

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS E DA VELOCIDADE ULTRASSÔNICA DE PHANTOMS A BASE DE PARAFINA

L. E. Maggi*, G. Cortela**, K. M. M. Lima***, C. A. Negreira** e W. C. A. Pereira***

*CCBN/UFAC, Rio Branco, AC, Brasil

** Laboratório de Acústica Ultrasonora, Igua 4225, Montevideo, Uruguay

*** Programa de Engenharia Biomédica - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil

e-mail: luis.maggi@gmail.com

Resumo: Tem sido investigado o comportamento de propriedades acústicas e térmicas de phantoms (PH) a base de parafina em gel. Neste estudo, foram produzidos phantoms com a adição de diferentes proporções de policloreto de vinila (PVC) ou cera de carnaúba (CC). A quantidade de PVC ou CC adicionada ao material base gera mudanças na velocidade do som e nas propriedades térmicas. As velocidades dos PH apresentaram uma relação linear com a temperatura, na faixa de 20-30°C. As variações foram: 1460–1490m.s⁻¹, para parafina pura (material base); 1440–1490m.s⁻¹ nos phantoms com pó de PVC (0,5–2,0% w/w), e 1420–1490m.s⁻¹ nos phantoms com CC diluída (0,5–2,0% w/w). O calor específico da parafina em gel é 7,90J(g°C)⁻¹ e variou de 2,76–7,11J(g°C)⁻¹, no caso de PVC e de 2,09–7,58J(g°C)⁻¹, no caso da CC. A condutividade térmica da parafina em gel é 1,39W(m°C)⁻¹, acrescentando a proporção de PVC, obteve-se uma faixa de 1,49–1,84W(m°C)⁻¹ e no caso da CC, reduziu de 0,84–0,99W(m°C)⁻¹. Os phantoms, apesar de terem sido submetidos ao tratamento térmico, permaneceram estáveis em forma e composição na faixa de temperatura analisada. Os resultados indicam que um único phantom, dependendo da porcentagem adicionada de PVC ou CC e da temperatura de trabalho pode mimetizar diferentes propriedades de tecido mole.

Palavras-chave: Imitação de tecido mole, condutividade térmica, calor específico, velocidade do ultrassom.

Abstract: It has been investigated the paraffin-based gel phantoms' behavior as a function of temperature. In this study, the phantoms (PH) were produced by the addition of the different proportions of polyvinyl chloride (PVC) or carnauba wax (CC). The amount of PVC or CW added to the base material generates speed of sound and thermal property changes. The PH speeds showed a linear relationship with the temperature between 20-30°C. The variations were: from 1.46 to 1.49mm. μs⁻¹ for pure paraffin (base material); from 1.44 to 1.49mm.μs⁻¹ for PH with PVC powder (0.5-2.0% w/w) and from 1.42 to 1.49mm.μs⁻¹ for PH with CW diluted (0.5-2.0% w/w). The paraffin gel specific heat was 7.90J(g °C)⁻¹ and it ranged from 2.76 to 7.11J(g°C)⁻¹ in

the PVC and from 2.09 to 7.58 J(g °C)⁻¹ in CC. The paraffin gel thermal conductivity was 1.39W(m°C)⁻¹; adding the PVC proportion increased from 1.49 to 1.84W(m°C)⁻¹ and in the CC, decreased from 0.84 to 0.99W(m°C)⁻¹. The PH, although submitted to heat treatment, remained stable in form and composition. The results indicate that a single phantom, depending on the PVC or CC percent added and work temperature, can mimic soft tissue properties different.

Keywords: Soft tissue-mimicking, Thermal conductivity, Specific heat, Ultrasound velocity.

Introdução

O estudo da interação de US com os tecidos biológicos em aplicação de diagnóstico e tratamento pode ser realizado por meio de phantoms (PH). Phantoms são corpos de prova utilizados para mimetizar tecidos biológicos [1]. O emprego deles tem a vantagem de, diferentemente dos tecidos biológicos, tornar possível o controle sobre certos parâmetros como espessura, formas, e propriedades físicas. Eles podem ser classificados de acordo com suas aplicações: 1) PH que imitam as propriedades acústicas, como velocidade longitudinal (v_s), atenuação, etc.; 2) PH usados para avaliar os fatores fundamentais de imagens acústicas; 3) PH com inclusões simulando quistos; 4) PH para treinamento como biópsia guiada; 5) PH que mimetizam elasticidade dos tecidos.

Em geral os PH são feitos de material com propriedades acústicas próximas as tecidos biológicos, Agar [1], gelatina [2], polivinilalcol [3] e uretano [4]. Adicionando materiais (policloreto de vinila - PVC, grafite, álcool, etc.) pode-se ajustar suas propriedades para dentro da faixa de interesse. Outras substâncias são usadas para simular quistos ou algumas estruturas biológicas ecogênicas [5] [6] [7] [8]. Além disso, existe uma grande preocupação de que as propriedades dos PHs permaneçam estáveis durante um longo período de tempo e que os mesmos não sofram ataques de agentes biológicos nem degradação.

Neste estudo, se investiga as propriedades dos phantoms constituídos a base de gel de parafina como substrato, e pó de PVC ou cera de carnaúba como materiais ajustadores das propriedades em diferentes proporções. Em particular foram determinadas a

condutividade térmica, o calor específico e a velocidade ultrassônica.

Materiais e métodos

Confecção dos Phantoms – O phantom (PH) que mimetizam certas propriedades dos tecidos moles são formado a partir de parafina-gel (PG) (Fortinbrás, São Paulo, Brasil) como substrato ao qual se adiciona pó de PVC ou cera de carnaúba (CC). A PG é uma molécula derivada de hidrocarbonetos pesados, formado por óleo mineral e polímero de resina em baixa proporção. A densidade do PG medida é $0,90 \pm 0,12 \text{ g.cm}^{-3}$ e seu ponto de fusão $62,8^\circ\text{C}$. O substrato dos phantoms foi preparado derretendo-se 70g de PG em um recipiente a banho Maria com uma temperatura controlada de 80°C durante 30 min. Uma vez em estado líquido se incorpora à PG o aditivo em proporções de 0,5; 1,0; 1,5 ou 2,0% w/w, gerando assim nove phantoms: 4 com PVC (PH_{PVC}), 4 com CC (PH_{CC}), e 1 homogêneo, formado unicamente por PG (PH_{PG}). A adição do pó de PVC é feita com a parafina já em estado líquido misturando-se lentamente procurando evitar a formação de bolhas de ar. Os PH_{CC} foram feitos misturando-se CC em estado líquido a 90°C durante 10 minutos. Os phantoms têm forma cilíndrica com 63mm de diâmetro e 20mm de espessura (Figura 1). Todos apresentaram uma rigidez adequada para manter a forma, no entanto, são suficientemente moles para se inserir um termopar usando uma agulha como guia.

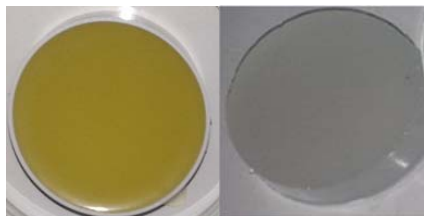


Figura 1: Fotos de phantoms de parafina com cera de carnaúba (esquerda) e PVC (direita).

Medição das Propriedades Térmicas – O calor específico (c_p) dos phantoms foi determinada pelo método de misturas e a condutividade térmica (k_t) empregando a técnica das placas quentes. A faixa de temperatura empregada foi de $15\text{-}30^\circ\text{C}$ [9].

Medição da Velocidade - Foi analisada a velocidade longitudinal ultrassônica em função da temperatura na faixa de $19\text{-}30^\circ\text{C}$. Este parâmetro acústico foi calculado a 1 MHz empregando transdutores ultrassônicos (TUS) planos e idênticos (Olympus NDT Inc. 0,54-18 MHz). O transdutor emissor é excitado eletricamente com pulsos empregando um digitalizador (US-Key, Lecoeur-electronique, France). O PH se interpõe entre os TUS, sempre em contato com suas faces paralelas, perpendiculares à propagação da onda, com cerca de 20mm de separação entre eles. O conjunto (PH e TUS) está mergulhado em um banho térmico com água destilada desgasificada (Figura 2). As medições das temperaturas no PH e na água foram feitas com dois

termopares (Tipo T) ligados a um multiplexor modelo NI-9213 (National Instruments).

A velocidade do US (v_s) nos PH foi calculada a partir da equação 1 e suas incertezas (tipo A e B) foram obtidas de acordo com Maggi (2011) [10].

$$v_s(x) = \frac{e}{t^*} \quad (1)$$

onde e é a espessura da amostra e t^* é o tempo de chegada do pulso ultrassônico depois de passar através da amostra. A estimativa do tempo de chegada foi feita usando-se a transformada de Hilbert em um programa desenvolvido em MATLAB (The MathWorks Inc., USA).

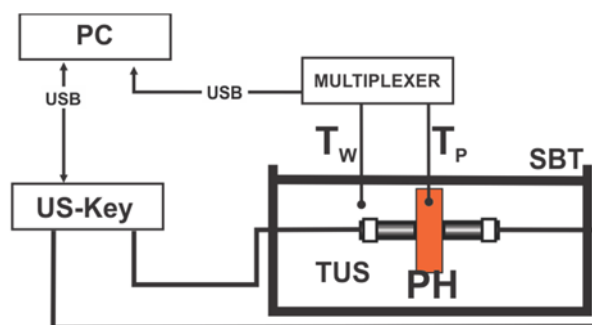


Figura 2: Montagem experimental para a medição da velocidade. O phantom (PH) imerso no banho térmico (SBT) está em contato com os transdutores (TUS). O gerador de pulsos (US-Key) e o sistema de medição da temperatura (MUX + Termopares; T_w , termopar na água, T_p , termopar no phantom) estão conectados ao computador (PC) via USB.

Na determinação da velocidade ultrassônica o parâmetro t^* é muito sensível. O tempo de chegada é calculado como o menor tempo onde a amplitude da transformada de Hilbert do sinal transmitido é maior ou igual ao dobro da média do ruído base do sinal. Na Figura 3 (superior) mostra-se o sinal transmitido através do phantom PH_{CC} , e sua respectiva transformada de Hilbert (inferior). A linha tracejada é o dobro da média da amplitude da transformada entre os tempos $5\text{-}15\mu\text{s}$ (quadro inferior direito). O círculo vermelho mostra o tempo de chegada.

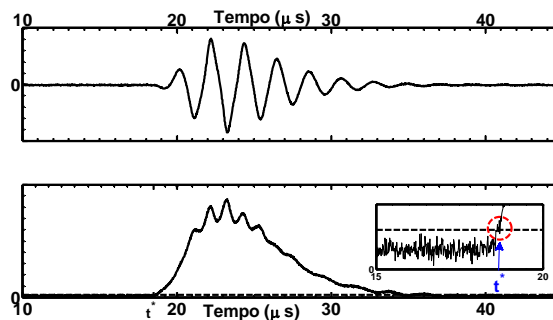


Figura 3: Sup. Sinal RF transmitida logo de atravessar o phantom (PH_{CC}). Inf. Transformada de Hilbert, detalhe tempo de chegada do sinal (t^*).

Resultados

As velocidades dos phantoms apresentam uma relação linear com a temperatura, na faixa de 20-30°C. As variações foram: 1,46–1,49($\times 10^3$) m.s⁻¹, para parafina pura (material base); 1,44–1,49($\times 10^3$) m.s⁻¹ nos phantoms com pó de PVC (0,5–2,0% w/w), ver Figura 4 e 1,40–1,49($\times 10^3$) m.s⁻¹ nos phantoms com CC diluída (0,5–2,0% w/w) como pode ser visto na Figura 5.

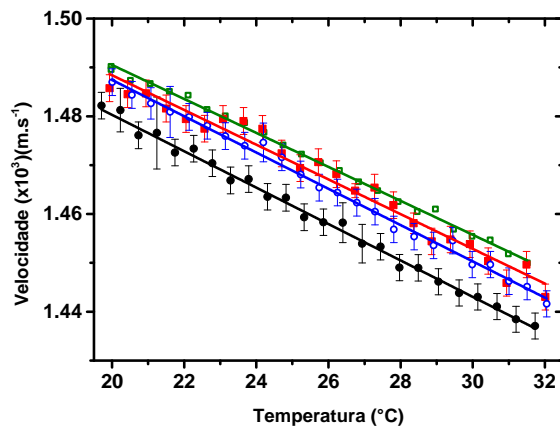


Figura 4: Velocidade dos phantoms de Parafina gel com PVC. (0,5%w/w PH_{PVC_05} □), 1,0 (PH_{PVC_10} ■), 1,5 (PH_{PVC_15} ○) e 2,0 (PH_{PVC_20} ●).

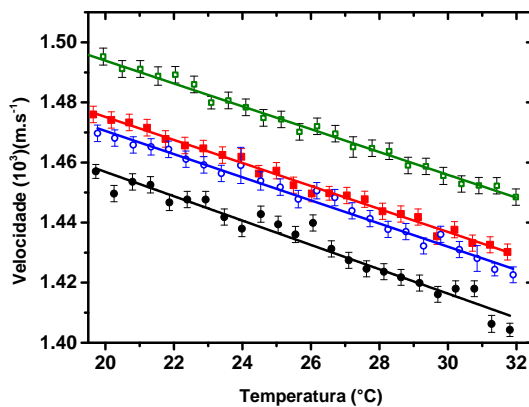


Figura 5: Velocidade dos phantoms de Parafina gel com cera de carnaúba (0,5-2,0 % w/w) (PH_{CAR_05} □), 1,0 (PH_{CAR_10} ■), 1,5 (PH_{CAR_15} ○) e 2,0 (PH_{CAR_20} ●).

O ajuste linear da velocidade longitudinal dos PH em função da temperatura (20-30°C) a 1,0MHz pode ser visto na

Tabela 1.

O c_p da parafina em gel é 7900 J(kg°C)⁻¹ e varia de 2760–7110 J(kg°C)⁻¹, com o acréscimos de pó de PVC e de 2090–7580 J(kg°C)⁻¹ no caso da CC. A k_t da parafina

em gel é 1,39 W(m°C)⁻¹; acrescentando as proporção de PVC, 1,49–1,84 W(m°C)⁻¹ (Tabela 2).

Tabela 1: Ajuste linear da velocidade longitudinal do ultrassom em função da temperatura a 1,0MHz (20-30°C).

Phantom	Relação linear	Pearson's r
PH _{PG}	$-2,74(10^{-3}) \times T + 1,54$	-0,99
PH _{PVC_05}	$-3,48(10^{-3}) \times T + 1,56$	-0,99
PH _{PVC_10}	$-3,55(10^{-3}) \times T + 1,56$	-0,98
PH _{PVC_15}	$-3,71(10^{-3}) \times T + 1,56$	-0,99
PH _{PVC_20}	$-3,73(10^{-3}) \times T + 1,55$	-0,99
PH _{CAR_05}	$-3,80(10^{-3}) \times T + 1,57$	-0,97
PH _{CAR_10}	$-3,83(10^{-3}) \times T + 1,55$	-0,99
PH _{CAR_15}	$-3,85(10^{-3}) \times T + 1,55$	-0,99
PH _{CAR_20}	$-4,05(10^{-3}) \times T + 1,54$	-0,98

Tabela 2: Propriedades térmicas dos phantoms.

Phantom	c_p (10 ³) (J(kg°C) ⁻¹)	k_t (W(m°C) ⁻¹)
PH _{PG}	7,90±0,13	1,39±0,01
PH _{PVC_05}	7,11±0,25	1,49±0,52
PH _{PVC_10}	4,52±0,11	1,57±0,07
PH _{PVC_15}	3,46±0,14	1,68±0,04
PH _{PVC_20}	2,76±0,09	1,84±0,13
PH _{CAR_05}	7,58±0,34	0,9963±0,0047
PH _{CAR_10}	7,15±0,27	0,9372±0,0091
PH _{CAR_15}	6,59±0,22	0,8903±0,0051
PH _{CAR_20}	5,09±0,31	0,8435±0,0062

A Figura 6 evidencia o ajuste polinomial do calor específico em função da concentração (%) de PVC (linha tracejada), $c_p(\%) = 7898 - 4170(\%) + 802(\%)^2$ e de CC (linha contínua), $c_p(\%) = 7883 + 79,44(\%) - 702,5(\%)^2$.

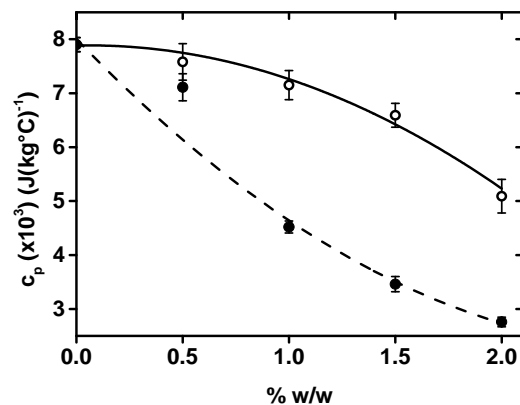


Figura 6: Calor específico dos PH_{PVC} (●) e PH_{CC} (○) em função da concentração (% w/w). As linhas contínua e tracejada representam o ajuste polinomial.

Diferente comportamento apresenta a condutividade térmica, no caso do PVC o comportamento é não linear

$(k_T(\%)=1,39+0,16(\%)+0,020(\%)^2)$, entretanto para a CC é linear ($k_T(\%)=1,046-0,103(\%)$), como se observa na Figura 7.

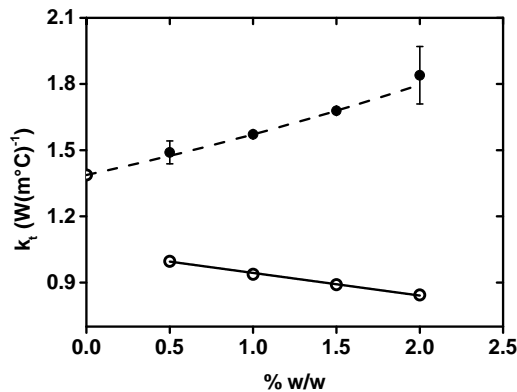


Figura 7: Condutividade térmica dos PH_{PVC} (●) e PH_{CC} (○) em função da concentração (%w/w). As linhas contínua e tracejada representam o ajuste linear e polinomial respectivamente.

Discussão

O comportamento da velocidade do som em função da temperatura em phantoms a base de parafina gel foi analisado. Os PH, na faixa de temperatura de 20 a 30 °C podem manter as suas formas durante um longo tempo, devido ao fato de que a PG apresenta estabilidade química e não sofre desidratação. Uma vantagem de se trabalhar com PH_{PVC} ou PH_{CC} como um material mimetizador de tecido mole é que este permite se alterar a velocidade do US em função da concentração de pó de PVC ou CC. E para um mesmo phantom, dependendo da temperatura a que se submete, pode-se obter velocidades US diferentes, podendo mimetizar de tecido muscular (PH_{CC,05} a 20°C) a tecido adiposo (PH_{CC,05} a 30°C). Uma desvantagem é que a temperaturas maiores que 40°C o substrato dos phantoms (PG) inicia a deformação.

Os valores obtidos da condutividade térmica para os PH não atingiram a faixa de valores dos tecidos biológicos de acordo com a literatura, porém, para os PH_{CC}, ao se aumentar a concentração de CC diminui a condutividade, é de se esperar que essa tendência se mantenha para valores maiores que 2%w/w. Nesse caso pode-se atingir valores dados na literatura para os tecidos moles (0,47–0,56 W(m°C)⁻¹) [11]. Uma descontinuidade em baixa concentração de CC (0 - 0,5%w/w) pode ser observada, o que indica que se deve estudar com mais detalhe o comportamento de concentrações menores que 0,5%w/w. Na análise do calor específico, observou-se uma redução do valor com o aumento da porcentagem de PVC ou CC. Em particular o PH_{PVC,20} apresenta um valor próximo à epiderme (2675 J(kg°C)⁻¹). Dada a possibilidade de regular a concentração do pó de PVC e a relação polinomial entre o c_p e (%w/w), uma boa combinação permite obter um calor específico semelhantes aos

tecidos moles. Os valores dados na literatura são 3,8–3,9($\times 10^3$) J(kg°C)⁻¹ [11], pode-se atingir valores semelhantes regulando a concentração de PVC entre 1,0–2,0%w/w.

Conclusão

Gerou-se um conjunto de phantoms que foram caracterizados termicamente e acusticamente em função da temperatura e da concentração do policloreto de vinila ou cera de carnaúba. Observou-se a versatilidade dos phantoms para mimetizar a velocidade de som. O mesmo phantom, a diferentes temperaturas, apresenta valores de velocidade de diferentes tecidos. Phantoms com diferentes proporções de PVC ou CC, a idêntica temperatura, mimetizam tecidos diferentes. A tendência das propriedades térmicas analisadas sugere que uma análise mais aprofundada dos resultados pode levar a faixas de interesse.

Para trabalhos futuros, sugere-se que sejam feitas análises com outras concentrações. Pretende-se verificar o comportamento do coeficiente de atenuação em função da temperatura e concentrações, além de determinar a elasticidade dos materiais por meio do módulo de Young.

Agradecimentos

À CAPES, FAPERJ e CNPq pelo apoio financeiro.

Referências

- BROWNE, J. E. et al. Assessment of the acoustic properties of common tissue-mimicking test phantoms. **Ultrasound in Medicine & Biology**, V. 29, N 7, 2003. 1053–1060.
- CULJAT, M. O. et al. A review of tissue substitutes for ultrasound imaging. **Ultrasound Med Biol**, 36, 2010. 861–873.
- SURRY KJM, K. J. M. et al. Poly(vinyl alcohol) cryogel phantoms for use in ultrasound and MR imaging. **Phys Med Biol**, 49, 2004. 5529–5546.
- MADSEN, E. L. et al. Tissue mimicking materials for ultrasound phantoms. **Med Phys**, 5, 1978. 391–394.
- ROWND, J. J. et al. Phantoms and automated systems for testing the resolution of ultrasound scanners. **Ultrasound Med. Biol.**, 23 N. 2, 1997. 245–260.
- SOMMER, F. et al. A phantom for imaging biological fluids by ultrasound and CT scanning. **Ultrasound Med Biol.**, 6, 1980. 135–140.
- ZAGZEBSKI, J.; MADSEN, Y. Ultrasonics phantoms. **IEEE Trans. Nuclear Science**, NS-27, 3, 1980. 1176–1180.
- VIEIRA, L. et al. Paraffin-gel tissue-mimicking material for ultrasound-guided needle biopsy phantom. **Ultrasound in Med. & Biol.**, Vol. 39, No. 12, 2013. 2477–2484.

9. MAGGI, L. et al. Internationl Work-conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. **IWBBIO 2013**, 2013. Disponível em: <<http://iwbbio.ugr.es/2013/papers.php>>. Acesso em: 03 set. 2014.
- 10 MAGGI, E. Teses e Dissertações. **Programa de Engenharia Biomédica**, 2011. Disponível em: <http://fenix3.ufrj.br/60/teses/coppe_d/LuisEduardoMaggi.pdf>. Acesso em: 03 set. 2014.
- 11 BACON, D. R.; SHAW, A. Experimental validation of predicted temperature rises in tissue mimicking Materials. **Phys. Med. Biol.**, v.38, 1993. 1647-1659.