

Física para Engenharia II — 4320196

3^{as} – 13h10 / 5^{as} – 9h20 Sala C2-09

Márcia Regina Dias Rodrigues

DFN – IF – USP

Ed. Oscar Sala / Pelletron sala 222

Página do curso ([Stoa -> Cursos -> IF -> Poli -> 4320196](#))

<http://moodle.stoa.usp.br/course/view.php?id=722>

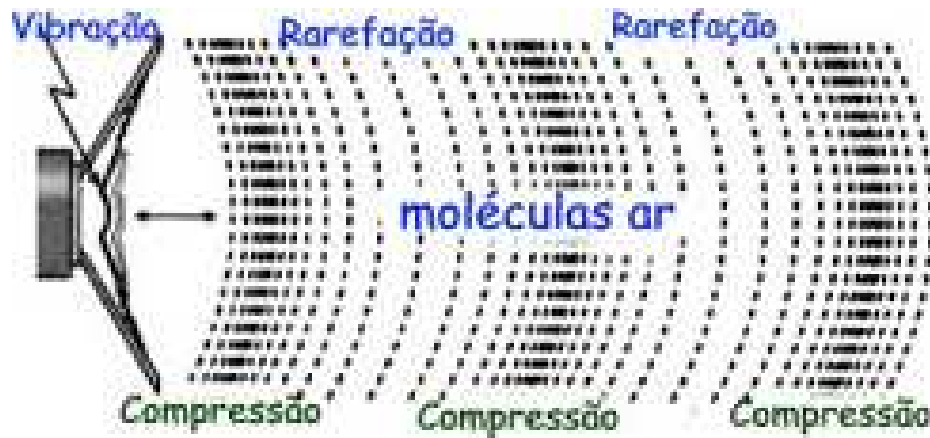
Natureza do som

Corpos em vibração → Som

Transmissão meio material

Oscilações Harmônicas Frequência $\sim 20\text{Hz}$ a 20kHz

Ondas sonoras na atmosfera



Ondas longitudinais

Variações de pressão

Compressões e rarefações

Zona de compressão

Onda de compressão



propagação

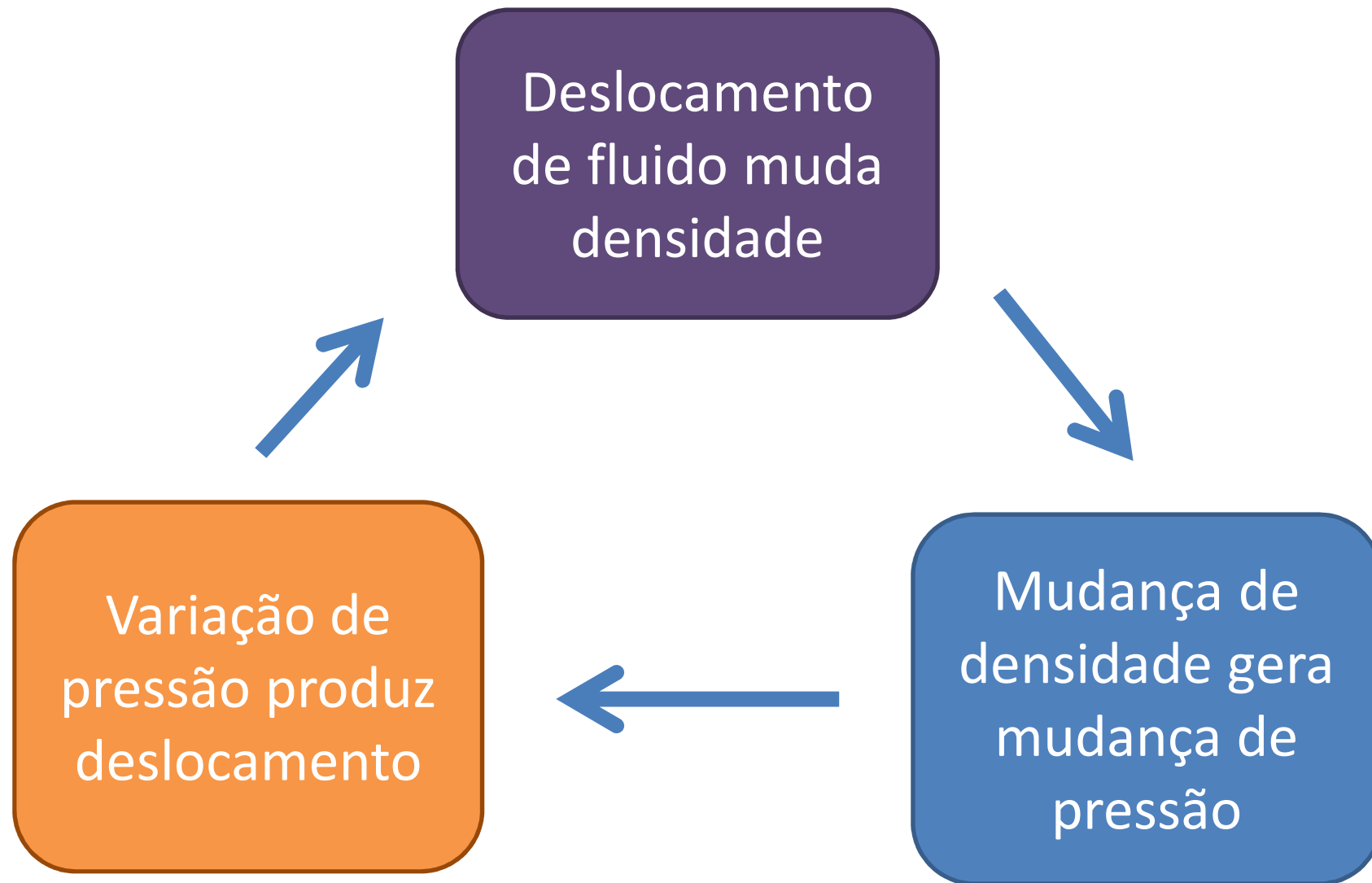
Zona de rarefação

Onda de expansão

Onda sonora



Propagação das camadas de
condensação e de rarefação
alternadas



Relação densidade - Pressão

Para uma dada massa fluido M ocupando volume V

Um acréscimo de
pressão $\Delta P > 0$



Diminuição de volume
 $\Delta V < 0$

Magnitude de variação
percentual de volume

$$-\Delta V / V$$

Mais
compressível

Módulo de
compressibilidade do fluido

$$K = - \frac{\Delta V / V}{\Delta P}$$

Relação densidade - Pressão

Módulo de
elasticidade
volumétrico

$$B = \frac{1}{K} = -\frac{\Delta P}{\Delta V / V}$$

$$\rho = M/V$$

Por diferenciação

$$\Delta \rho = -M \frac{\Delta V}{V^2} = -\rho \frac{\Delta V}{V}$$

$$B = \rho \left(\frac{\Delta P}{\Delta \rho} \right)$$

Relação densidade - Pressão

Variações de pressão e densidade

Extremamente
pequenas



Pertubação

$$P = p_0 + p$$

$$|p| \ll p_0$$

$$\rho = \rho_0 + \delta$$

$$|\delta| \ll \rho_0$$

Variações de pressão máxima que o ouvido pode tolerar sem dor

$$|p / p_0| < 10^{-3}$$

Relação densidade - Pressão

$$\frac{p}{\delta} = \frac{P - p_0}{\rho - \rho_0} = \frac{\Delta P}{\Delta \rho} = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_0$$

Derivada em torno dos
valores de equilíbrio

$$P \longrightarrow V \text{ e } T$$

Gases perfeitos

$$PV = nRT$$

Processo isotérmico

$$P = a\rho$$

$$\left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_T = a = \frac{P}{\rho}$$

$$\left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_{T,0} = \frac{P_0}{\rho_0}$$

Trocas de calor
com o meio
externo para
manter T cte

Relação densidade - Pressão

Gases perfeitos $PV = nRT$

Processo adiabático $P = b\rho^\gamma$

γ é a razão do calor específico do gás a pressão constante ao seu calor específico a volume constante

$$\left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_S = b\gamma\rho^{\gamma-1} = \gamma\frac{P}{\rho}$$

$$\left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_{S,0} = \gamma\frac{P_0}{\rho_0}$$

$\gamma > 0$, no caso adiabático e preciso uma elevação maior de pressão

Relação densidade - Pressão

$$B = \rho \left(\frac{\Delta P}{\Delta \rho} \right)$$

Módulo de
elasticidade
volumétrico

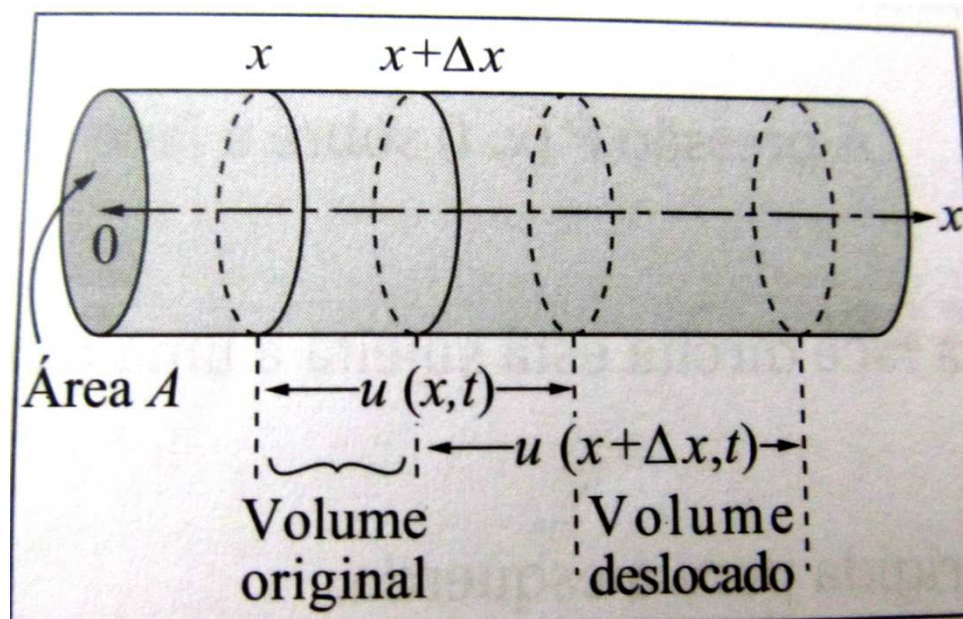
Processo isotérmico

$$B_T = P_0 = 1 / K_T$$

Processo adiabático

$$B_S = \gamma P_0 = 1 / K_S$$

Relação deslocamento - densidade



$u(x, t)$ deslocamento
sofrido pelas partículas
do fluido na seção
transversal

Volume original $V = A[(x + \Delta x) - x] = A\Delta x$

$$\begin{aligned} V + \Delta V &= A\{[(x + \Delta x) + u(x + \Delta x, t)] - [x + u(x, t)]\} \\ &= A\{\Delta x + [u(x + \Delta x, t) - u(x, t)]\} \end{aligned}$$

Relação deslocamento - densidade

$$\begin{aligned} V + \Delta V &= A\{[(x + \Delta x) + u(x + \Delta x, t)] - [x + u(x, t)]\} \\ &= A\{\Delta x + [u(x + \Delta x, t) - u(x, t)]\} \\ &= A\Delta x \left\{ 1 + \left[\frac{u(x + \Delta x, t) - u(x, t)}{\Delta x} \right] \right\} \approx A\Delta x \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \\ &\approx \frac{\partial u}{\partial x}(x, t) \end{aligned}$$

$$\Delta V = A\Delta x \frac{\partial u}{\partial x}(x, t)$$

Relação deslocamento - densidade

$$\Delta V = A\Delta x \frac{\partial u}{\partial x}(x, t) \quad \text{Dividindo por} \quad V = A\Delta x$$

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\partial u}{\partial x}(x, t)$$

$$\Delta \rho = -M \frac{\Delta V}{V^2} = -\rho \frac{\Delta V}{V}$$

$$\rho = \rho_0 + \delta$$

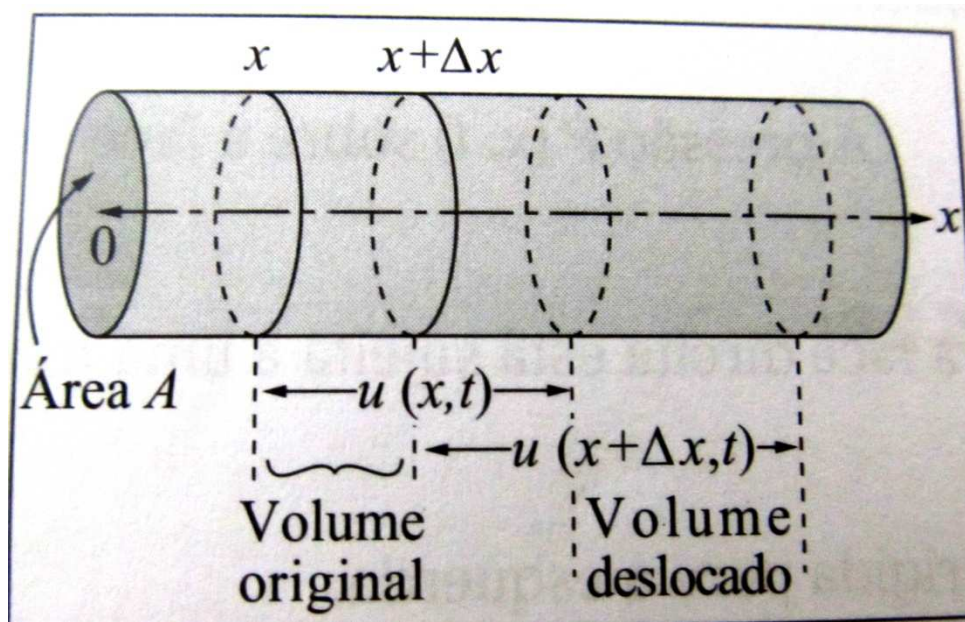
$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = -\frac{\Delta V}{V} = \frac{\partial u}{\partial x}(x, t) = \frac{\rho - \rho_0}{\rho} = \frac{\delta}{\rho} \approx \frac{\delta}{\rho_0}$$

$$\delta = \rho - \rho_0 = -\rho_0 \frac{\partial u}{\partial x}(x, t) > 0$$

rarefação

Variacao de densidade

Relação pressão - deslocamento



$$\Delta m = \rho \Delta V \approx \rho_0 A \Delta x$$

Pressao $P(x, t)$ sobre a face esquerda produz uma força

$$\Delta F_1 = P(x, t) A$$

Face direita

$$\Delta F_2 = -P(x + \Delta x, t) A$$

Relação pressão - deslocamento

A força resultante sobre Δm :

$$\begin{aligned}\Delta F &= \Delta F_1 + \Delta F_2 = [P(x, t) - P(x + \Delta x, t)]A \\ &= -A\Delta x \left[\frac{P(x + \Delta x, t) - P(x, t)}{\Delta x} \right]\end{aligned}$$

$$P = p_0 + p \qquad \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$\Delta F = -\Delta V \frac{\partial p}{\partial x}(x, t)$$

Relação pressão - deslocamento

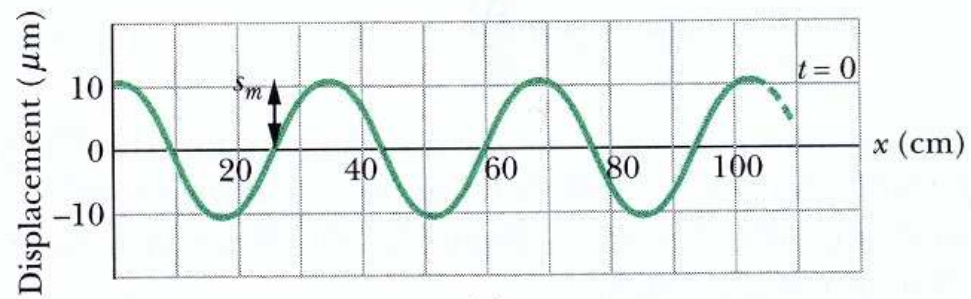
Aceleracao do
elemento de volume

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}(x, t)$$

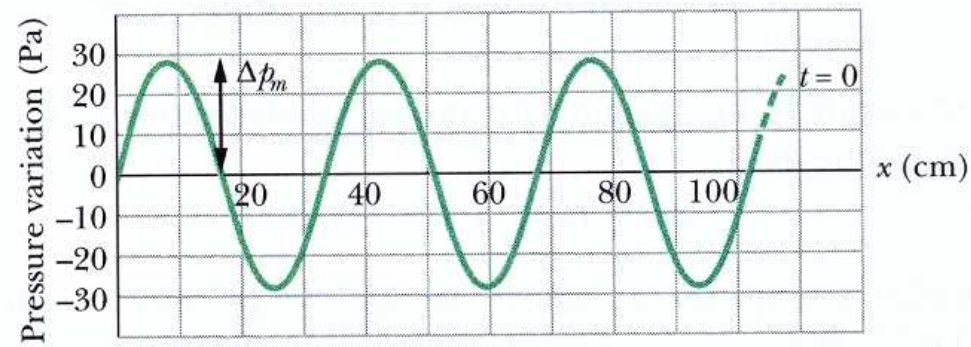
Segunda Lei de Newton

$$\Delta m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \rho_0 A \Delta x \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \Delta F = -A \Delta x \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$\rho_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\frac{\partial p}{\partial x}$$



(a)



(b)

FIGURE 18-6 (a) A plot of the displacement function (Eq. 18-13) for $t = 0$. (b) A similar plot of the pressure variation function (Eq. 18-14). Both plots are for a 1000 Hz sound wave whose pressure amplitude is at the threshold of pain; see Sample Problem 18-2.

Deslocamento
de fluido muda
densidade

$$\delta = -\rho_0 \frac{\partial u}{\partial x}$$

$$\rho_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\frac{\partial p}{\partial x} = \rho_0 \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_0 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

Variação de
pressão produz
deslocamento

Mudança de
densidade gera
mudança de pressão

$$p = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_0 \delta = -\rho_0 \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_0 \frac{\partial u}{\partial x}$$

Velocidade do som

$$\rho_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\frac{\partial p}{\partial x} = \rho_0 \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_0 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

$$\frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0$$

$$v = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_0}$$

Velocidade do som

$$\frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0$$

Derivando em relação a x

$$\frac{1}{v^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) = 0$$

$$\delta = -\rho_0 \frac{\partial u}{\partial x}(x, t)$$

$$p = -\rho_0 \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_0 \frac{\partial u}{\partial x}$$

$$\frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 \delta}{\partial x^2} = 0 = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$$

As variações de densidade e pressão obedecem a mesma equação

Propagam-se com mesmo v

Velocidade do som em gases

$$v = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_0}$$

Processo isotérmico

$$\sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_{T,0}} = \sqrt{\frac{p_0}{\rho_0}}$$

CNTP

$$P_0 = 1 \text{ atm} \approx 1,013 \times 10^5 \text{ N} / \text{m}^2$$

$$T = 0^\circ \text{C} = 273 \text{K}$$

$$\rho_0 \approx 1,293 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$\sqrt{\frac{p_0}{\rho_0}} \approx 280 \text{ m} / \text{s} \quad \neq 332 \text{ m} / \text{s}$$

Velocidade do som em gases

As compressões e expansões numa onda sonora são tão rápidas que não há troca de calor

Processo adiabático

$$v = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_{s,0}} = \sqrt{\gamma \frac{P_0}{\rho_0}}$$

$$\gamma \approx 1,4$$

$$v \approx 332 \text{ m/s}$$

Velocidade do som em gases

$$PV = nRT$$

$$n = \frac{M}{m} \quad \begin{array}{l} \longrightarrow \text{Massa do gas} \\ \longrightarrow \text{Massa molecular} \end{array}$$

$$P = \frac{M}{V} \frac{RT}{m}$$

$$\frac{P}{\rho} = \frac{RT}{m}$$

$$v = \sqrt{\gamma \frac{RT}{m}}$$

$$T = 20^{\circ}C = 293K$$

$$v \approx 344 \text{ m / s}$$

Velocidade do som na água

20 atm – 1 l água a T ambiente

$$-\frac{\Delta V}{V} \approx 0,09\% = 9 \times 10^{-4} \quad \Delta P \approx 2 \times 10^{-6} \text{ N / m}^2$$

$$B = \frac{1}{K} = -\frac{\Delta P}{\Delta V / V} \quad B = 2,2 \times 10^9 \text{ N / m}^2 \quad \begin{array}{l} \text{Módulo de} \\ \text{elasticidade} \\ \text{volumétrico} \end{array}$$

$$\rho_0 \approx 10^3 \text{ kg / m}^3$$

$$v = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_0} \quad B = \rho \left(\frac{\Delta P}{\Delta \rho}\right) \quad v = \sqrt{\frac{B}{\rho_0}} \quad v \approx 1483 \text{ m / s}$$

Ondas sonoras harmônicas - Intensidade

$$u(x, t) = U \cos(kx - \omega t + \delta)$$

$$\lambda = v\tau = \frac{v}{\nu}$$

Frequência $\sim 20\text{Hz}$ a 20kHz

$$\lambda \approx 1,7\text{cm} - 17\text{m}$$

$$p = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_0 \delta = -\rho_0 \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_0 \frac{\partial u}{\partial x} \quad v = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_0}$$

$$p(x, t) = -\rho_0 v^2 \frac{\partial u}{\partial x}(x, t) = v^2 \delta(x, t)$$

$$\delta = -\rho_0 \frac{\partial u}{\partial x}$$

Ondas sonoras harmônicas - Intensidade

$$p(x, t) = \wp \operatorname{sen}(kx - \omega t + \delta)$$

$$\wp = \rho_0 v^2 k U$$

Deslocamento e pressão defasadas de 90°

Amplitude de pressão

$$F = p(x, t)A = \wp A \operatorname{sen}(kx - \omega t + \delta)$$

$$F \frac{\partial u}{\partial t} = \omega \wp A U \operatorname{sen}^2(kx - \omega t + \delta)$$

$$I = \frac{1}{A} \overline{F \frac{\partial u}{\partial t}} = \frac{1}{2} \omega \wp U$$

$$I = \frac{1}{2} \rho_0 v \omega^2 U^2$$

Ondas sonoras harmonicas - Intensidade

$$I = \frac{1}{A} F \overline{\frac{\partial u}{\partial t}} = \frac{1}{2} \omega \wp U$$

$$I = \frac{1}{2} \rho_0 v \omega^2 U^2$$

$$I = \frac{1}{2} \frac{\wp^2}{\rho_0 v}$$

Em funcao da amplitude de pressao e independente da frequencia

Limiar de audibilidade

$$\nu = 10^3 \text{ s}^{-1}$$

$$I_0 \approx 10^{-12} \text{ W / m}^2$$

Ondas sonoras harmônicas - Intensidade

Limiar de audibilidade $\rho_0 \approx 1,293 \text{ kg} / \text{m}^3$

$$\nu = 10^3 \text{ s}^{-1} \quad v \approx 340 \text{ m} / \text{s}$$

$$I_0 \approx 10^{-12} \text{ W} / \text{m}^2 \quad \wp \approx 3 \times 10^{-5} \text{ N} / \text{m}^2$$

$$\omega = 2\pi \times 10^3 \text{ Hz}$$

$$U_0 \approx 1,1 \times 10^{-11} \text{ m} \approx 0,1 \overset{0}{\text{\AA}}$$

Ondas sonoras harmonicas - Intensidade

Limiar de sensacao dolorosa

$$\nu = 10^3 \text{ s}^{-1}$$

$$I_m \approx 1 \text{ W} / \text{m}^2$$

$$I_m \approx 10^{12} I_0$$

$$\sqrt{\frac{I_m}{I_0}} \approx 10^6$$

$$\wp_m \approx 30 \text{ N} / \text{m}^2 \sim 3 \times 10^{-4} \text{ atm}$$

$$U_m \approx 1,1 \times 10^{-5} \text{ m} \approx 10^{-2} \text{ mm}$$

Ondas sonoras harmonicas - Intensidade

Nivel de intensida sonora – escala logaritmica

Devido ao grande alcance de intensidades audiveis

A unidade e o bel

Dois sons diferem de um bel quando a intensidade e 10x maior

Intensidade de referencia I_0

$$\alpha = 10 \log_{10} (I / I_0) dB$$

Limiar audicao 0 dB

Conversa 60 dB

Concerto rock 110 dB

Limiar dor 120 dB

Sons musicais

periodicidade

Intensida, Altura e
Timbre

Altura – sons mais
graves e agudos

$$\nu = \frac{1}{\tau}$$

Maior - agudo

menor - graves

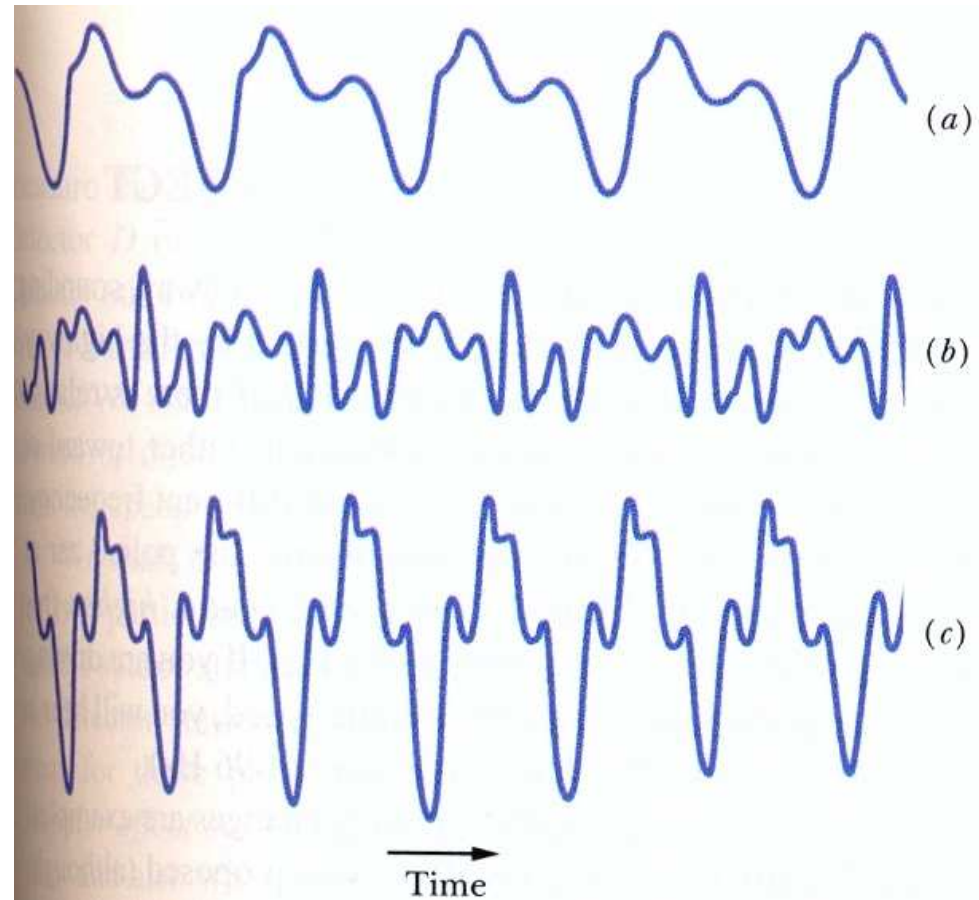


FIGURE 18-16 The wave forms produced by (a) a flute, (b) an oboe, and (c) a saxophone when they all play the same note, with the same first harmonic frequency.

Notas e escalas musicais

Sons com certas frequencias bem determinadas

$$\nu_2 = 2\nu_1$$

Intervalo de oitava

Os dois sons sao percebidos
como mesma nota musical
em altura diferentes

Nota	Freqüência	Nota	Freqüência
Dó	263,63 Hz	Fá # - Sol b	369,99 Hz
Dó # - Ré b	277,18 Hz	Sol	391,99 Hz
Ré	293,66 Hz	Sol # - Lá b	415,31 Hz
Ré # - Mi b	311,13 Hz	Lá	440,00 Hz
Mi	329,63 Hz	Lá # - Si b	466,16 Hz
Fá	349,23 Hz	Si	493,88 Hz

Timbre

Dois sons musicais de mesma Intensidade, altura podem diferir pelo timbre

Perfis diferentes

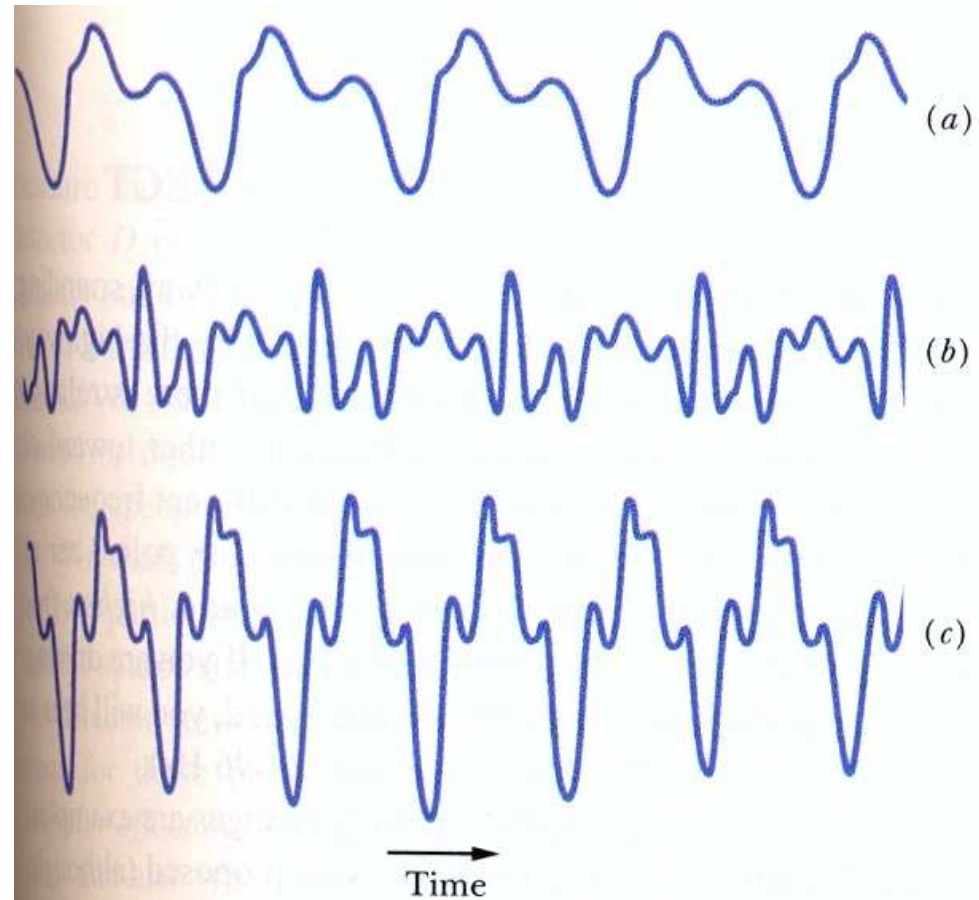


FIGURE 18-16 The wave forms produced by (a) a flute, (b) an oboe, and (c) a saxophone when they all play the same note, with the same first harmonic frequency.

Fontes sonoras

Modos normais de vibracao em colunas de ar

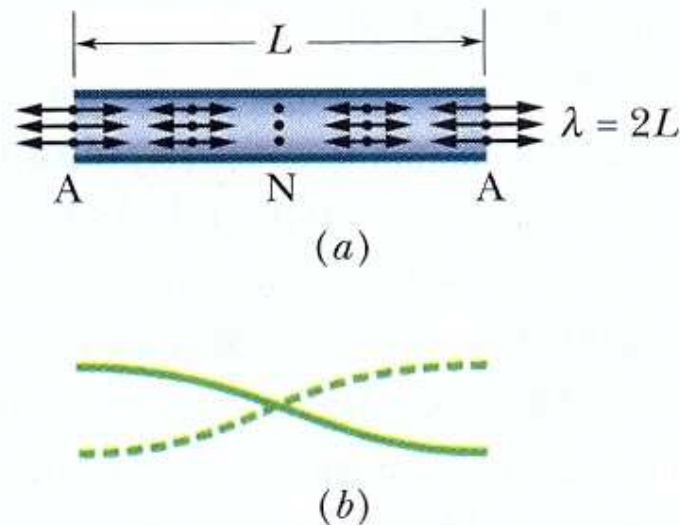
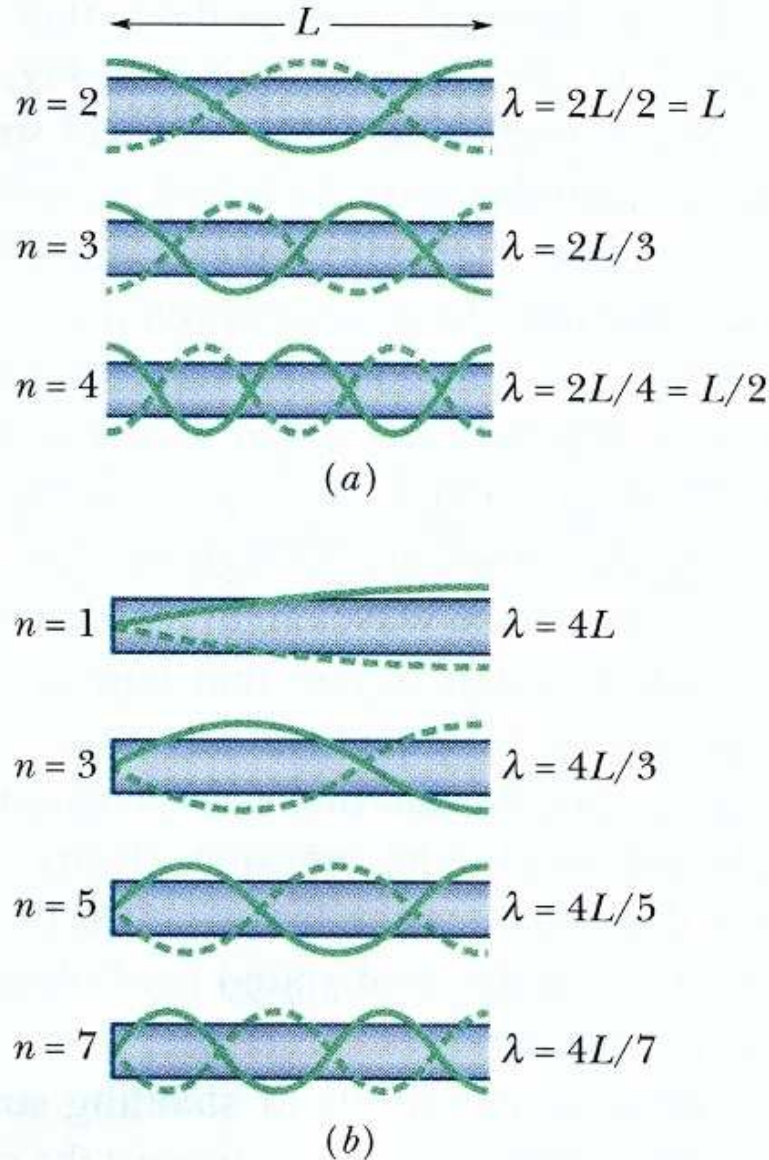


FIGURE 18-13 (a) The simplest standing wave pattern of displacement for (longitudinal) sound waves in a pipe with both ends open has an antinode (A) across each end and a node (N) across the middle. (The displacements represented by the double arrows are greatly exaggerated.) (b) The corresponding standing wave pattern for (transverse) string waves.

FIGURE 18-14 Standing wave patterns for string waves superimposed on pipes to represent standing sound wave patterns in the pipes. (a) With *both* ends of the pipe open, any harmonic can be set up in the pipe. (b) But with only *one* end open, only odd harmonics can be set up.



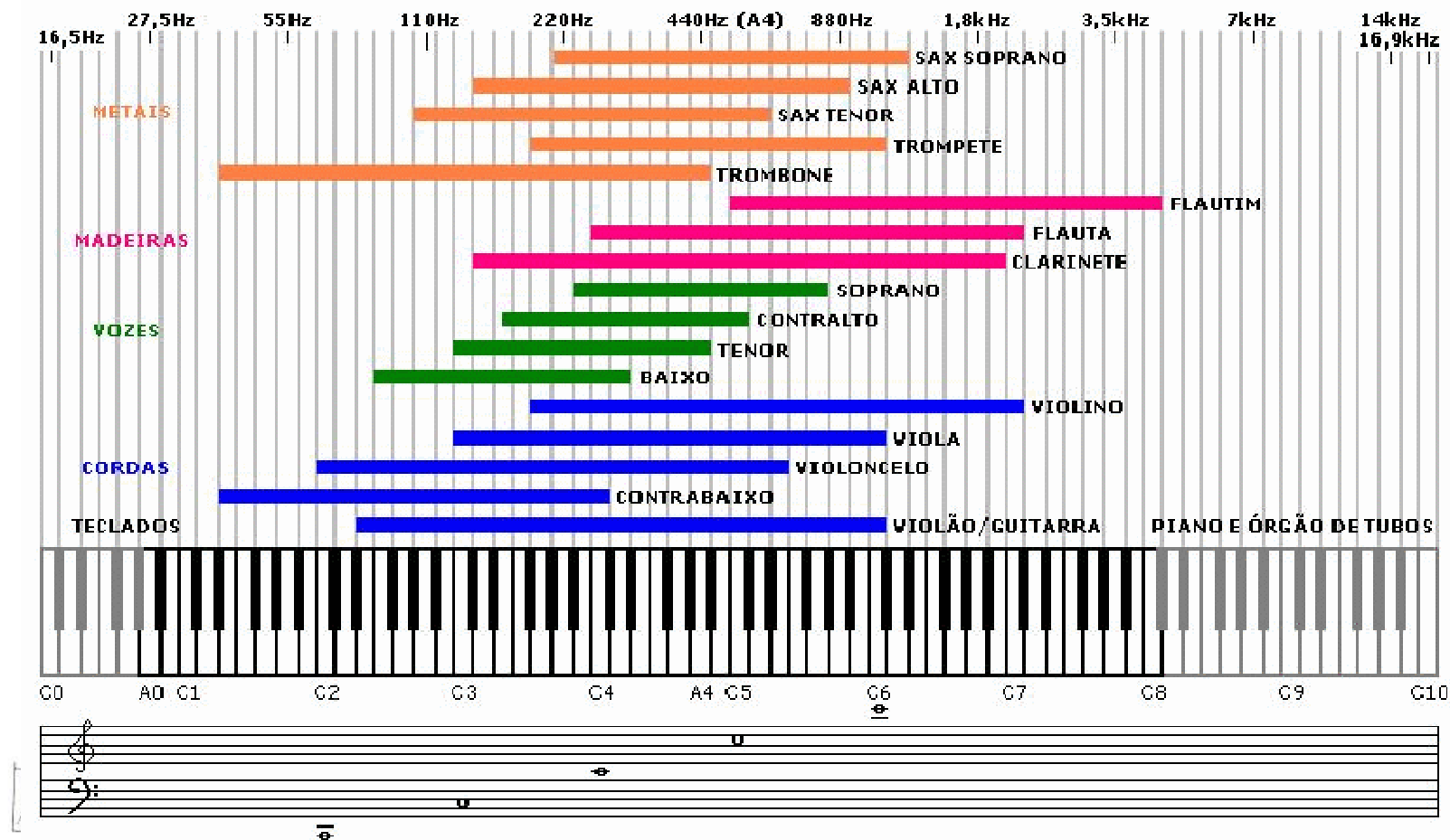


FIGURE 18-15 The saxophone and violin families, showing the relations between instrument length and frequency range. The frequency range of each instrument is indicated by a horizontal bar along a frequency scale suggested by the keyboard at the bottom; the frequency increases toward the right.

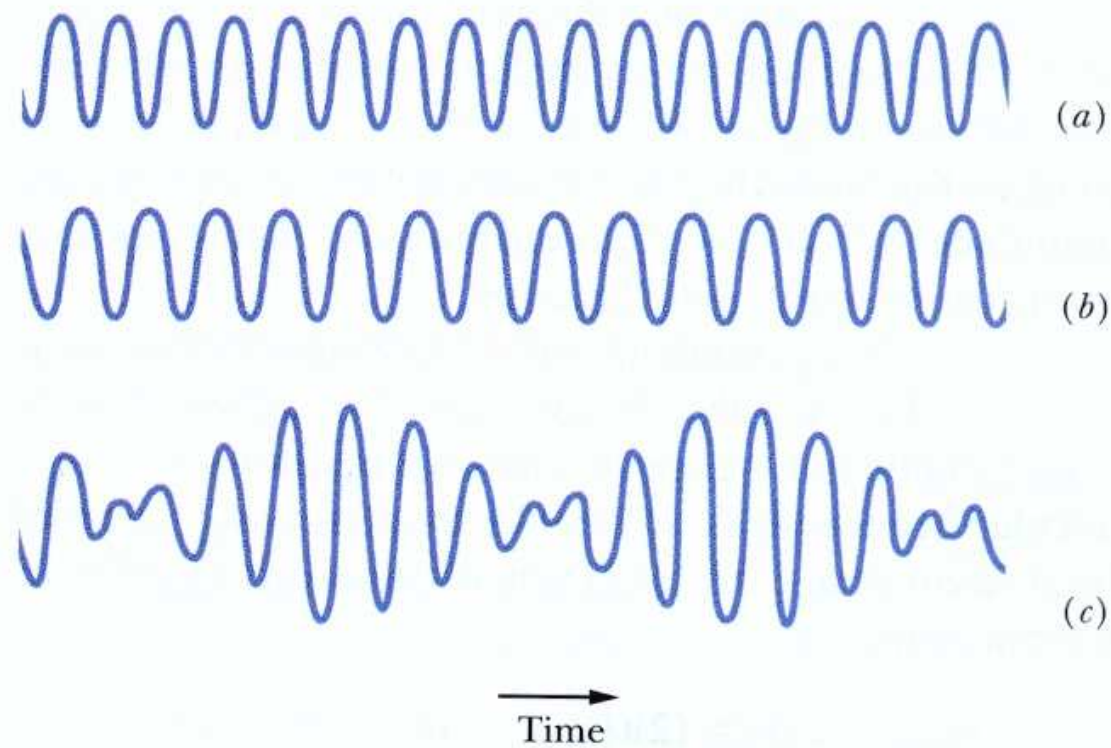


FIGURE 18-17 (a, b) The pressure variations Δp of two sound waves that are detected separately. The frequencies of the waves are nearly equal. (c) The resultant pressure variation if the two waves are detected simultaneously.

Ultra-sons

Frequência $\sim$ 20Hz a 20kHz

Sons audíveis

Frequência $<$ 20Hz

Infra-sons

Frequência $>$ 20kHz

Ultra-sons

Mesma natureza

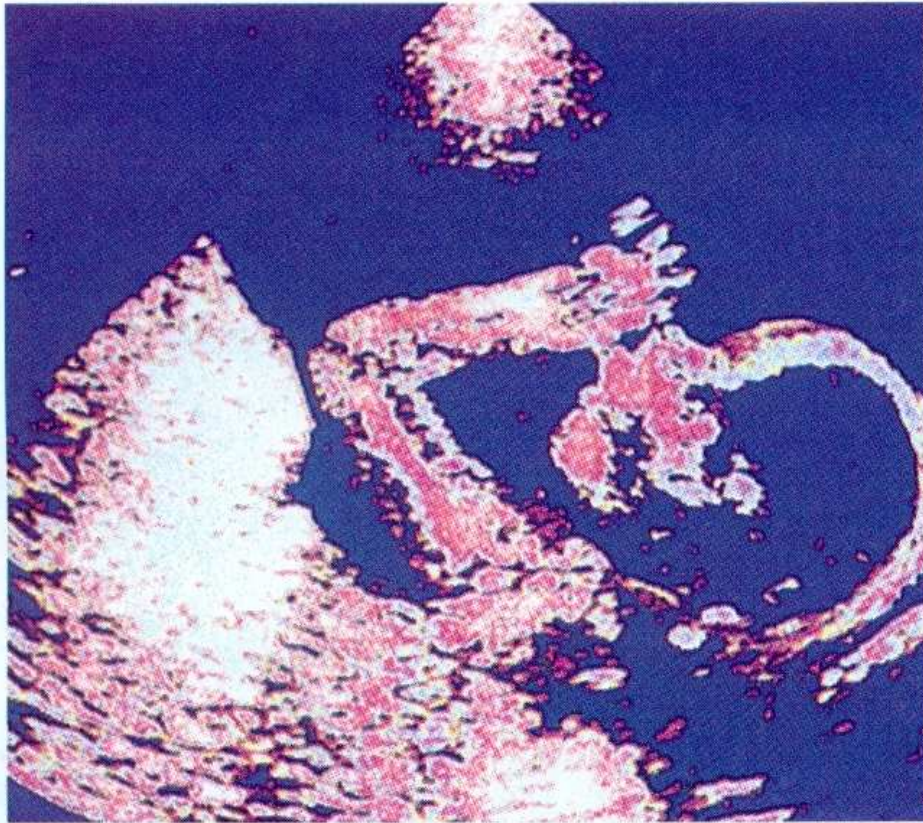


FIGURE 18-1 An ultrasound image of a fetus searching for a thumb to suck.

Detecao do eco