

Lista de exercícios 2

Propagação da onda acústica, atenuação, absorção e espalhamento

- 1) (a) Encontre a velocidade do som no hidrogênio em 1 atm e 0° C a partir de seus valores de  $p_0$ ,  $\rho_0$  e  $\gamma$ . (b) Compare com o valor tabelado (1269,5 m/s). (c) Qual erro na temperatura resultaria na mesma diferença encontrada? ( $\gamma = 1,41$ ;  $\rho_0 = 0,090 \text{ Kg/m}^3$  para  $T = 0^\circ \text{C}$  em 1 atm)

- 2) (a) Por meio da equação abaixo:

$$c(P, t) = 1402,7 + 488t - 482t^2 + 135t^3 + (15,9 + 2,8t + 2,4t^2)(P_G / 100),$$

Sendo  $t$  a temperatura, determine a velocidade do som em água destilada à pressão atmosférica e à temperatura de 30° C. ( $t = T/100$ ,  $T$ : temperatura em °C e  $P_G$  é a pressão Guage em Bar (1 atm = 1,01325 bar))

- 3) A partir dos dados coletados em sala e disponibilizados no Stoa verifique se a relação abaixo é válida.

$$C_{H_2O}(T) = 1,402385 \times 10^3 + 5,038813 T - 5,799136 \times 10^{-2} T^2 + 3,287156 \times 10^{-4} T^3 - 1,398845 \times 10^{-6} T^4 + 2,787860 \times 10^{-9} T^5$$

- 4) Mostrar que as variações de densidade e deslocamento também obedecem à equação da onda.
- 5) Usando  $p = Ae^{j(\omega t - k_x x - k_y y - k_z z)}$  para uma onda oblíqua, obtenha a velocidade da partícula e mostre que ela é paralela ao vetor de propagação.
- 6) Se  $p = P \exp[j(\omega t - kx)]$ , encontre (a) a densidade acústica, (b) a velocidade da partícula, (c) a densidade de energia instantânea e (d) a intensidade.
- 7) Para uma onda acústica composta da superposição de duas ondas propagando-se na direção +x, mas com diferentes frequências, mostre que a impedância acústica específica é  $\rho_0 c$ .
- 8) Uma onda ultrassônica plana de 1 MHz no tecido biológico tem um pico de amplitude de pressão acústica de 100 Pa. (a) Qual a sua intensidade (b) Qual a máxima amplitude de deslocamento da partícula? (c) Qual a máxima amplitude da velocidade de partícula? (d) Qual a sua pressão efetiva ou rms?

- 9) Uma onda plana de 1 MHz em água, à pressão efetiva de 200 Pa (rms) incide normalmente na interface ar-tecido. (a) Qual é a pressão efetiva da onda plana transmitida para o tecido? (b) Qual é a intensidade da onda incidente no ar e da onda transmitida para o tecido? (c) Expresse, em dB, a razão entre a intensidade da onda transmitida no tecido pela intensidade da onda incidente no ar.
- 10) Uma onda plana incide normalmente na interface tecido-osso. (a) Encontre os coeficientes de pressão e intensidade de transmissão. (b) Encontre a mudança nos níveis de pressão e de intensidade considerando que a  $P_{referência}$  é a mesma em ambos os meios.
- 11) Uma onda plana de 5 MHz se propagando em água, colide normalmente com um osso de 1 cm de espessura. (a) qual é a perda de transmissão, expressa em dB, através da placa de osso? (b) Qual é o coeficiente de reflexão potencial desta placa? (c) Repita (a) e (b) para uma placa de borracha esponjosa de 1,5 cm de espessura com densidade de  $500 \text{ kg/m}^3$  e uma velocidade de onda longitudinal de 1000 m/s.
- 12) Mostre que a transmissão de uma onda acústica através de uma placa com impedância acústica igual a  $Z_2=(Z_1Z_3)^{1/2}$  será máxima quando sua espessura for igual à um quarto de comprimento da onda ultrassônica ( $d=\lambda/4$ ). Sendo  $Z_1$  e  $Z_3$  a impedância acústica dos meios 1 e 3 separados pela placa e  $Z_2$  a impedância acústica da placa.
- 13) Uma onda plana se propagando na água com uma amplitude de pressão de 100 Pa é incidente a  $45^\circ$  em uma base de cerâmica, considerando  $\rho_{cerâmica} = 2000 \text{ kg/m}^3$  e  $c_{cerâmica} = 1000 \text{ m/s}$ . Calcule (a) o ângulo do feixe transmitido para a cerâmica, (b) A amplitude de pressão do feixe transmitido, (c) A amplitude de pressão do feixe refletido.
- 14) Supondo uma incidência oblíqua com ângulo de incidência ( $\theta_i=15^\circ$ ) na interface tecido-osso, calcule: a) o ângulo de transmissão; b) o ângulo crítico ( $\theta_c$ ); c) o percentual de reflexão e transmissão da pressão d) o percentual de reflexão e transmissão da intensidade.

- 15) (a) Quais os processos físicos pelos quais a onda ultrassônica pode ser atenuada?  
(b) Qual a dependência desses processos com a frequência de propagação da onda?

16) Diferencie atenuação de absorção e espalhamento.

- 17) Por que a atenuação da onda ultrassônica tem uma dependência quadrática com a frequência e no caso de tecidos biológicos não? Ou seja, na equação abaixo  $y = 2$  para água e  $1,0 < y < 1,5$  para tecidos. A partir dessa observação você afirmaria que a atenuação em tecidos é mais afetada por espalhamento ou absorção?

$$\alpha(f) = \alpha_0 |f|^y$$

18) Defina e descreva as três classes de espalhadores observadas em imagens de ultrassom.

- 19) Usando as mesmas estratégias usadas para dedução da equação da onda acústica sem perdas, mostre que a equação acústica com perdas por viscosidade é:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\eta}{B} \frac{\partial^3 p}{\partial x^2 \partial t} - \frac{\rho_0}{B} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0$$

Mostre também que a equação abaixo é solução da equação anterior.

$$p(x, t) = P_0 e^{-\alpha x} e^{j(\omega t - kx)}$$

20) Defina  $\alpha$  e  $\eta$  usados no problema 19.

21) Defina seção de choque de espalhamento, seção de choque diferencial de espalhamento e seção de choque de atenuação. Indique a unidade de cada uma dessas grandezas.

22) Qual seria a potência total espalhada por um glóbulo vermelho de  $8 \mu\text{m}$ , devido a uma onda incidente de 15 MHz com intensidade  $I = 1 \text{ W/cm}^2$ . Compare com o valor encontrado no exemplo em sala. Justifique a diferença.

23) (a) O que é o coeficiente de retroespalhamento e qual informação ele fornece?  
(b) Justifique a unidade de essa grandeza ser  $\text{cm}^{-1} \text{sr}^{-1}$ .

24) Porque o coeficiente de retroespalhamento é sempre calculado usando um valor de referência?

**Tabela de propriedade acústica de alguns materiais**

Material	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Velocidade (m/s)	Impedância acústica (kg/m <sup>2</sup> . s ou Rayls)
Ar	1.2	330	0.0004 x 10 <sup>6</sup>
Água (20oC)	1000	1480	1.48 x 10 <sup>6</sup>
Tecidos moles:	-	-	-
Média	1060	1540	1.63 x 10 <sup>6</sup>
Fígado	1060	1555	1.65 x 10 <sup>6</sup>
Músculo	1080	1580	1.70 x 10 <sup>6</sup>
Gordura	1054	1475	1.38 x 10 <sup>6</sup>
Mama	1020	1510	1.54 x 10 <sup>6</sup>
Osso médio	1912	4080	7,8 x 10 <sup>6</sup>
Osso do crânio	1786	3360	6,00 x 10 <sup>6</sup>
Sangue	1057	1575	1.62 x 10 <sup>6</sup>
Borracha de Silicone	1130	1026	1.27 x 10 <sup>6</sup>
Alumínio	507	6420	3,26 x 10 <sup>6</sup>

**Valores tabelados de H(x)**

X	H(x)
1,0	0,8801

1,2	0,8305
1,4	0,7743
1,6	0,7124
1,8	0,6461
2,0	0,5767
2,2	0,5054
2,4	0,4335
2,6	0,3622
2,8	0,2927
3,0	0,2260
3,2	0,1633
3,4	0,1054
3,6	0,053
3,8	0,0068
4,0	-0,0330
4,5	-0.1027
5	-0.1310