A técnica foi aprovada pela *Food and Drug Administration – FDA*, nos Estados Unidos, em 1979 [1], entretanto, a dosagem de energia a ser recebida pelo paciente ainda é empírica e precisa ser adequada a cada caso. Estuda-se, também, a possibilidade de se fazer o diagnóstico, por exemplo, da osteoporose utilizando-se das diferenças nas propriedades dielétricas do tecido saudável e do tecido comprometido com a doença [2], [3]-[9]. Tudo isso faz com que a estimulação eletromagnética do tecido ósseo constitua-se numa das linhas de pesquisa nas áreas de bioengenharia e biofísica, em várias partes do mundo [6], [9]-[12]. Em particular, destaca-se nessas investigações o objetivo de desencadear processos de regeneração óssea para os casos de fraturas com retardo da consolidação do tecido, osteoporose e outras doenças degenerativas. Dada a importância tanto das aplicações médicas, na medicina diagnóstica, ou clínica (prevenindo ou tratando certas patologias) como das aplicações na indústria (porcelana de osso) [13] e na

pesquisa das eventuais implicações da exposição de seres vivos à RNI [14]-[17], ressalta-se a necessidade de se dispor de valores precisos das propriedades dielétricas do osso [18]. Observa-se que, embora inúmeras pesquisas relacionadas à avaliação de efeitos da RNI em seres humanos tenham sido publicadas, não há registro, atualmente, de outros grupos no Brasil, além do Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado – LMAG/USP e do Laboratório de Sistemas Eletromagnéticos – LSE/CTA, atuando em caracterização eletromagnética de materiais biológicos, segundo cadastro disponibilizado pelo Ministério da Ciência e Tecnologia [19], [20].

Materiais e Métodos

As amostras de osso cortical foram confeccionadas em formato cilíndrico com furo coaxial, considerando-se um pequeno volume da diáfise. Suas dimensões típicas correspondem a, por exemplo, $(9,5 \pm 0,5)$ mm de comprimento, $(3,10 \pm 0,05)$ mm de diâmetro interno e $(6,95 \pm 0,05)$ mm de diâmetro externo. Estas medidas atendem ao padrão Tipo-N (7 mm) do porta-amostra, constituindo uma linha coaxial de comprimento total igual a 28,0 mm. A técnica de confecção e o tempo decorrido entre o abate do animal e a realização dos ensaios garantem alto grau de desidratação da amostra [18], [21].

Método da impedância – A permissividade elétrica complexa relativa, conhecida como sendo um dos parâmetros constitutivos do material, é uma variável de grande importância para a determinação de suas características dielétricas. Essa grandeza, representada simbolicamente por $\hat{\epsilon}_r$, é adimensional e definida como

$$\hat{\epsilon}_r = \frac{\hat{\epsilon}}{\epsilon_0} = (\epsilon' - j\epsilon'') \quad (1)$$

sendo que $\hat{\epsilon}$ é a permissividade complexa, dimensionada em *farad por metro*, no sistema internacional (SI); $\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$ F.m⁻¹ é a permissividade do espaço livre; ϵ' é a permissividade relativa (parte real da permissividade complexa); ϵ'' é o fator de perdas (parte imaginária da permissividade complexa) e j , a unidade imaginária ($j = \sqrt{-1}$).

A análise por meio do método de impedância trata meios dielétricos contínuos como circuitos equivalentes com componentes discretos, tais como, indutores, capacitores e resistores. As técnicas de análise de impedância são empregadas em instrumentos como analisadores de impedância/admitância ou analisadores de resposta em frequência. Estes medem a impedância complexa, \dot{Z} , dada por

$$\dot{Z} = R + jX, \quad (2)$$

sendo que R é a resistência equivalente em série, X é a reatância equivalente em série. Podem-se representar as relações entre os componentes da permissividade e da impedância por [18]

$$\epsilon' = -\frac{cZ_0^{ar}}{\omega l_s} \frac{X_{entrada}^{aberto}}{|\dot{Z}_{entrada}^{aberto}|^2} \quad (3)$$

$$\epsilon'' = \frac{cZ_0^{ar}}{\omega l_s} \frac{R_{entrada}^{aberto}}{|\dot{Z}_{entrada}^{aberto}|^2} \quad (4)$$

sendo que c é a velocidade da luz no espaço livre; Z_0^{ar} é a impedância característica da linha coaxial, preenchida com o ar, igual a 50Ω ; $\omega = 2\pi f$ é a frequência angular e f , a frequência do campo aplicado; l_s é o comprimento da amostra; $X_{entrada}^{aberto}$, $R_{entrada}^{aberto}$ e $\dot{Z}_{entrada}^{aberto}$ são, respectivamente, a reatância, a resistência e a impedância, medidas pelo instrumento, na entrada da linha coaxial em circuito aberto.

Procedimento experimental – Nos ensaios de permissividade complexa, foram utilizados os seguintes equipamentos: analisador de impedância HP 4194A (rastreador), adaptador de terminal HP 16086A, kit de calibração de alta precisão HP 41941B e câmara de temperatura e umidade ESPEC SH-241, embora outros instrumentos similares possam ser empregados nos ensaios. Foram analisadas quatro amostras, confeccionadas a partir de um único osso de fêmur, seguindo a direção radial da sua estrutura. As medidas foram realizadas dentro da câmara climática, à temperatura de 37°C e umidade relativa igual a 55%. O analisador de impedância foi calibrado na faixa de frequência entre 100 Hz e 1 MHz e ajustado para armazenar dados de reatância e resistência, por escolha do usuário.

Resultados

Os resultados das medidas de impedância, com os cálculos da permissividade relativa, ϵ' , do fator de perdas, ϵ'' , são apresentados nos gráficos das Figuras 1 e 2, respectivamente. Os dados foram transferidos para um computador e os cálculos foram realizados por um programa computacional desenvolvido em ambiente VEE 8.0, utilizando-se as expressões (3) e (4).

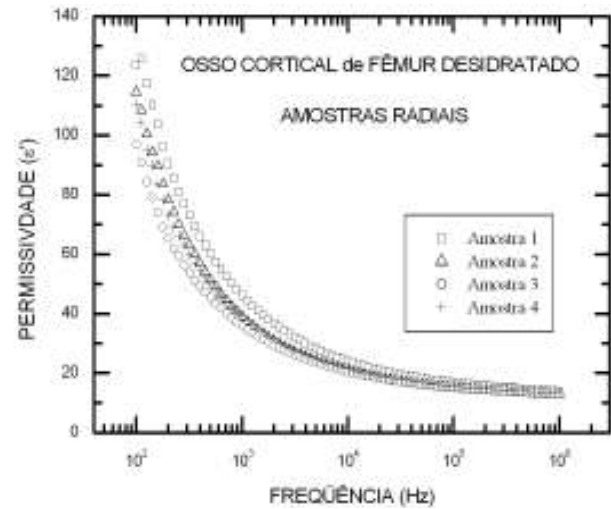


Figura 1: Variação da permissividade relativa com a frequência em amostras de osso bovino, extraídas segundo a orientação radial do fêmur.

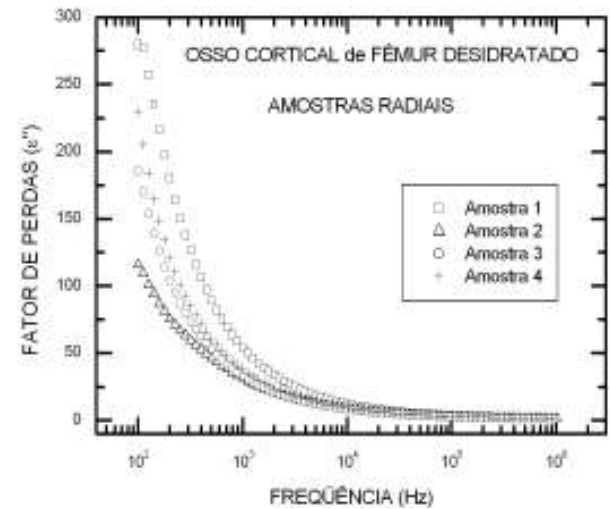


Figura 2: Variação do fator de perdas com a frequência em amostras de osso bovino, extraídas segundo a orientação radial do fêmur.

Discussão

Ressalta-se a importância da precisão nas medidas dos diâmetros das amostras, já que estes deverão ser compatíveis com as características físicas do porta-amostra e são críticos em ensaios que empregam o método de linha de transmissão (LT) coaxial. O método é adequado para a propagação de ondas transversoeletromagnéticas (modo TEM de propagação). A presença de *gaps* de ar entre as paredes da LT e a amostra, e o seu posicionamento fora do centro acarretam diminuição nos valores da permissividade medida devido à geração de modos de propagação de mais altas ordens. Este fato é acentuado quando o diâmetro interno da amostra é superdimensionado [18]. Enfatiza-se que a instrumentação e os componentes dos kits de calibração, que foram utilizados neste trabalho, têm certificação de órgãos acreditados e são

classificados como rastreáveis. No processo de preparação da amostra, destaca-se a importância da adoção da pintura para evitar descontinuidade na linha, preservando, portanto, o contato elétrico entre a amostra e as paredes do condutor e evitando, assim, a geração de outros modos de propagação na LT. Na literatura [6], foram encontrados os valores de permissividade relativa, para o osso femoral bovino desidratado, relacionados na Tabela 1. A metodologia empregada no citado estudo utiliza amostras cúbicas, mantidas em solução salina a 9% de NaCl em peso e, posteriormente, submetidas a vácuo de menos de 10^{-3} torr, em temperatura ambiente de 23 °C, para, finalmente, proceder à medida de impedância elétrica das amostras secas. O instrumento de medida utilizado naquele trabalho foi um analisador de impedância automático (HP 4192A), calibrado para medidas em frequências fixas de 100 Hz, 10 kHz e 1 MHz.

Tabela 1: Faixa de valores de permissividade relativa medida em amostras de osso seco por De Mercato e Sanchez [6].

Frequência (Hz)	Permissividade Relativa Direção Radial	
	Mín.	Máx.
100	91	150
10 k	14,7	22,3
1 M	8,4	11,7

Conclusão

Foram analisados o fator de perdas e a permissividade relativa de amostras de osso cortical desidratado, extraídas segundo a direção radial da estrutura do fêmur. Os resultados obtidos apresentam valores satisfatórios, quando confrontados com os existentes na literatura [6]. Conforme evidenciado na literatura, por Kosterich e colaboradores [9] e Reinish [21], a umidade tem influência considerável nos resultados das medidas, ainda mais considerando-se que o meio líquido que percorre o osso é iônico. Nessas condições, as diferenças na ordem de grandeza observadas entre as permissividades apresentadas neste trabalho e no de Sánchez podem ser atribuídas não só às diferenças entre os doadores e à natureza heterogênea do tecido, mas também à diferença no grau de desidratação das amostras.

Referências

[1] Acevedo, M.E. (2007), *Sistema de generación de campo magnético con apoyo computacional como herramienta coadyuvante en la consolidación de fractura de diáfisis femoral*, Tesis de doctorado, Programa de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle, Cali, Colombia, 214 p.

- [2] Gandhi, O.P. – Ed. (1990), *Biological effects and medical applications of electromagnetic energy: Parts 3, 4, 5*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 573 p.
- [3] Polk, C., Postow, E. (1996), *Handbook of biological effects of electromagnetic fields*, 2nd ed. Boca Raton, Florida: CRC Press, p. 231-246.
- [4] Gabriel, C., Chan, T.Y.A., Grant, E.H. (1994), “Admittance models for open-ended coaxial probes and their place in dielectric spectroscopy”, *Phys. Med. Biol.*, v. 39, p. 2183-2200.
- [5] Moncada, M.E. *et al.* (2006), “Developed and simulation of a magnetic stimulation prototype for long bones fractures consolidation”, In: *Proceedings of the International Conference on Electromagnetic Fields, Health and Environment*, Funchal, Madeira, Portugal. Coimbra: Carlos Lemos Antunes – Associação Portuguesa para a Promoção e Desenvolvimento da Engenharia Electrotécnica – APDEE, p. 2.81-2.85.
- [6] De Mercato, G., Sanchez, F.J.G. (1992), “Correlation between low-frequency electric conductivity and permittivity in the diaphysis of bovine femoral bone”, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, v. 39, n. 5, p.523-526.
- [7] Lirani, A.P.R., Castro, M.L. (2005), “Evidências da ação de agentes físicos sobre o metabolismo do tecido ósseo e seus potenciais usos clínicos”, *Arq. Bras. Endocrinol. Metab.*, v. 49, n. 6, p.891-896.
- [8] Fois, M. *et al.* (1999), “Dielectric properties of bone and its main mineral component”, In: *Proceedings of the 10th International Symposium on Electrets*, 22-24 Sept., p. 217-220.
- [9] Kosterich, J.D., Foster, K.R., Pollack, S.R. (1984), “Dielectric properties of fluid saturated bone – the effect of variation in conductivity of immersion fluid”, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, v. BME-31, n. 4, p. 369-374.
- [10] Moncada, M.E. *et al.* (2008), “Desarrollo e implementación de una técnica para la medición de impedancia en muestras de hueso húmedo de bovino”, *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, n. 44, p. 75-82.
- [11] Reinish, G., Nowick, A. (1975), “Piezoelectric properties of bone as functions of moisture content”. *Nature*, v. 253, p. 626-627.
- [12] Chang, W.H., Chang, K.T., Li, J. (2003), “Applications of therapeutic effects of electromagnetic fields”, In: Stavroulakis, P. (Ed.). *Biological Effects of Electromagnetic Fields*, Germany: Springer-

Verlag, chap. 6, p. 624-732.

- [13] Miyahara, R.Y., Gouvêa, D., Toffoli, S.M. (2007), “Obtenção e caracterização de cinza de ossos bovinos visando à fabricação de porcelana de ossos – *bone china*”, *Cerâmica*, v. 53, p. 234-239.
- [14] “ICNIRP Guidelines (1998), “Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)”, *Health Physics*, v. 74, n. 4, p. 494-522.
- [15] Siauve, N., Nicolas, L. (2006), “Screening of significant electromagnetic properties of biological tissues using design of experiments and numerical computation” In: *Proceedings of the International Conference on Electromagnetic Fields, Health and Environment*, Funchal, Madeira, Portugal. Coimbra: Carlos Lemos Antunes – Associação Portuguesa para a Promoção e Desenvolvimento da Engenharia Electrotécnica – APDEE, p. 2.65-2.70.
- [16] Hurt, W.D., Ziriak, J.M., Mason, P.A. (2000), “Variability in EMF permittivity values: implications for SAR calculations”, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, v. 47, p. 396-401.
- [17] Fukunaga, K., Watanabe, S., Yamanaka, Y. (2004), “Dielectric properties of tissue-equivalent liquids and their effects on specific absorption rate”, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, v. 46, p. 126-129.
- [18] De Polli, Y.C. (2008), *Caracterização da anisotropia na permissividade de osso cortical utilizando o método da impedância*, Tese de Doutorado, EPUSP/USP, São Paulo, 148 p.
- [19] Portal Inovação. Ministério da Ciência e Tecnologia. Busca por competências. Palavras-chave: “medidas eletromagnéticas em tecidos biológicos”, Disponível em: <<http://www.portalinovacao.info/ISPublish/inovacao/portal/>>, acesso em: 8 ago. 2007.
- [20] ISI Web of Knowledge – Web of Science. It is an integrated Web-based platform, provides high-quality content and the tools to access, analyze, and manage research information. Disponível em: <<http://portal.isiknowledge.com/portal.cgi>>, acesso em 25/07/2007.
- [21] Reinish, G.B. (1974), “Dielectric and piezoelectric properties of bone as functions of moisture content”, Ph. D. dissertation, Columbia University, New York, NY, 179 p.