

Universidade de São Paulo
Instituto de Física de São Carlos - IFSC

FCM 208 Física (Arquitetura)

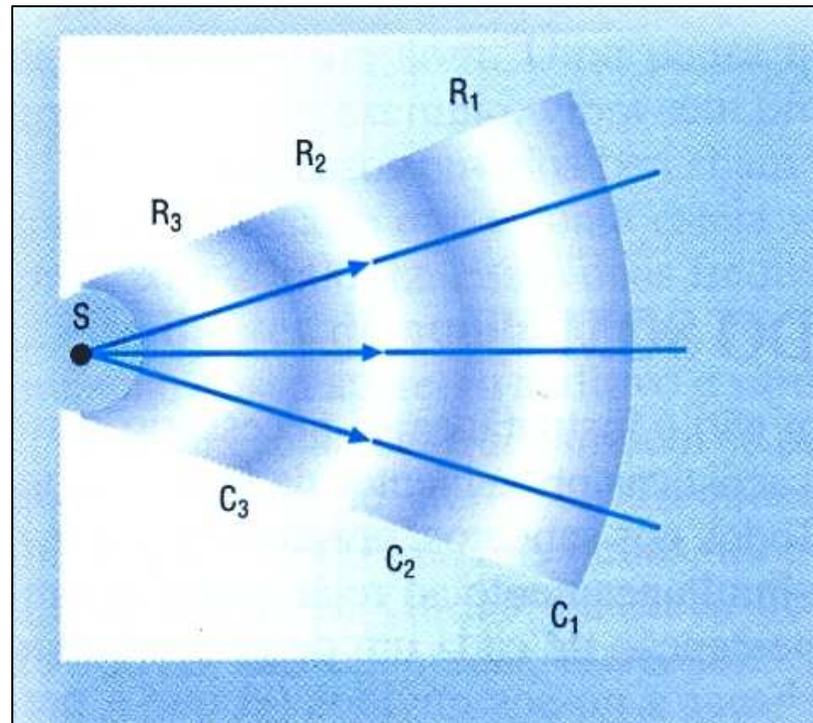
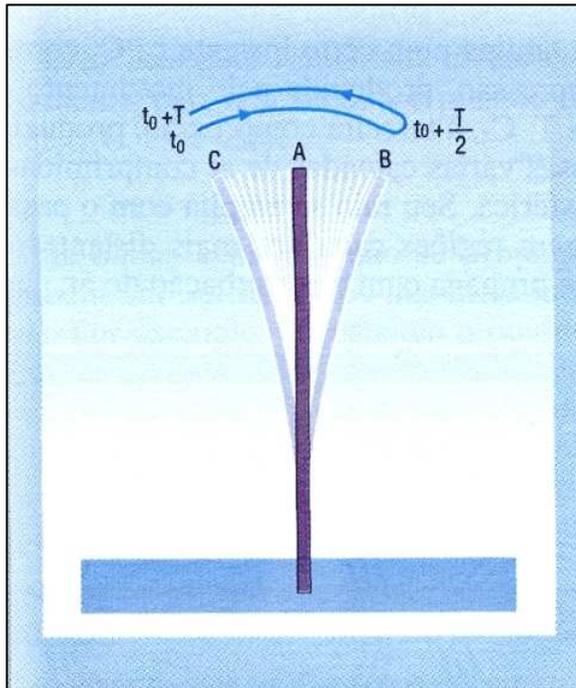
Som e Acústica
Primeira parte: ondas sonoras

Prof. Dr. José Pedro Donoso

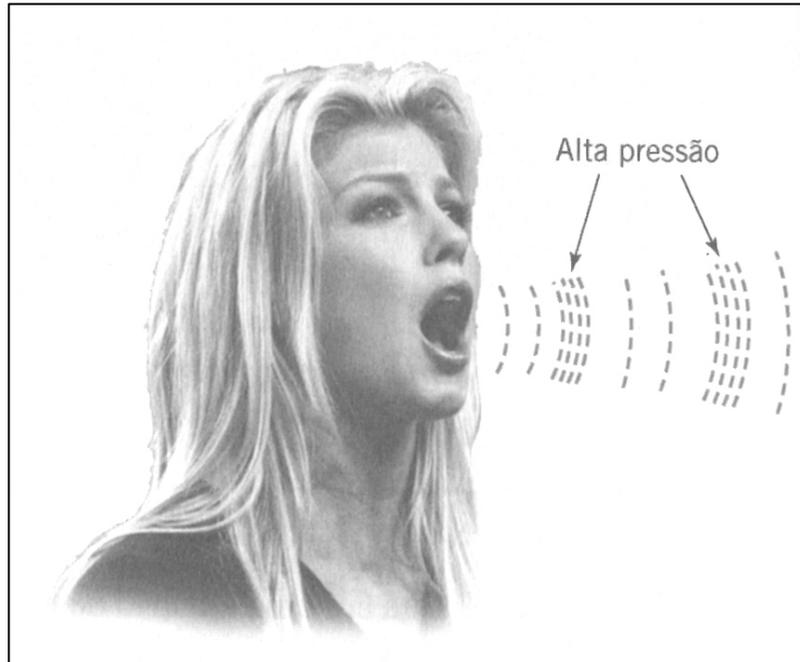
Natureza do som



O som é uma sensação auditiva que nossos ouvidos são capazes de detectar. Esta sensação é produzida pelo movimento organizado das moléculas que compõem o ar. Ao bater no *diapasão* provocamos uma *perturbação* que faz vibrar o ar e que se propaga até ser captada por nossos ouvidos, constituindo o que chamamos de som.



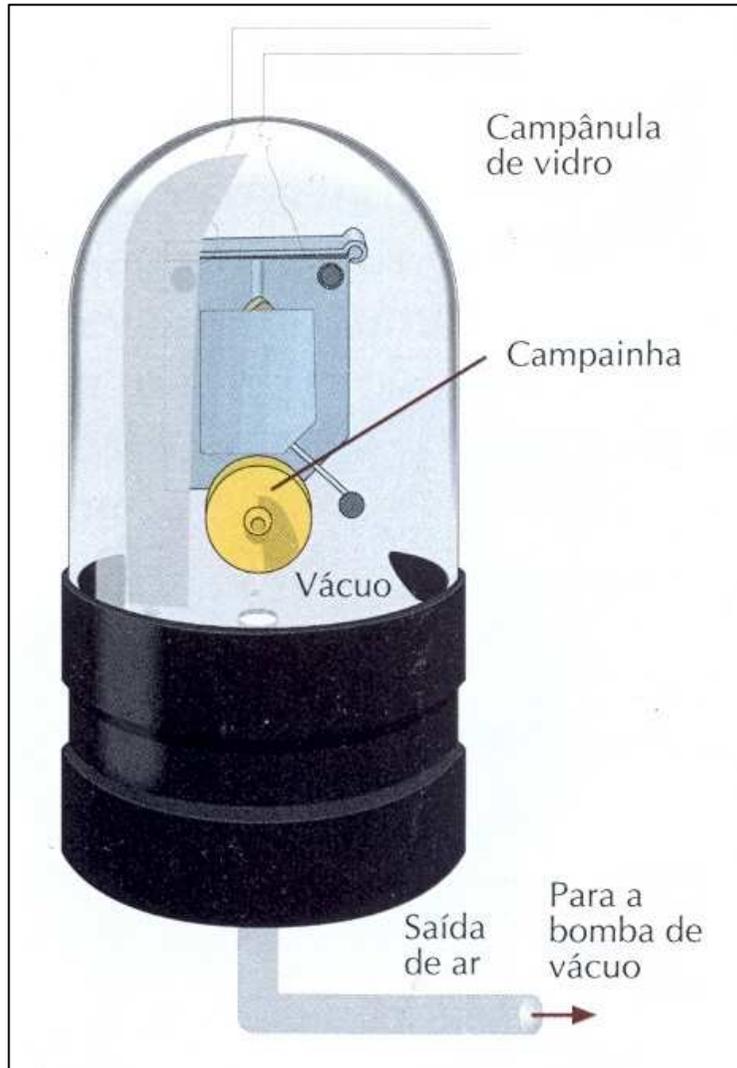
A onda sonora



A figura mostra, de forma esquemática, o aspecto de uma onda sonora depois de deixar a boca de uma pessoa. Os traços representam moléculas de ar.

Em algumas regiões, as moléculas estão mais concentradas; em outras estão mais rarefeitas. São estas **regiões de compressão e rarefação** que viajam pelo ar e constituem a onda sonora.

Trefil & Hazen. *Física Viva*
(Editora LTC, 2006)

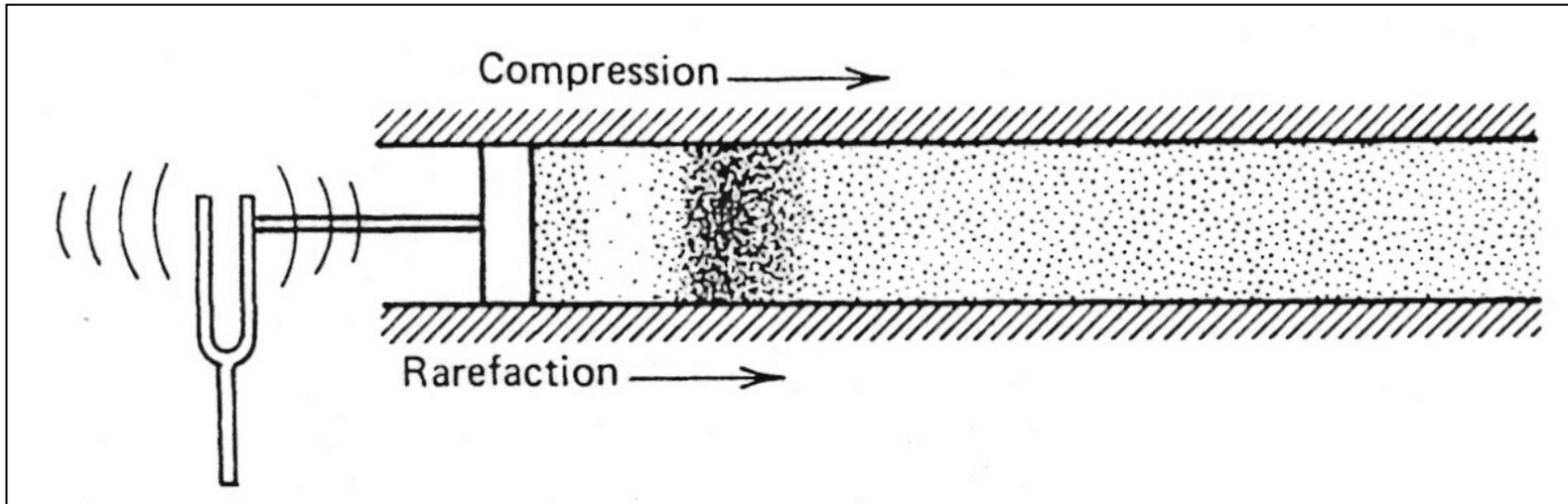


Propagação do som

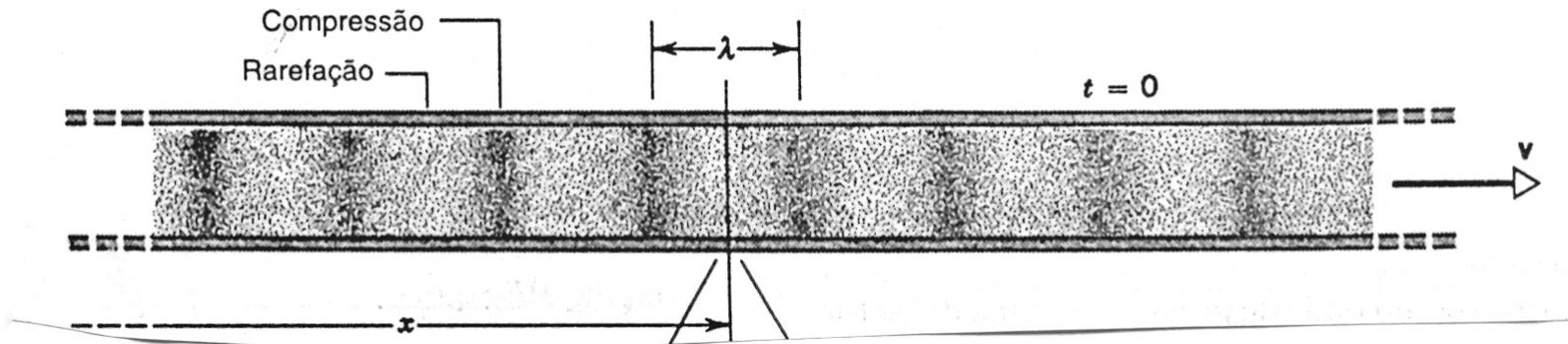
O som precisa de um **meio** para se propagar. As ondas de som são transmitidas através do ar e de outros materiais (gasosos, líquidos e sólidos). Uma campainha, por exemplo, ao ser tocada fará vibrar as moléculas de ar mais próximas.

Se a campainha é tocada dentro de uma campânula de vidro sem ar, não será escutado som nenhum.

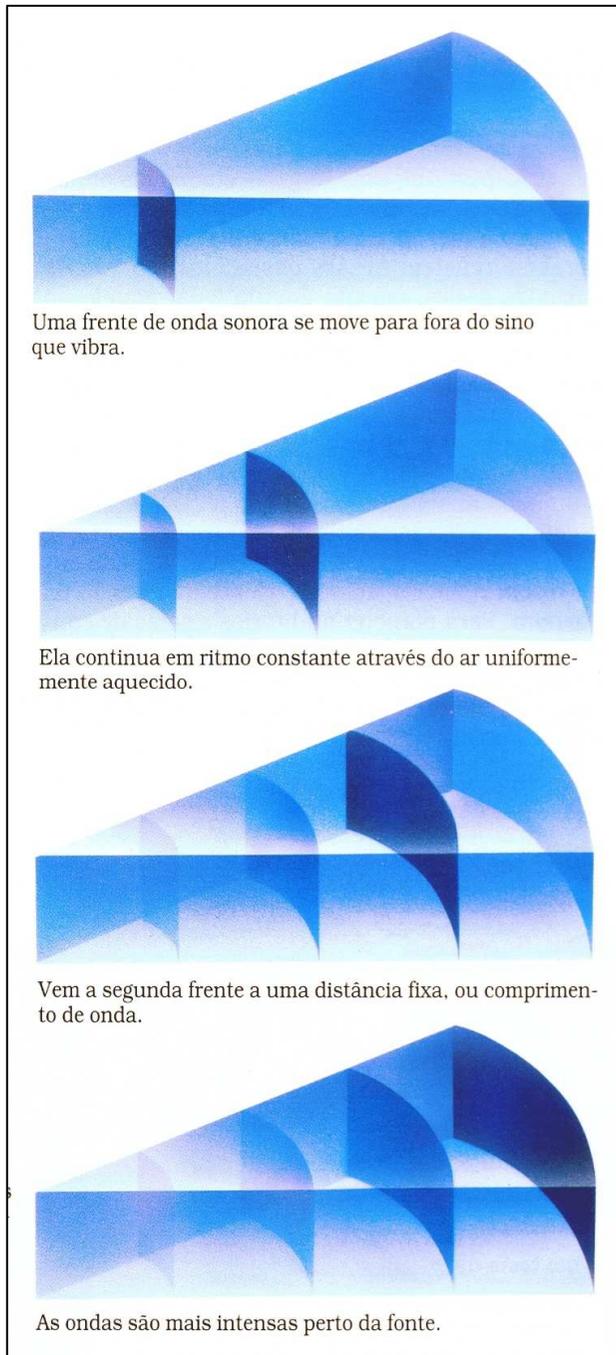
O som não se propaga no vácuo !



Quando se golpeia um gongo, o prato vibra entre duas posições extremas, comprimindo as porções adjacentes da atmosfera. Essa compressão vai-se transmitindo sucessivamente de cada camada às camadas adjacentes (onda de compressão). Quando o gongo retorna para trás, cria-se uma zona de rarefação e o ar da região contígua se desloca para preenchê-la, produzindo uma onda de expansão.



O deslocamento de ar provocado pelo prato muda a densidade do ar na camada adjacente, o que provoca uma **mudança de pressão** (compressão ou descompressão). A variação de pressão produz o deslocamento da camada de ar contígua, e assim por diante. O som, então constitui um movimento ondulatório, caracterizado por uma intensidade, uma frequência e uma velocidade de propagação.



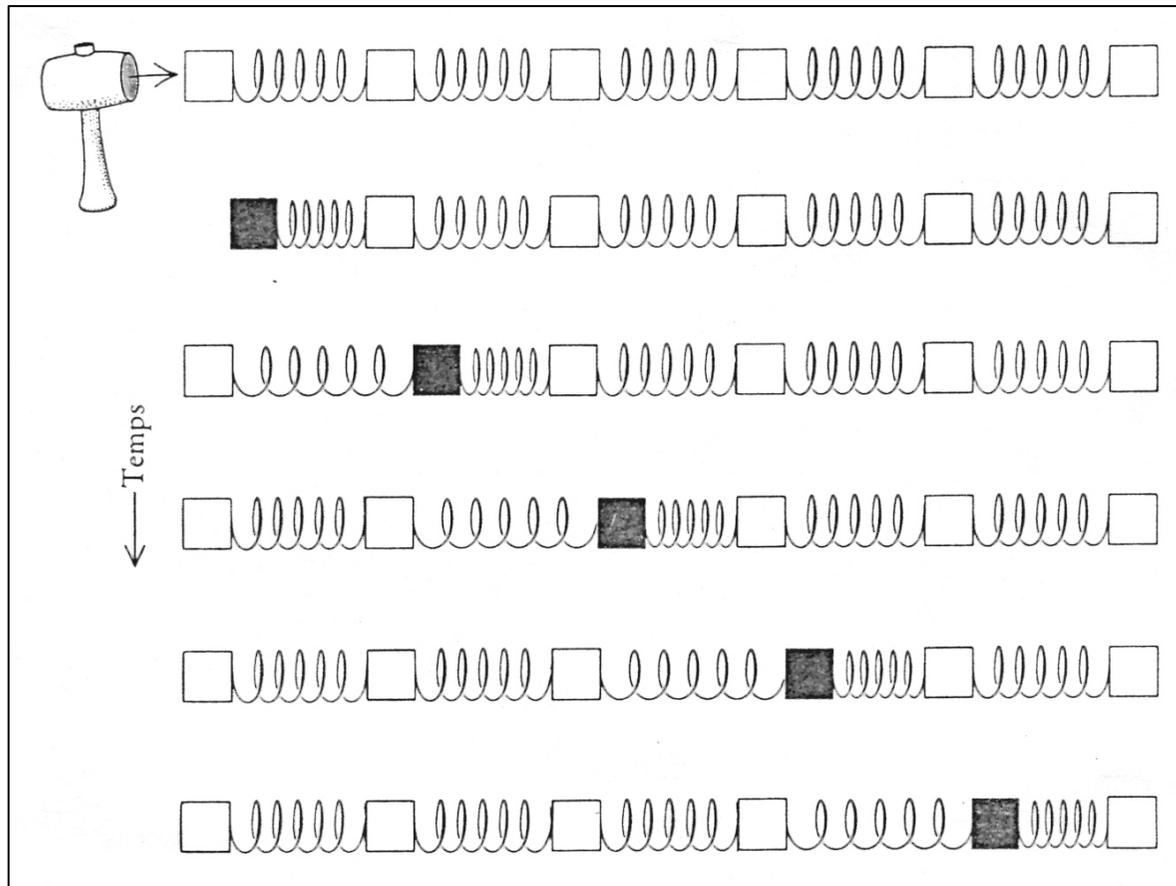
Propagação da onda sonora

As ondas sonoras se propagam através do ar .
As frentes de onda se movem a uma determinada velocidade.

A frequência de uma onda sonora é determinada pela contagem do número de frentes de onda que passam por um certo ponto em um determinado tempo.

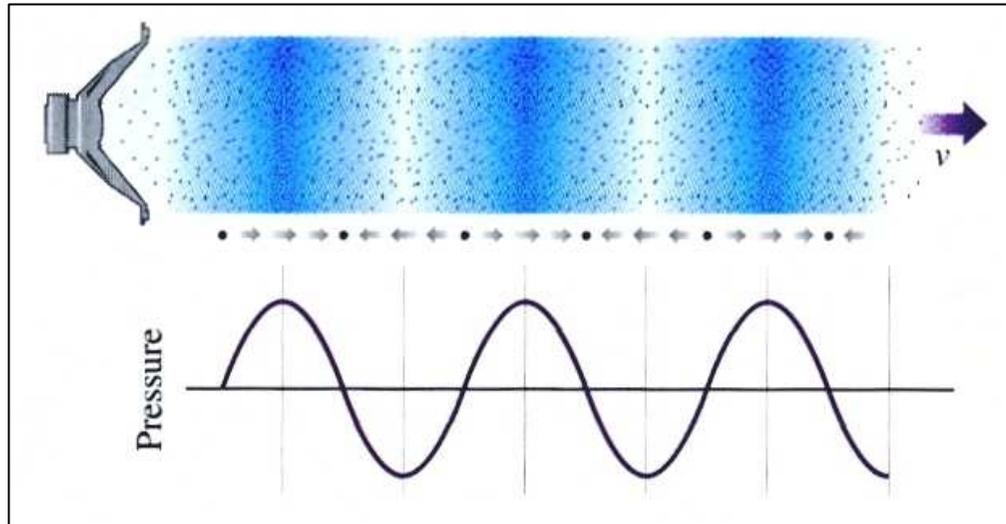
Coleção **Ciência & Natureza: Física**
Time – Life e Abril livros (1996)

As moléculas de ar vibram na direção em que o som se propaga
Por isso são chamadas **ondas longitudinais**.



J. Pierce, *Le son musicale* (Belin, Paris, 1983)

Onda sonora

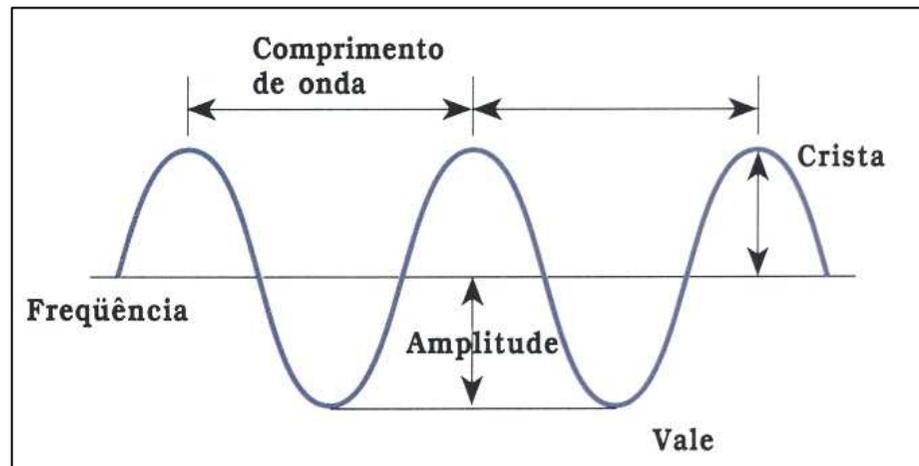


A onda sonora é caracterizada pela sua **frequência** (f), que corresponde ao número de vibrações por segundo (medida em hertz, Hz), e pelo seu

comprimento de onda (λ), que é a distância entre a crista de uma onda e a da seguinte.

A relação entre f , λ é a **velocidade do som** (v) é:

$$v = \lambda f$$



Velocidade do som

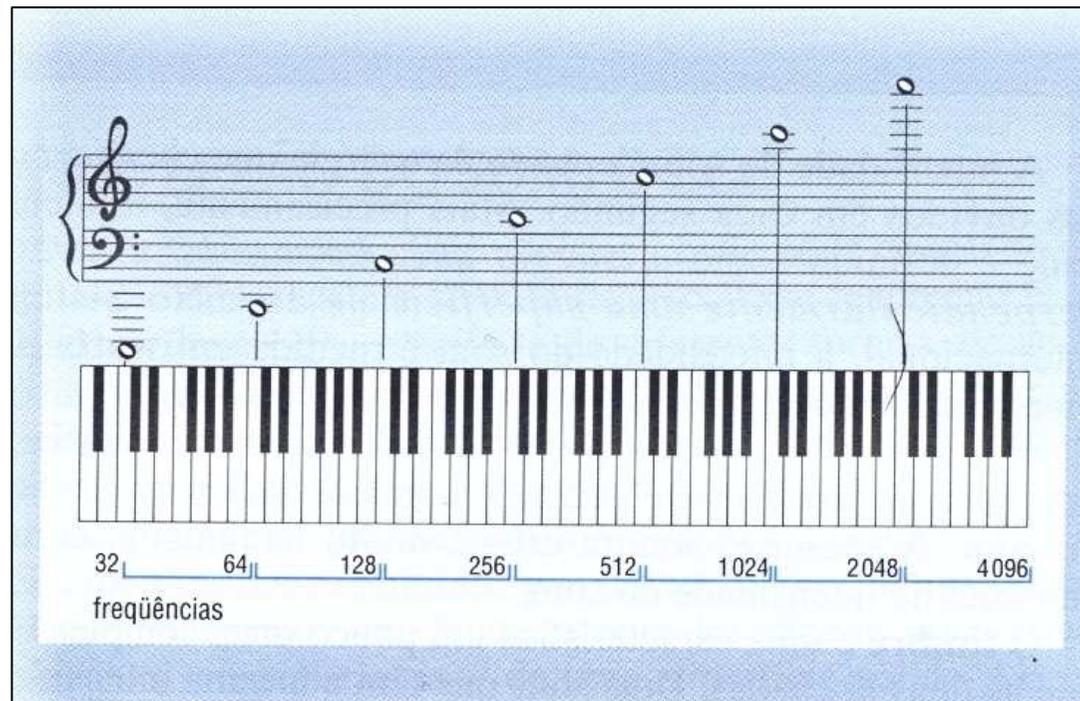
Médio	Velocidade
Alumínio a 20 ^o C	5.100 m/s
Vidro a 20 ^o C	5.130 m/s
Água a 20 ^o C	1.450 m/s
Ar a 20 ^o C	340 m/s
Ar a 0 ^o C	330 m/s

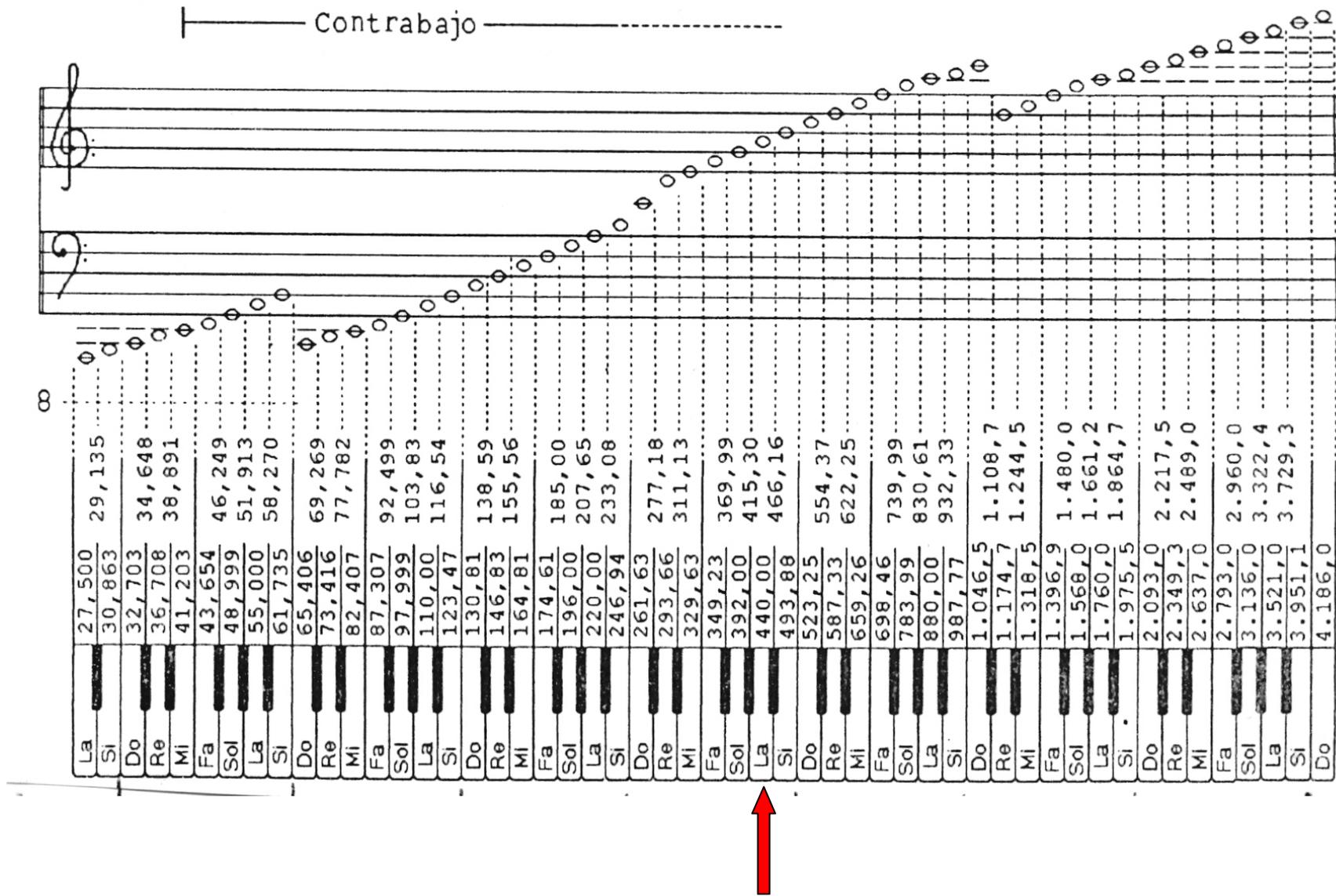
Exemplo: comprimento de onda (λ) da **nota Lá₄** (o Lá de *afinação* das orquestras sinfônicas), cuja frequência é 440 Hz, é $\lambda = v/f = (340)/(440) = 77$ cm (no ar)

Qualidades do som

A característica que distingue um **som musical** de um **ruído** é a periodicidade. As qualidades de um som musical são sua **intensidade**, **altura** e **timbre**.

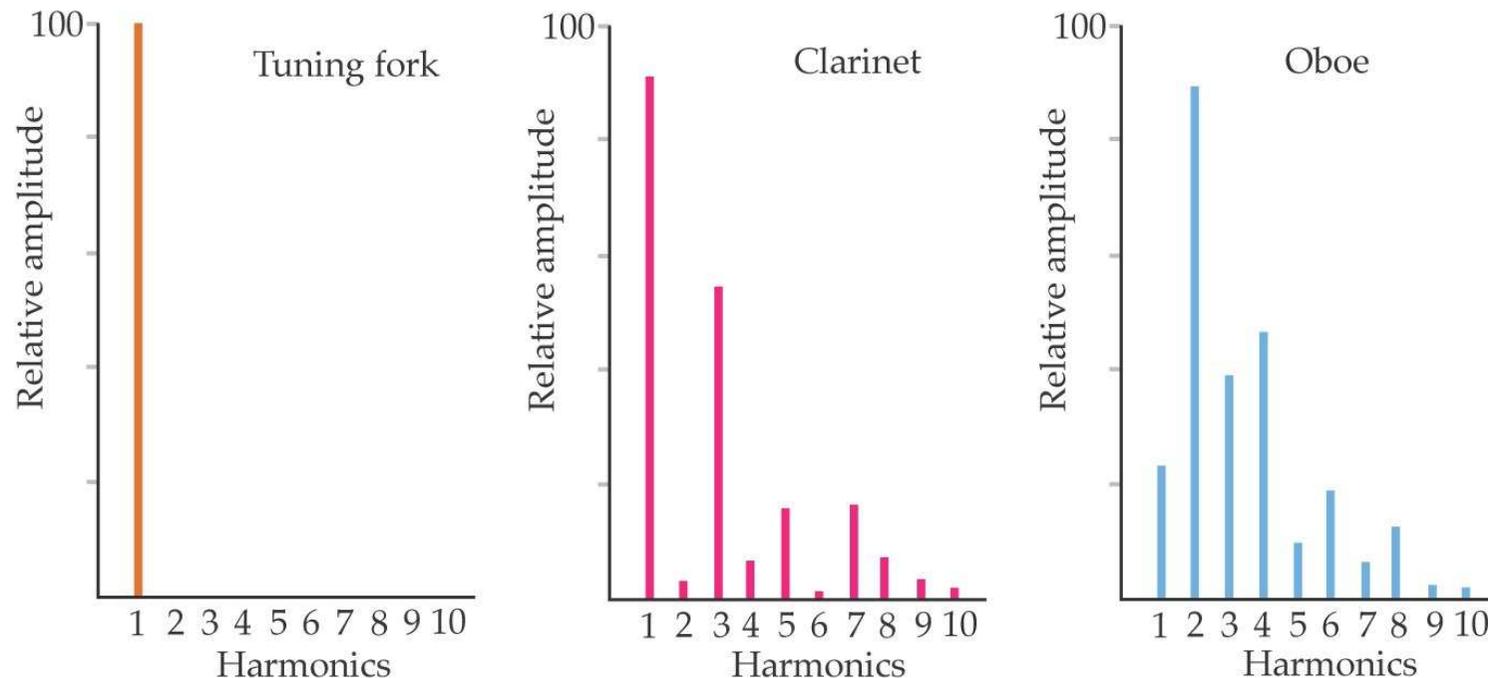
Altura (tom): é a qualidade que permite ao ouvido diferenciar sons graves de sons agudos. Ela depende apenas da **frequência** do som. A nota mais baixa do piano é o La_0 , de frequência $f = 27.5$ Hz, e a nota mais alta é o Do_8 , de $f = 4186$ Hz.



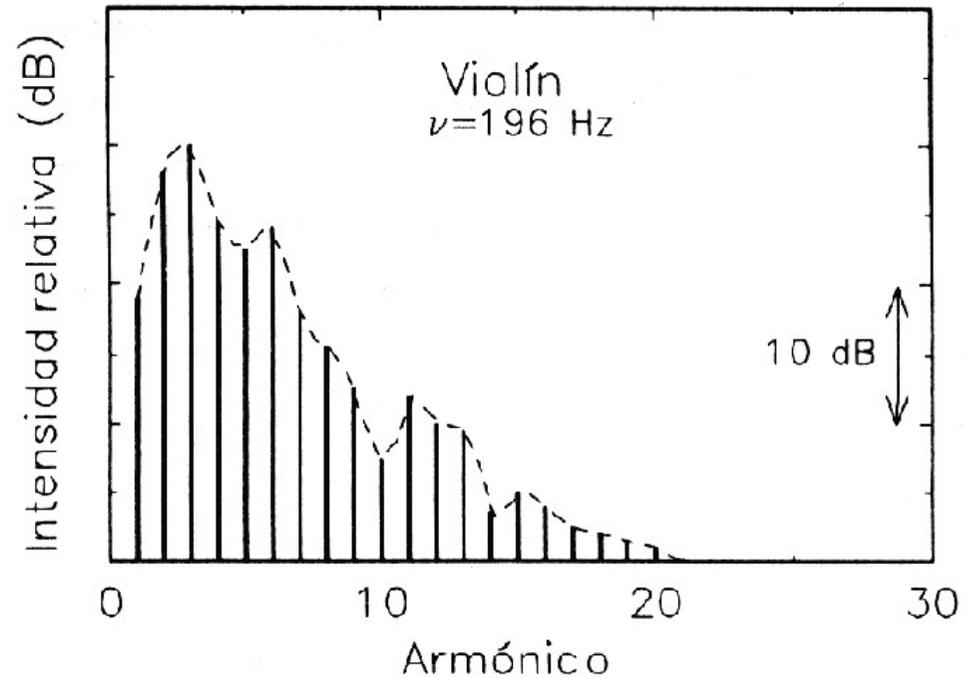


As notas de um piano e suas frequências (em Hz). A seta indica a nota Lá central ou “**Lá de afinação**”, de frequência $f = 440$ Hz.

Timbre: é a qualidade que permite ao ouvido diferenciar sons de mesma altura e intensidade, emitidos por fontes diferentes. O timbre nos permite identificar a voz das pessoas e identificar uma mesma nota musical tocada por diferentes instrumentos. Ele representa uma espécie de “**coloração**” do som. O timbre do som de uma nota tocada por um instrumento é determinado pelo valor da frequência do tom fundamental e pelo número e as intensidades dos harmônicos presentes. Figura: intensidade relativa dos harmônicos de um **diapasão**, a **clarineta** e o **oboé** (Ref: *Física*, P.A. Tipler)



Análise espectral de um violino tocando a corda Sol



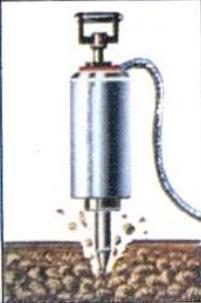
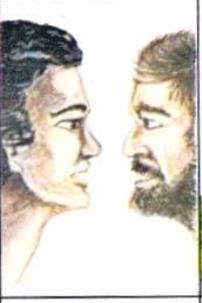
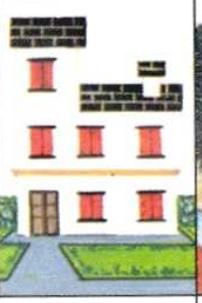
A figura mostra a intensidade relativa dos harmônicos obtidos ao tocar a nota **Sol** (primeira corda do violino).

O espectro revela a presença de cerca de 15 harmônicos intensos.

Sons com muitos harmônicos soam *cheios* e musicalmente mais ricos.

Intensidade: é a qualidade que permite ao ouvido diferenciar os sons fracos dos sons fortes. A experiência mostra que o nível de intensidade sonora varia aprox. com o logaritmo de intensidade do som. Considerando I_0 como a menor intensidade de som audível ($I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$) e I a intensidade do som que se quer determinar, define-se:

$$\text{nível de intensidade} = \log(I/I_0)$$

foguete ao decolar	motor de avião	britadeira	tráfego pesado	toca-discos	conversa normal	casa tranquila	sussurro	barulho das folhas
								
200 decibéis	100/200	100	90	70	40/60	30	20	10
perigosamente intenso	dolorosamente intenso	muito intenso	muito intenso	intenso	moderado	fraco	muito fraco	muito fraco

A unidade de medida é o **bel** em homenagem a Alexander Graham Bell

TABELA 15-1 Intensidade e Nível de Intensidade de Alguns Ruídos Comuns ($I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$)

Fonte	I/I_0	dB	Descrição
	10^0	0	Limiar de audibilidade
Respiração normal	10^1	10	Quase inaudível
Folhas sussurrantes	10^2	20	
Murmúrios (a 5 m)	10^3	30	Muito silencioso
Biblioteca	10^4	40	
Escritório tranquilo	10^5	50	Silencioso
Conversação normal (a 1 m)	10^6	60	
Trafégo pesado	10^7	70	
Escritório barulhento; fábrica comum	10^8	80	
Caminhão pesado (a 15 m); cataratas do Niágara	10^9	90	A exposição constante prejudica a audição
Trem de metrô muito usado	10^{10}	100	
Construção civil (ruído a 3 m)	10^{11}	110	
Concerto de rock com amplificadores (a 2 m); decolagem de jato (a 60 m)	10^{12}	120	Limiar de audição dolorosa
Martelo pneumático; metralhadora	10^{13}	130	
Decolagem de jato (nas vizinhanças)	10^{15}	150	
Motor de foguete de grande porte (nas vizinhanças)	10^{18}	180	

Na prática, usa-se o **decibel (dB)** como unidade de medida, de forma que:

$$\text{Nível de intensidade} = 10 \log(I/I_0).$$

Exercícios

- 1 – Um som tem intensidade $3 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2$. Qual é o nível do som em dB?
- 2 – Dois sons tem intensidade de 10 e $500 \mu\text{W/m}^2$. Qual a diferença em dB?
- 3 – Um material acústico atenua de 30 dB o nível de intensidade sonora. Qual o fator de decréscimo da intensidade?
- 4 – Uma impressora num quarto produz um nível de som de 60 dB. Qual o nível quando há três impressoras trabalhando no quarto?
- 5 – O nível de som médio da voz humana é de 65 dB. Quantas pessoas numa sala, falando ao mesmo tempo, são necessárias para produzir um nível de som de 80 dB?

Respostas: (1) 44.8 dB; (2) 17 dB; (3) 100; (4) $\text{dB}_f = 60 + 10\log(3) = 64.8 \text{ dB}$; (5) $n \approx 32$

Referências bibliográficas

- *Acústica Técnica*, Ennio Cruz da Costa (editora Edgard Blucher, 2003)
- *The Science of sound*. Th. D. Rossing, 2nd ed. (Addison Wesley, 1990)
- *Physics and the sound of music*, J.S. Rigden, 2nd edition (Wiley 1985)
- *Acoustique et Batiment*. B. Grehant (Ed. Tec Doc, Paris, 1994)
- *Acústica*. L. Beranek (Ed Hispano Americana, 1969)
- *Acústica Musical*. Luis L. Henrique (Fund. Calouste Gulbenkian, 2002)
- *Introducción a la acústica arquitectónica*. G.Roselló Vilarroig, J.M. Marzo Diez. Revista **Tectonica**, vol. 14: Acústica (ATC Ediciones, Madrid, 1995)
- *Física Básica*, Vol. 2, H.M. Nussenzveig (Blucher, 1983)
- *Master Handbook of Acoustics*. F.A. Everest (4th ed., McGraw Hill, 2001)