

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

FCM 0410 Física para Engenharia Ambiental

Oscilações e ondas

Prof. Dr. José Pedro Donoso

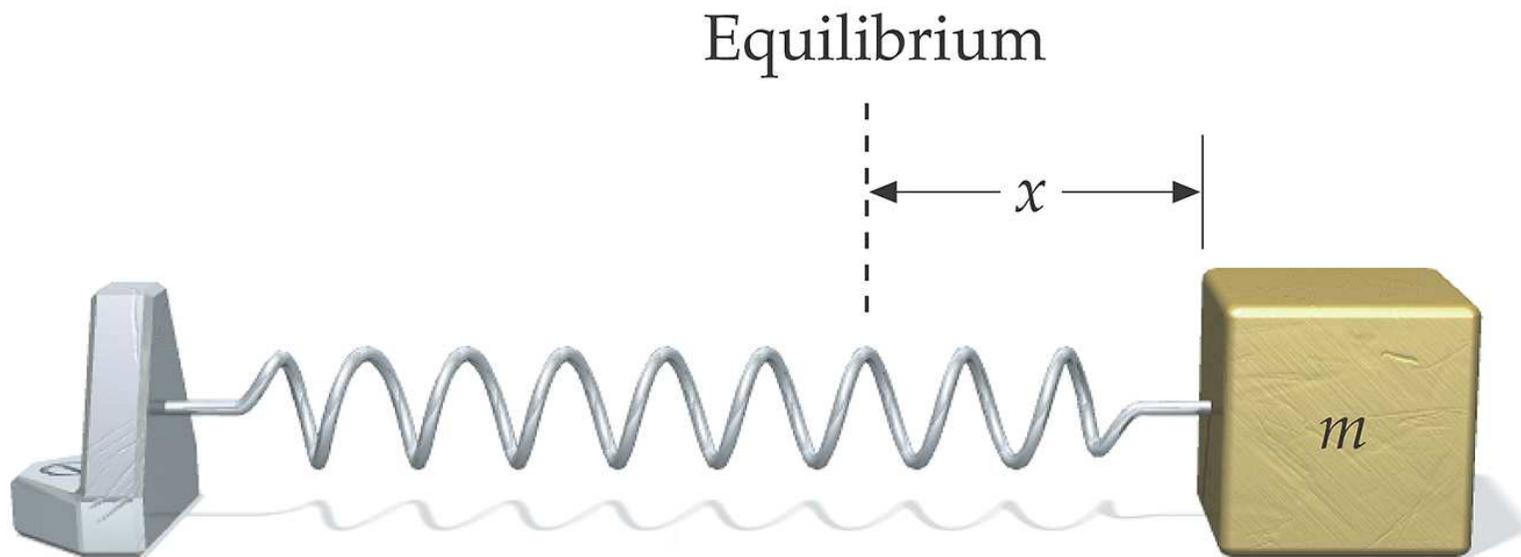
Agradescimentos

O docente da disciplina, Jose Pedro Donoso, gostaria de expressar o seu agradecimento a Flávia O. S. de Sá Lisboa pelo auxílio na montagem da página /web/ da disciplina.

Parte das figuras utilizadas nos slides foram obtidas dos textos "*Física*" de P.A. Tipler e G. Mosca e "Fundamentos de Física" de Halliday, Resnick e Walker, facilitadas aos professores pela editora LTC (Livros Técnicos e Científicos).

Deslocamento x em função do tempo para um objeto fazendo Movimento Harmônico Simples

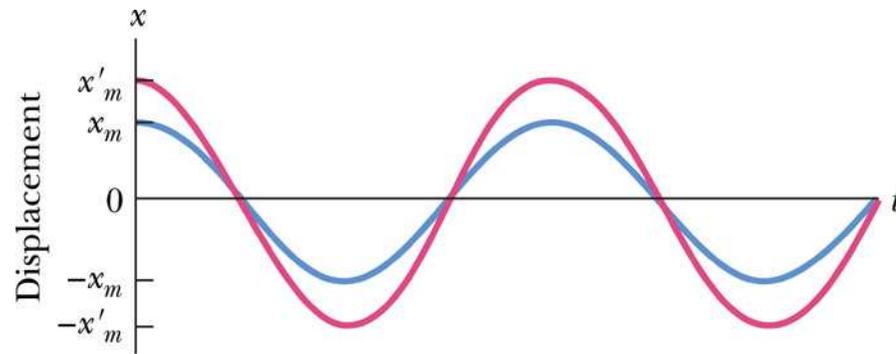
$$x(t) = A \cos(\omega t + \delta)$$



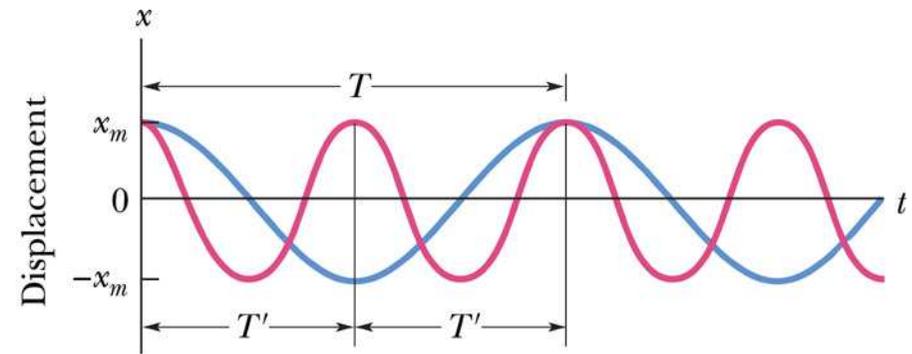
Deslocamento x em função de t para osciladores com

(a) diferentes amplitudes, (b) diferentes períodos (frequências)

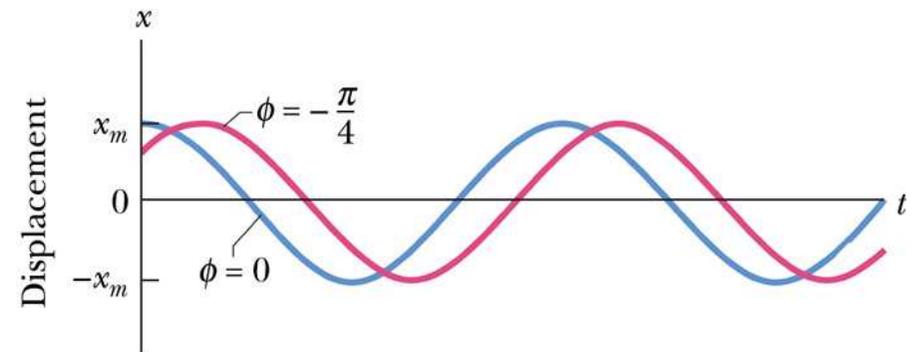
e (c) diferentes fases



(a)

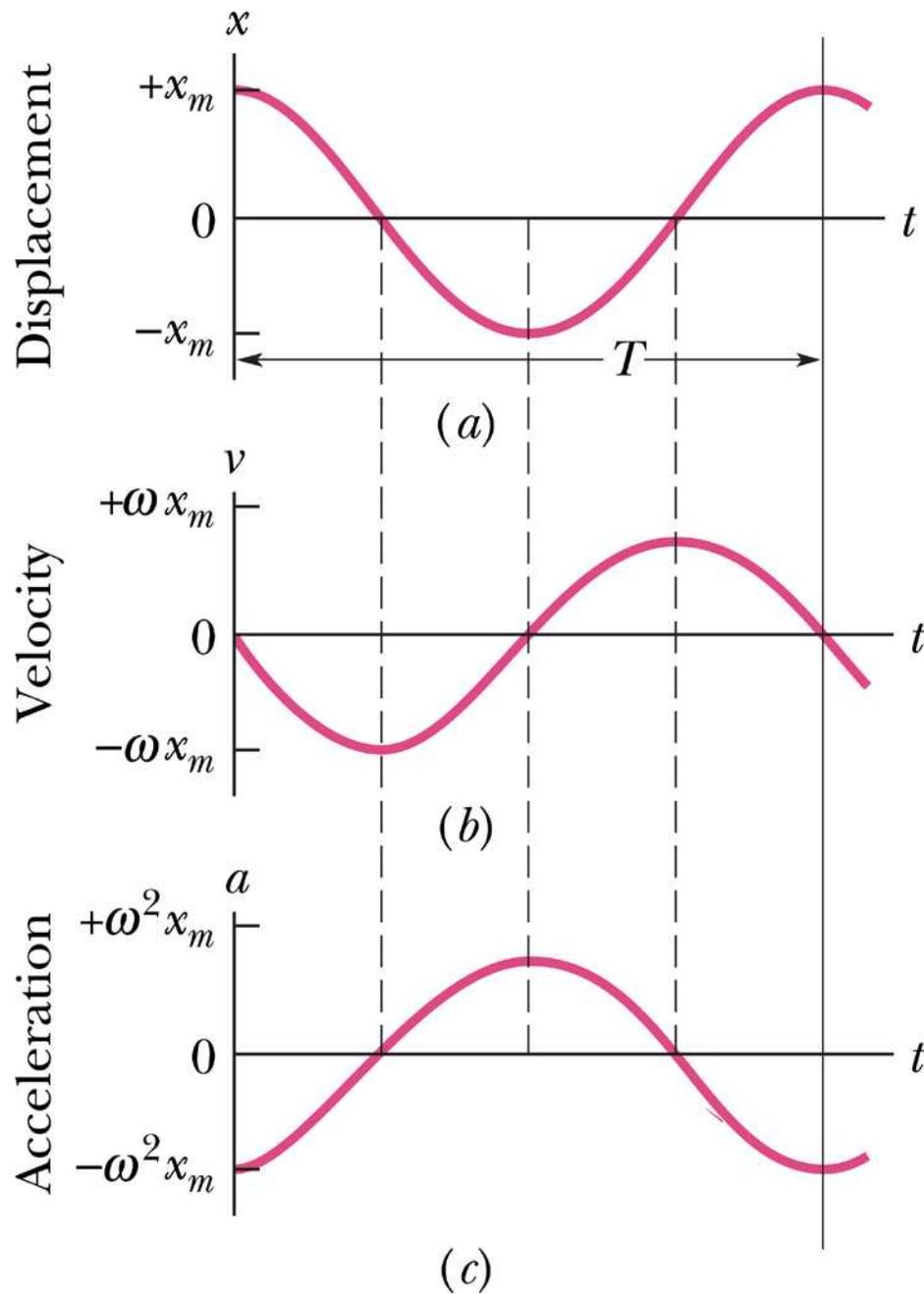


(b)



(c)

Halliday, Resnick, Walker, *Fundamentos de Física*



Deslocamento, velocidade e aceleração

$$x(t) = A \cos(\omega t + \delta)$$

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = -\omega A \sin(\omega t + \delta)$$

$$a(t) = \frac{dv}{dt} = -\omega^2 A \cos(\omega t + \delta)$$

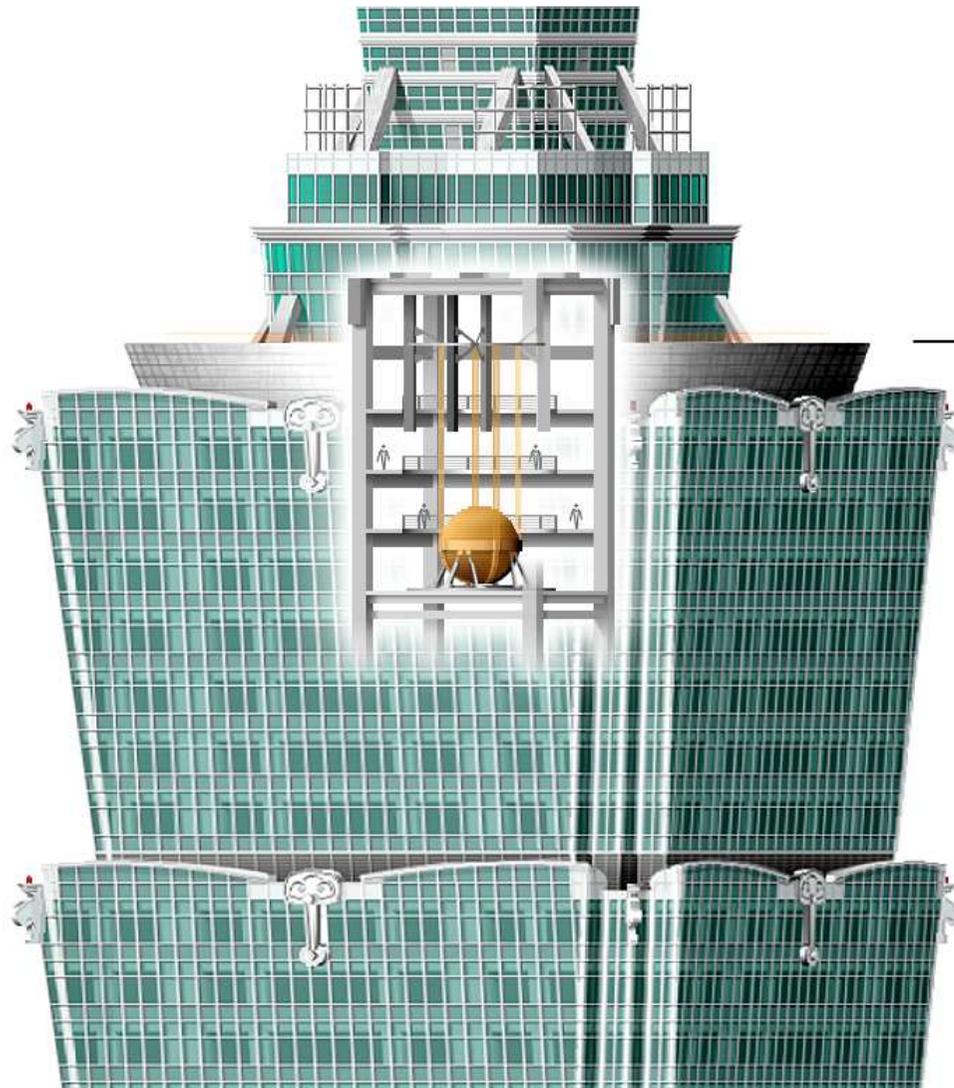
Halliday, Resnick, Walker,
Fundamentos de Física

Amortecedor de Edifício Citicorp (New York). Reduz as oscilações provocadas por ventos fortes. O edifício e o amortecedor oscilam 180° fora de fase um com o outro, resultando na redução na oscilação do prédio.



©2008 by W.H. Freeman and Company

Amortecedor: Taipei 101's; Taiwan



קומה 91 [390.6 מ']
(קומת תצפית חיצונית)

קומה 89 [382.2 מ']
(קומת תצפית פנימית)

קומה 88

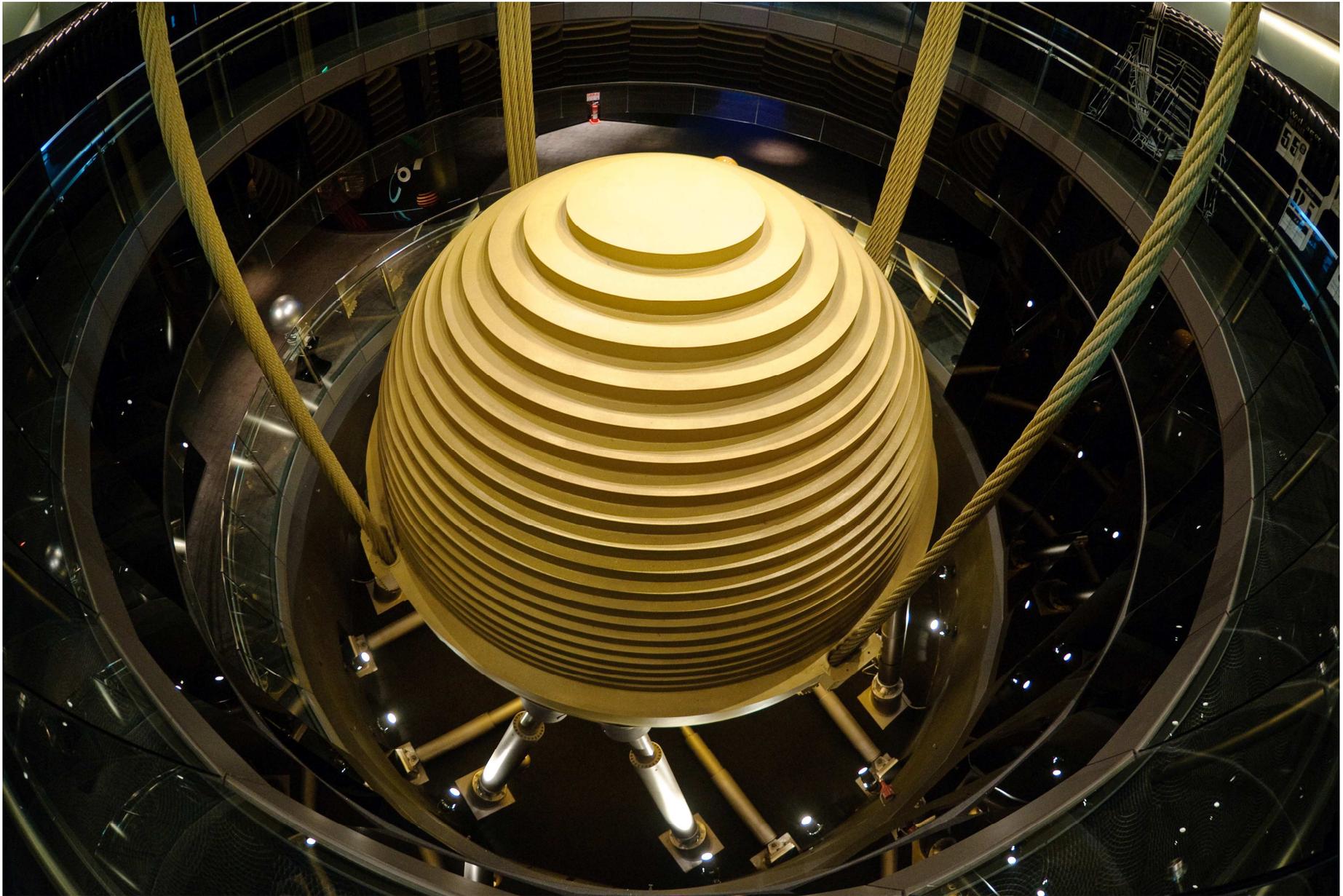
קומה 87



<http://en.wikipedia.org>

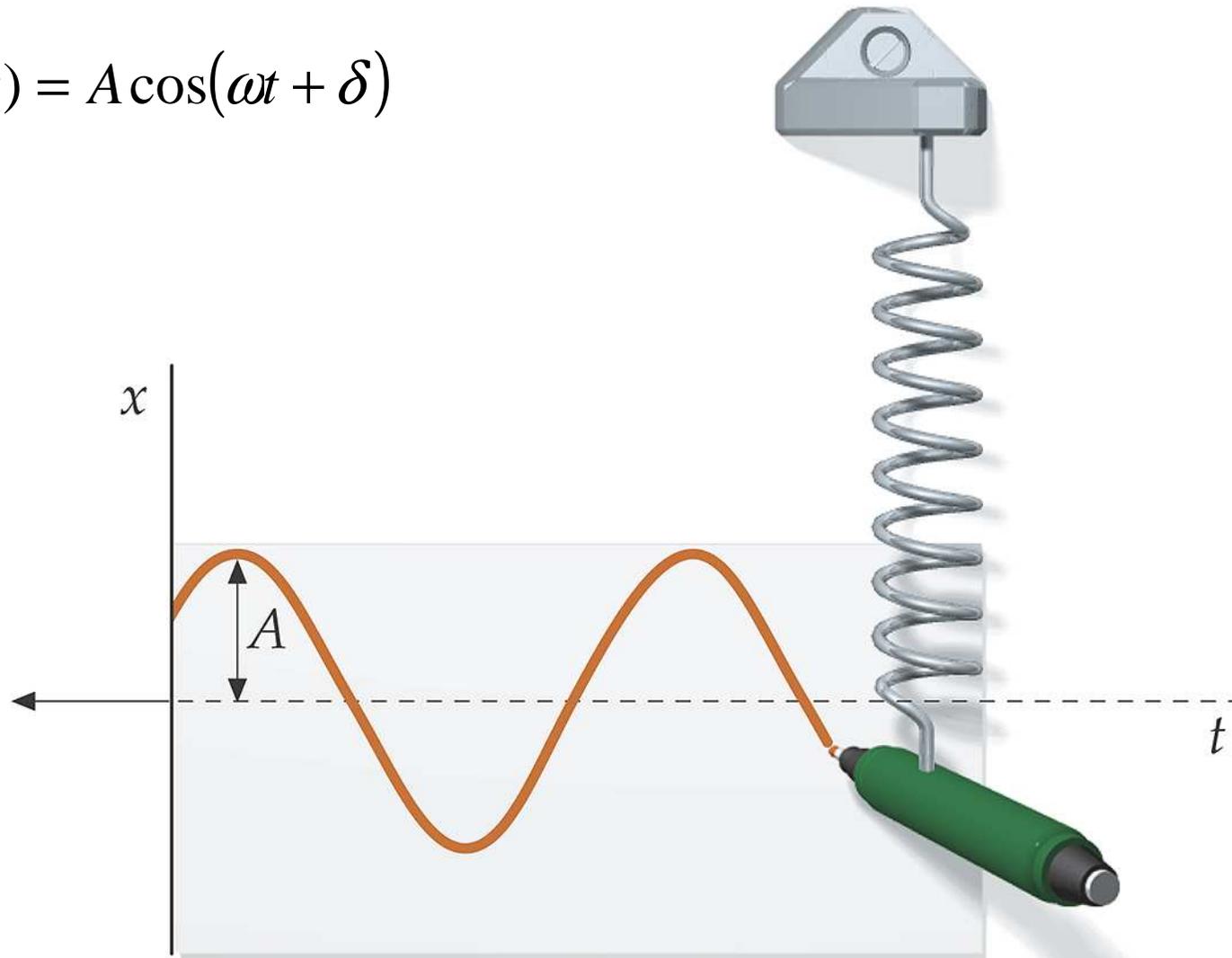
Tuned mass damper: 730 toneladas, 5.5 m diâmetro

<http://en.wikipedia.org>

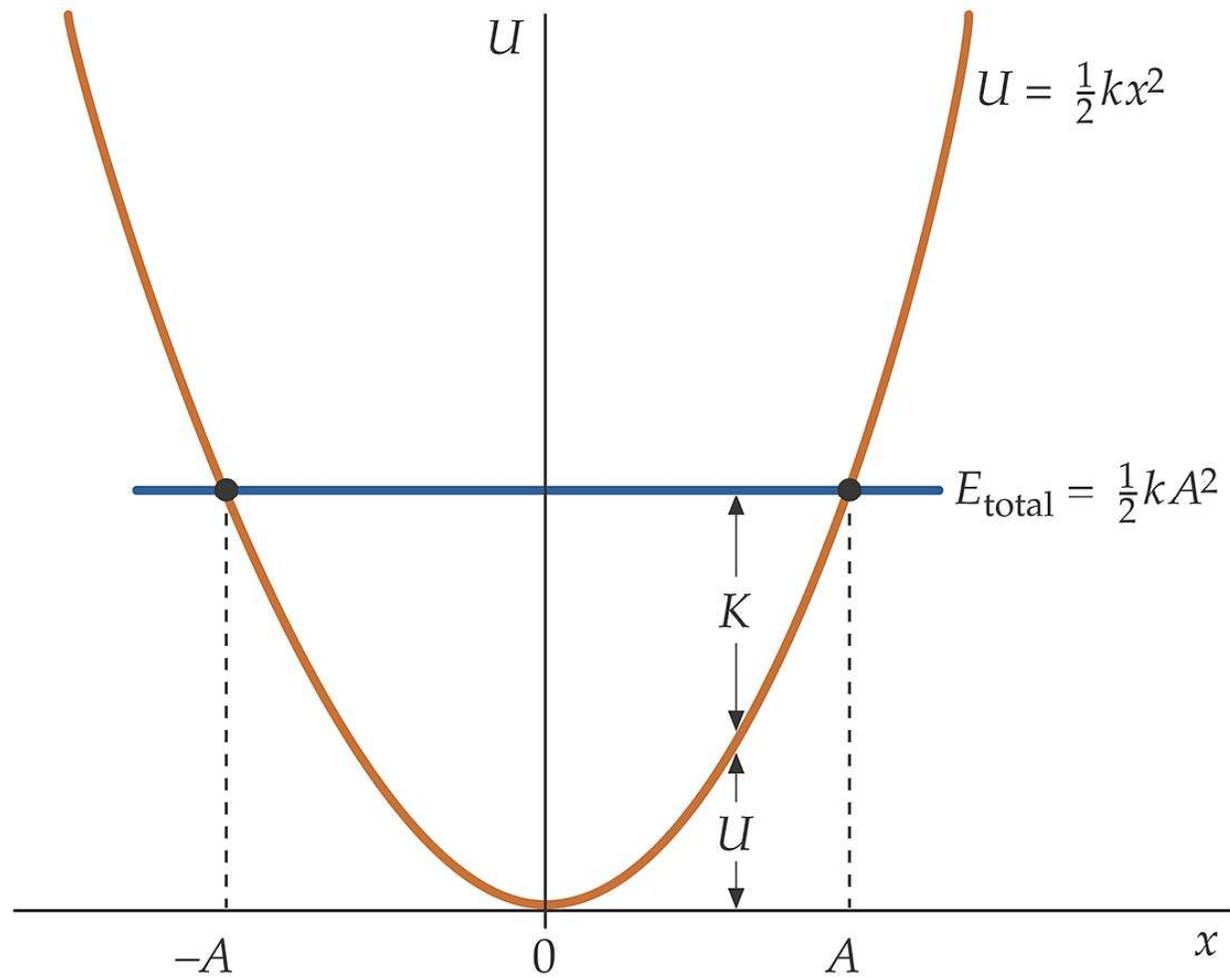


Deslocamento x em função do tempo t

$$x(t) = A \cos(\omega t + \delta)$$

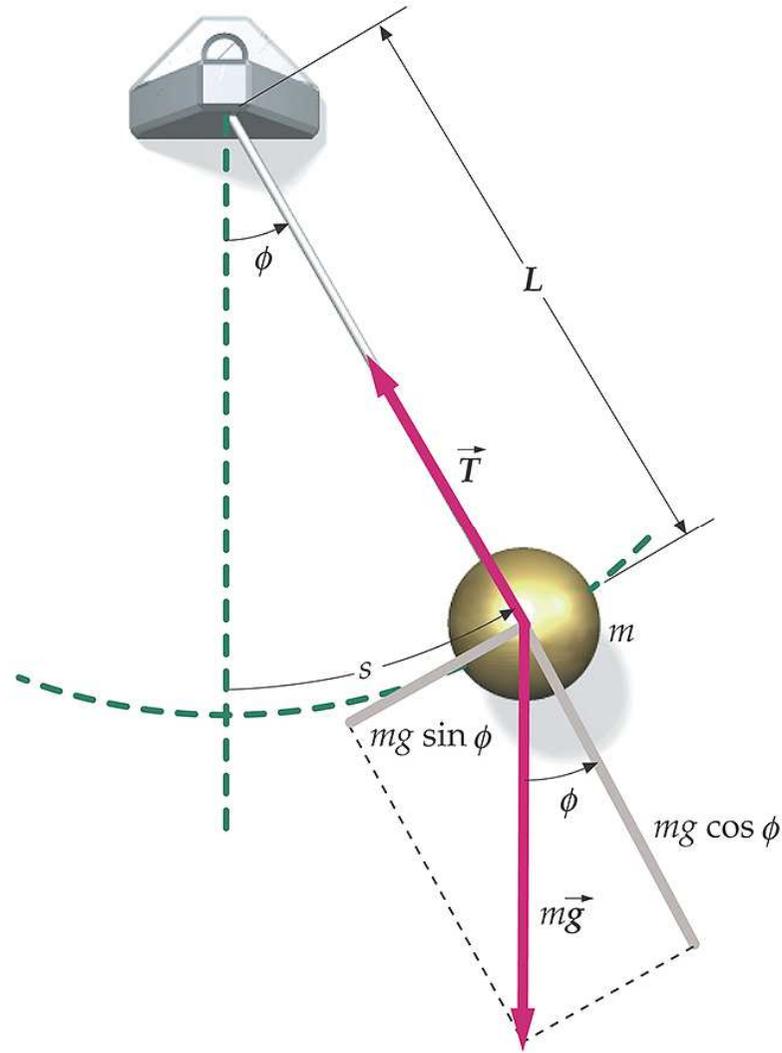


Função energia potencial de um sistemas massa-mola



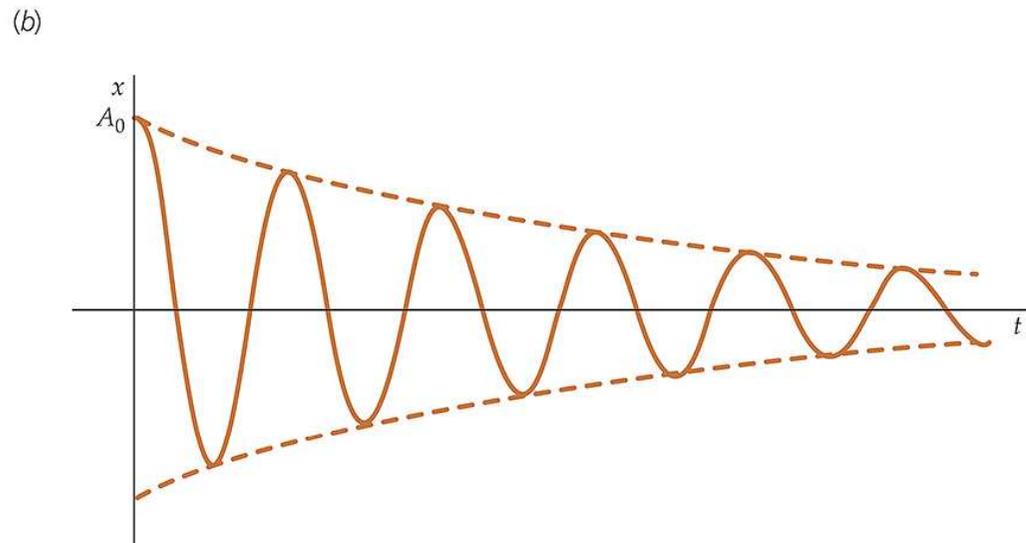
Pêndulo simples

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

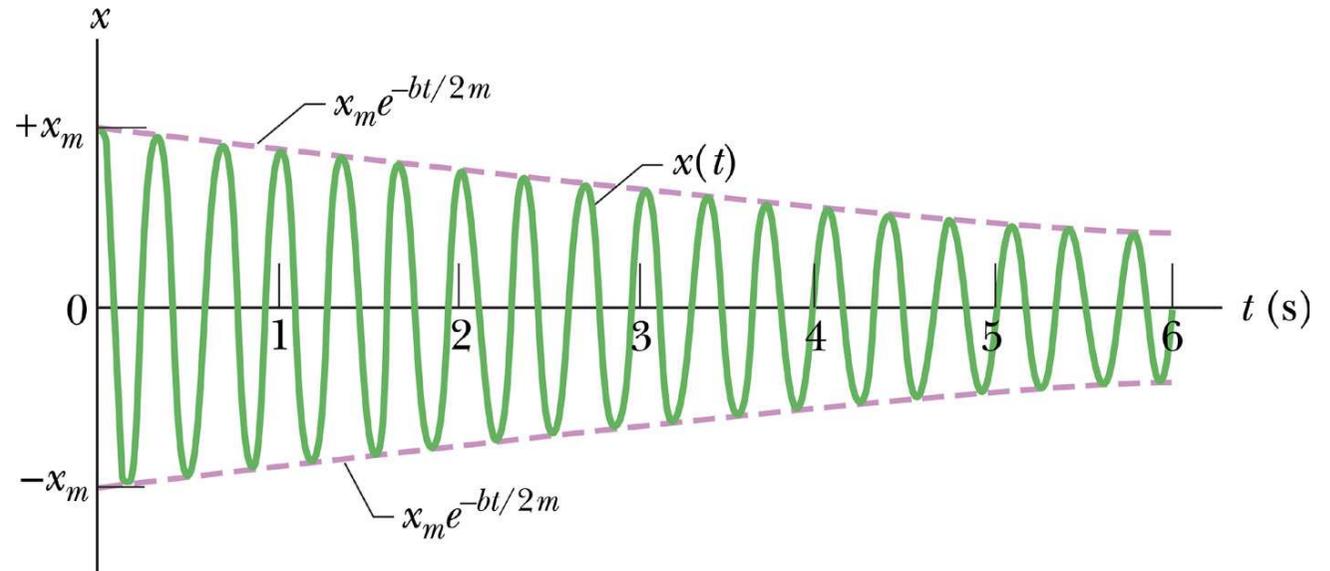
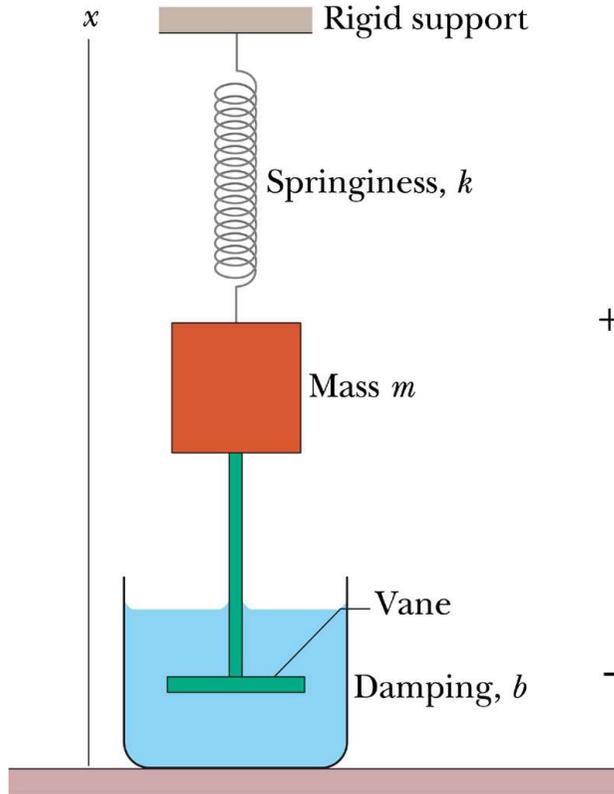


Oscilações amortecidas

$$x(t) = A_0 e^{(-b/2m)t} \cos(\omega t + \delta)$$

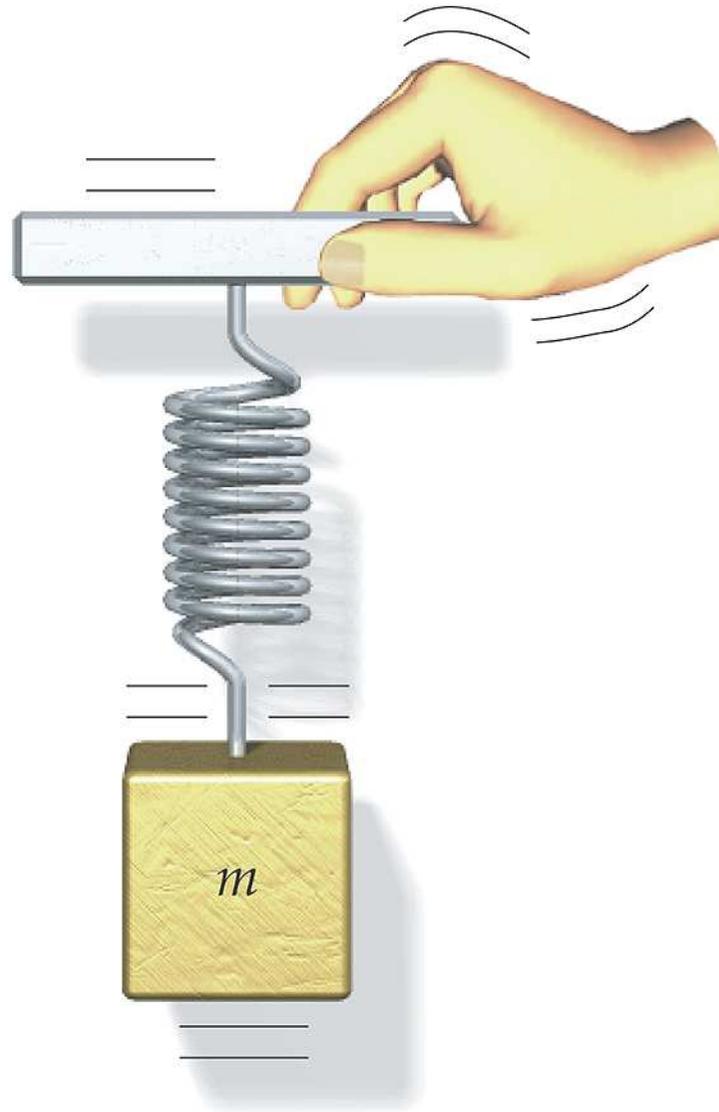


Oscilações amortecidas: a amplitude diminui exponencialmente com o tempo



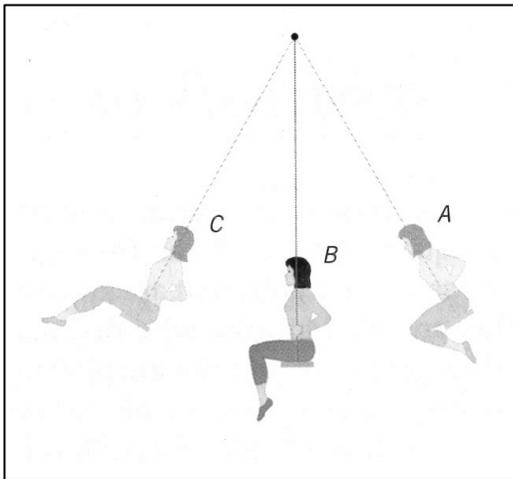
Halliday, Resnick, Walker, *Fundamentos de Física*

Oscilações forçadas e ressonância

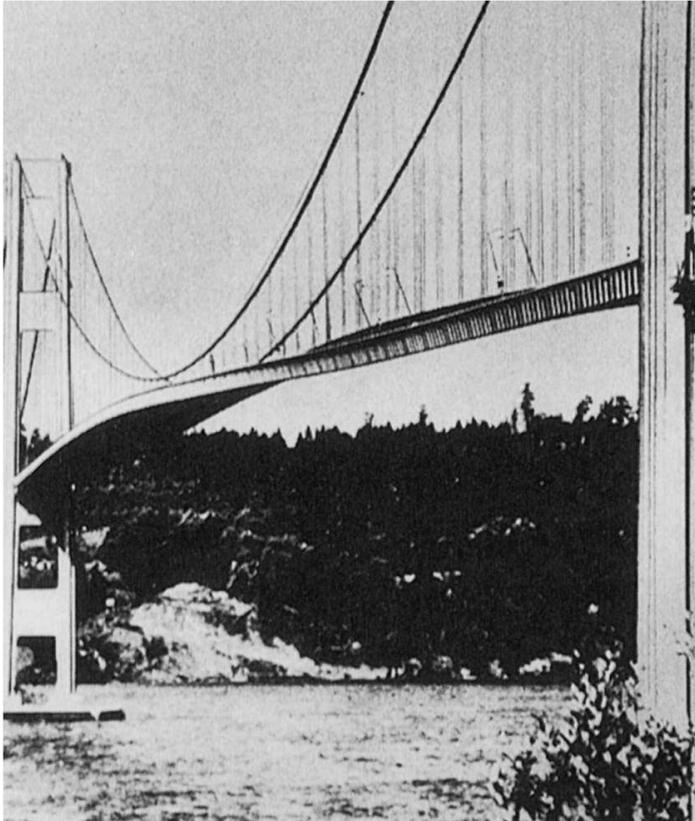


Ressonância

Todas as estruturas mecânicas tem uma ou mais frequências naturais de oscilação. Se a estrutura for submetida a uma força externa periódica cuja frequência coincida com uma das frequências naturais, a **amplitude da oscilação** atingirá valores elevados que podem levar ao colapso da estrutura. Este fenômeno é denominado **ressonância**.



Exemplo: impulsionando uma criança sentada num balanço. A amplitude de oscilação aumenta significativamente quando a frequência de transmissão dos impulsos é igual a frequência de oscilação livre do balanço.

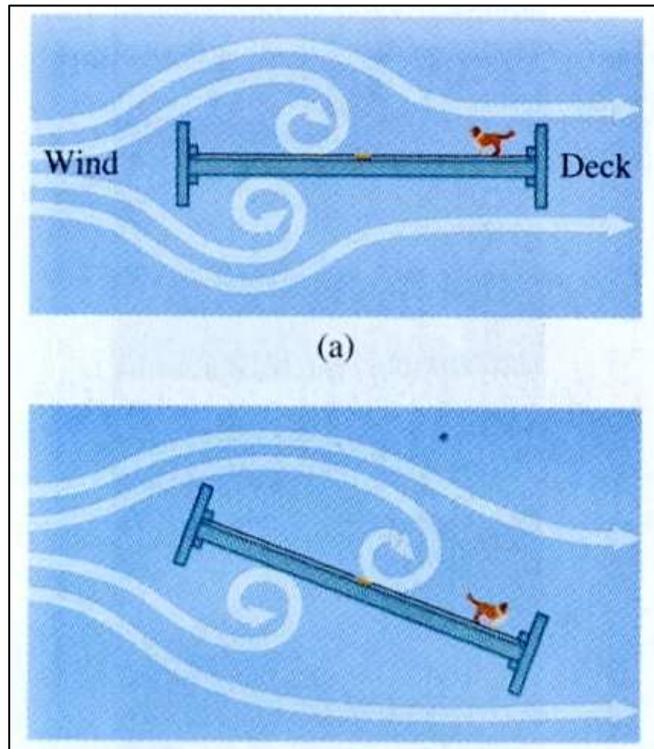


Um exemplo histórico do fenômeno de **ressonância** foi a queda da ponte pênsil do estreito de Tacoma (Washington, EUA) quando ventos soprando sobre a ponte provocaram oscilações de ressonância que levaram à sua destruição em novembro de 1940, quatro meses depois de ter sido inaugurada.

A ponte, de 840 m de comprimento e 12 m de largura, foi aberta para o trânsito em 1º de julho.

Logo ficou conhecida pelas desagradáveis oscilações quando ventava. No dia 7 de novembro, um vento de 60 a 70 km/h provocou uma oscilação na ponte com uma frequência de 36 vibrações por minuto (0.6 Hz). Quando a amplitude da oscilação ficou muito grande, a ponte foi interditada.

E. Hecht, *Physics* (Brooks & Cole, 1994)



E. Hecht, *Physics*
Brooks & Cole, 1994

As 10 h, um cabo cedeu e a ponte começou a vibrar num modo de oscilação ressonante de torção em relação à linha central da estrada (*twisting resonant mode*, $f_0 = 0.2$ Hz).

O mecanismo que causou a catástrofe parece ter sido as oscilações causadas pelos **vórtices** alternados provocados pelo vento. Uma vez que a ponte começou oscilar desta forma, o movimento levou a formação de outros vórtices auto-induzidos (*motion-induced vortices*). Este movimento acabou levando a ponte para sua frequência de ressonância.



A frequência da oscilação causada pelos **vórtices** alternados provocados pelo vento, coincidia com a frequência de vibração natural da estrutura (**condição de ressonância**).

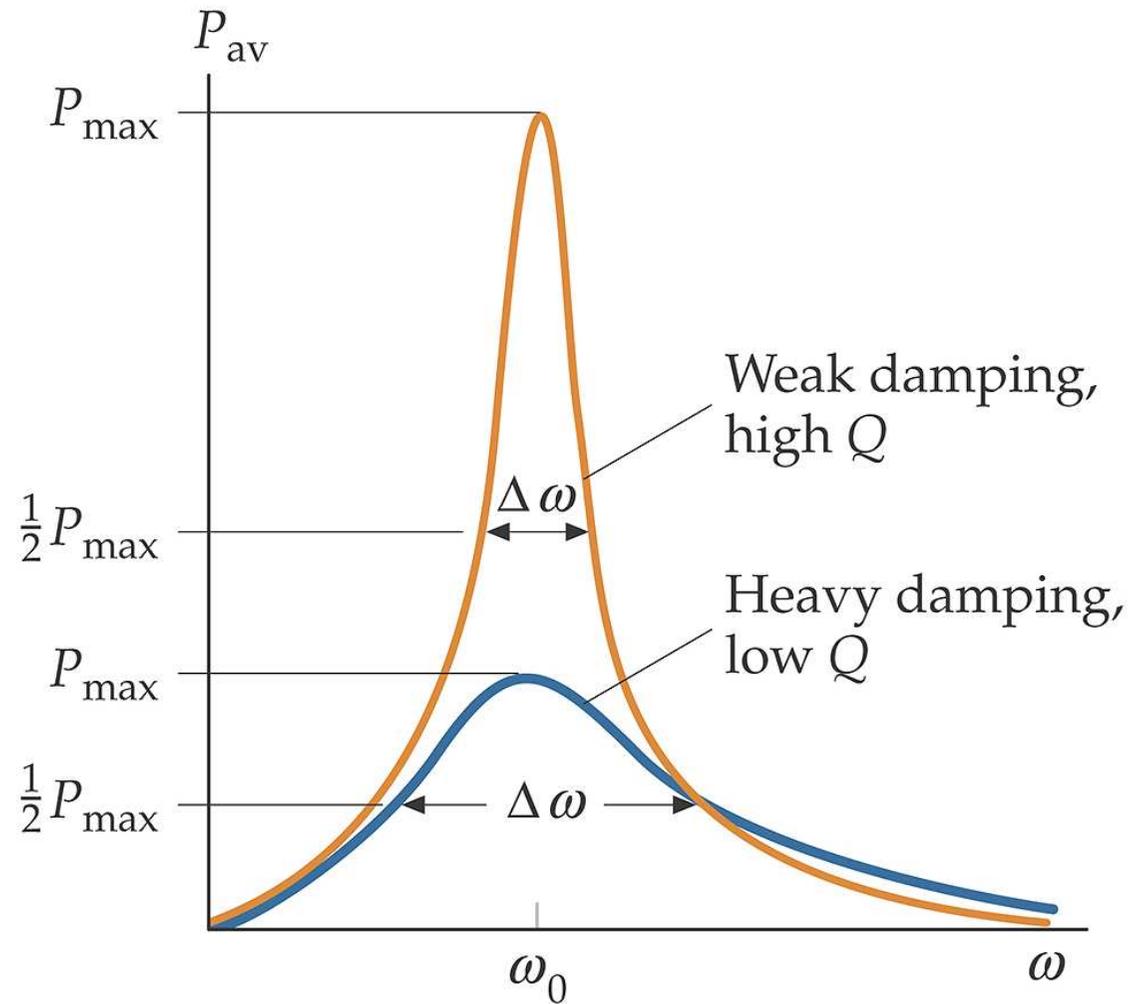
Quando a taxa com que a energia era absorvida do vento superou as perdas por atrito, a amplitude das oscilações aumentaram, levando-a ao colapso da ponte pouco depois das 11 h.

E. Hecht, *Physics* (Brooks & Cole, 1994)

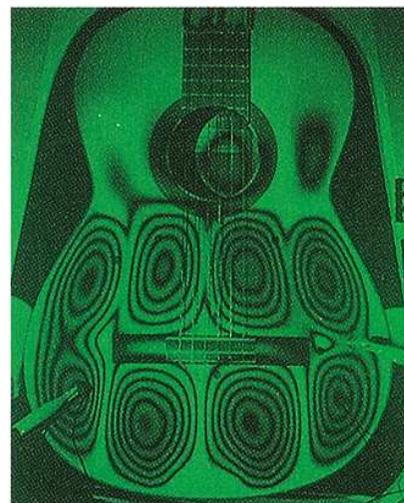
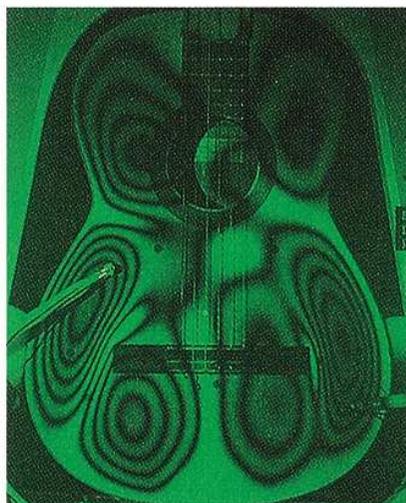
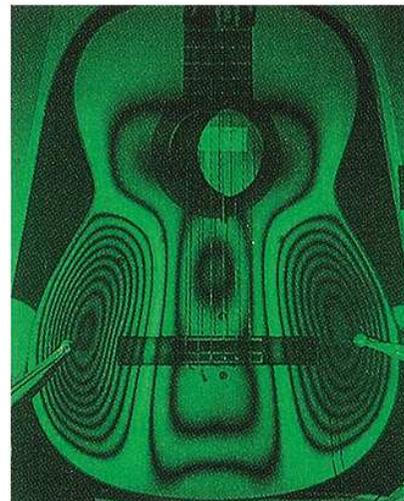
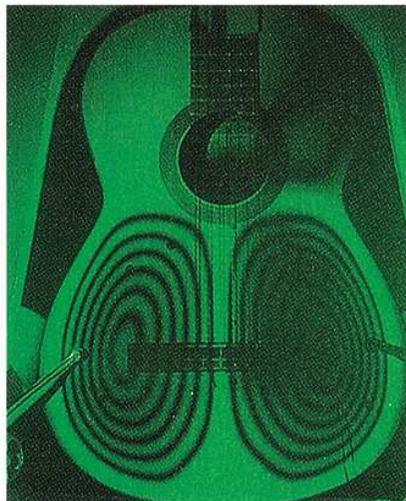


©2008 by W.H. Freeman and Company

Curvas de ressonância: A^2 vs ω



Padrões de ressonância (*modos*) de um violão



London Millenium Footbridge: ficou fechada por dois anos para corrigir a oscilação lateral que surgia sempre que o número de pessoas na ponte chegava a 2000

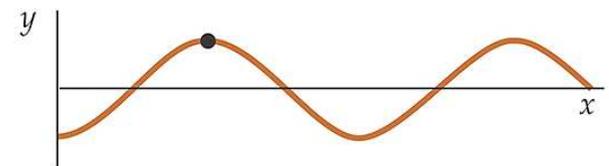
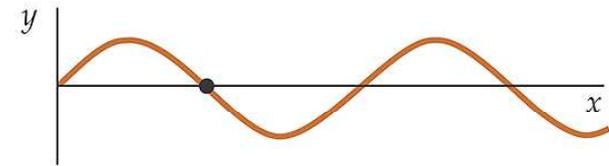
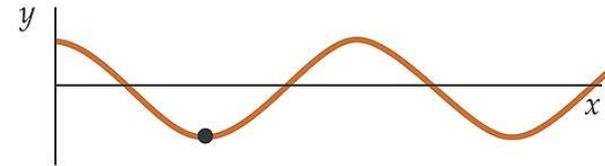


©2008 by W.H. Freeman and Company

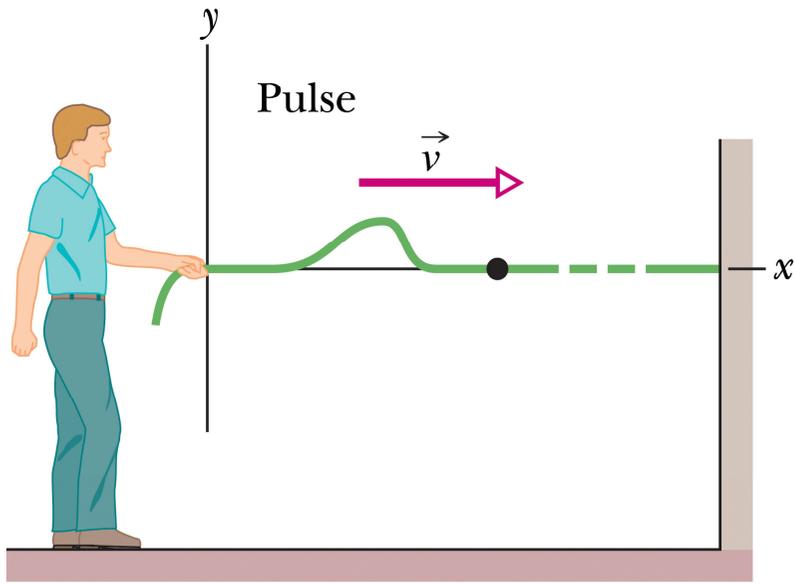
Onda transversal



(a)

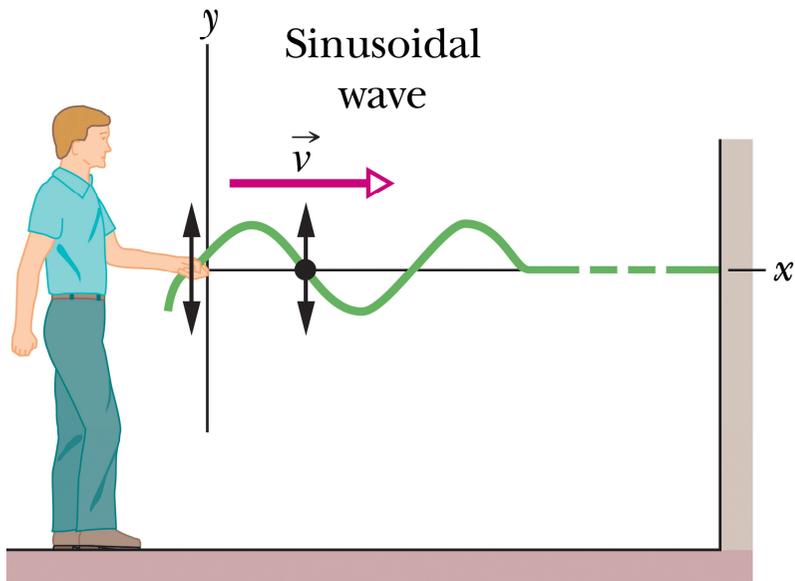


(b)



(a)

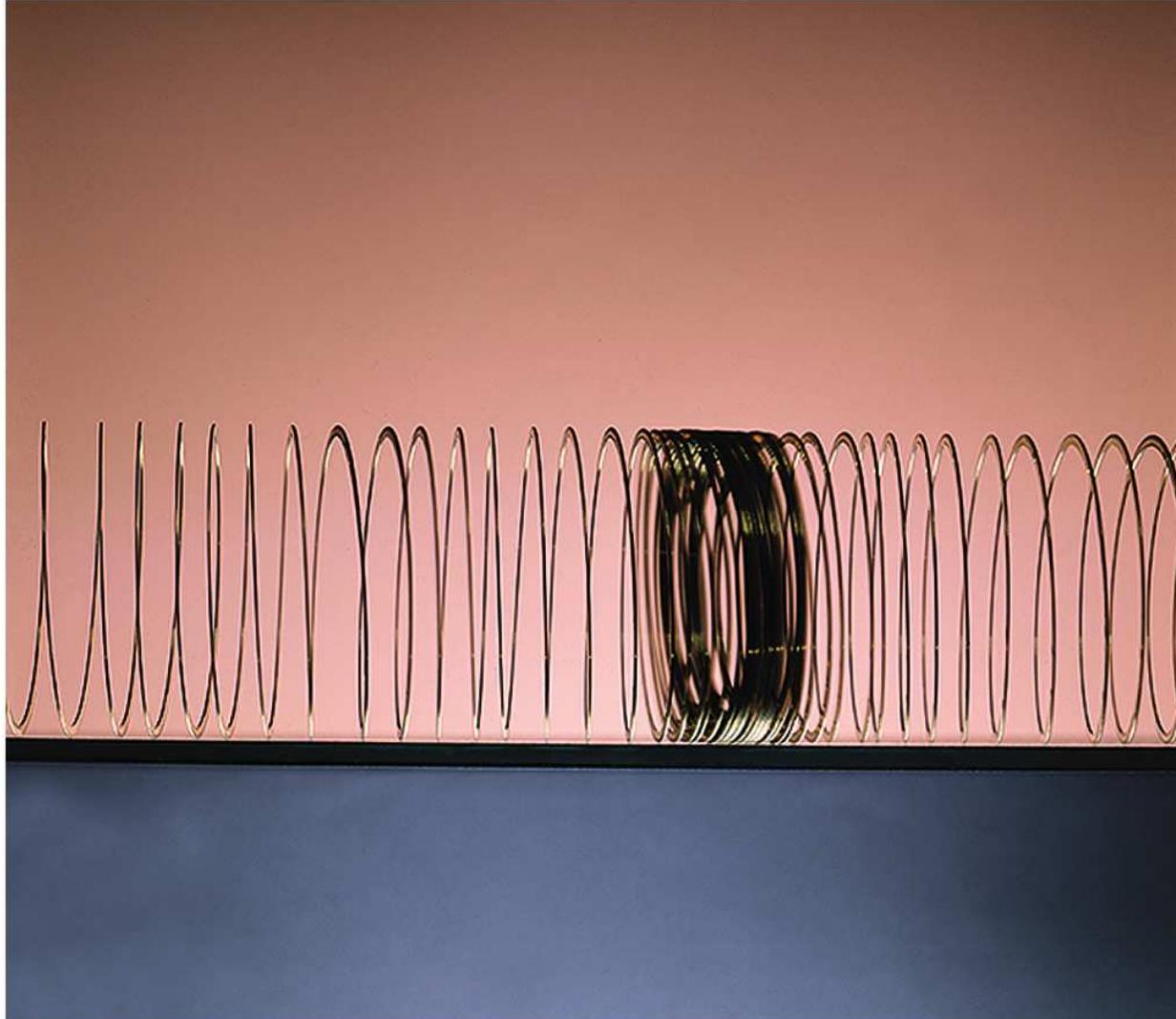
Onda transversal: o movimento é perpendicular a direção de propagação da onda



(b)

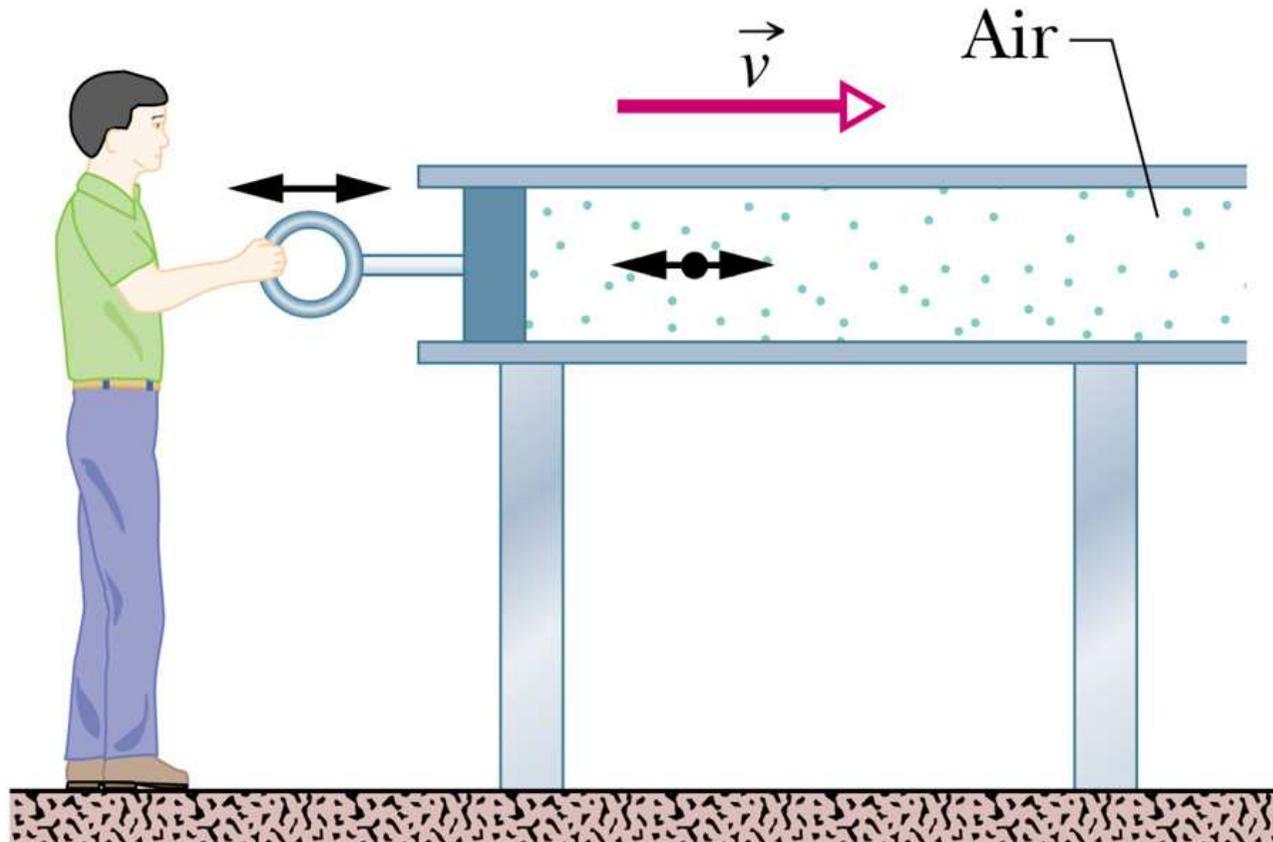
Halliday, Resnick, Walker,
Fundamentos de Física

Onda longitudinal



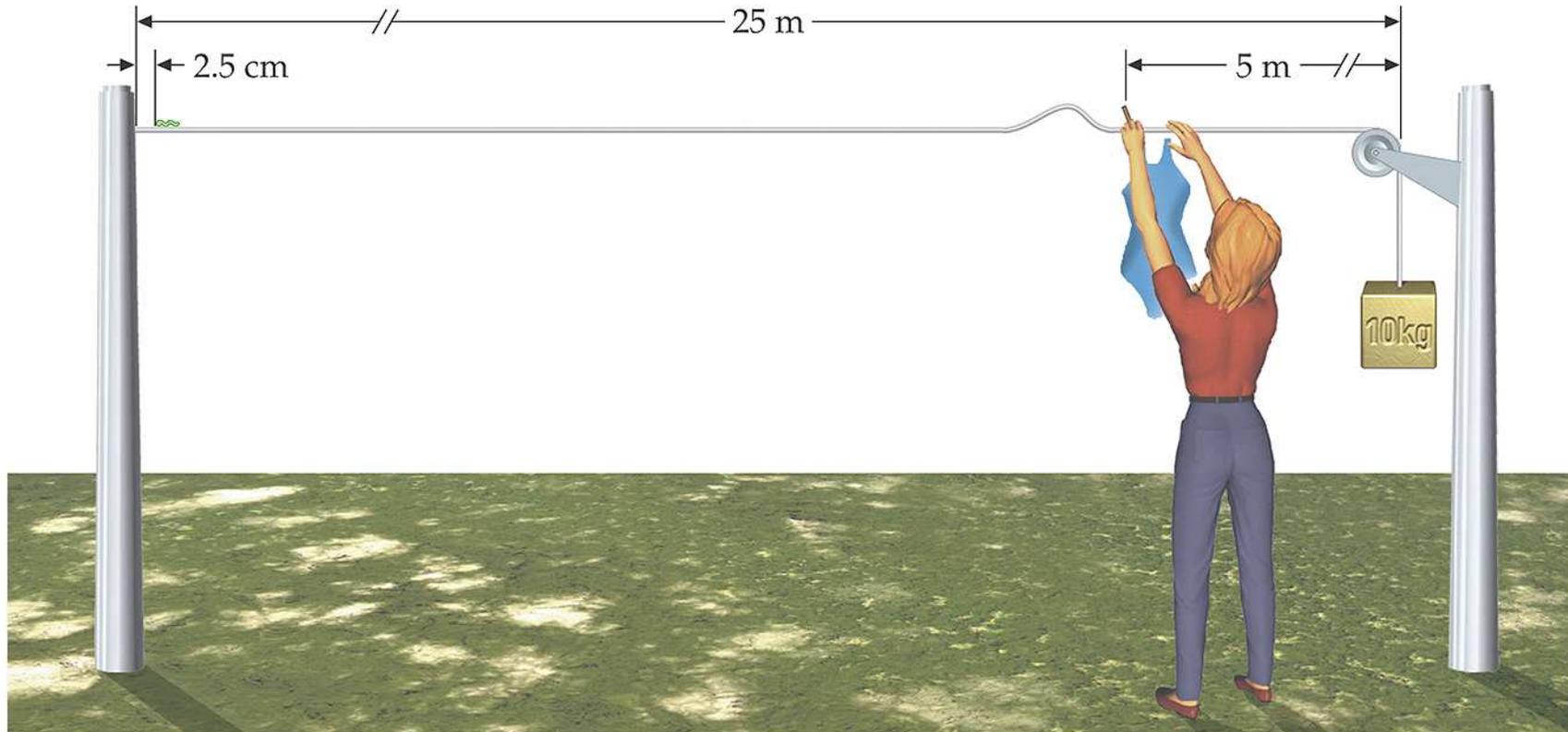
©2008 by W.H. Freeman and Company

Onda longitudinal: o movimento é paralelo a direção de propagação.



Halliday, Resnick, Walker, *Fundamentos de Física*

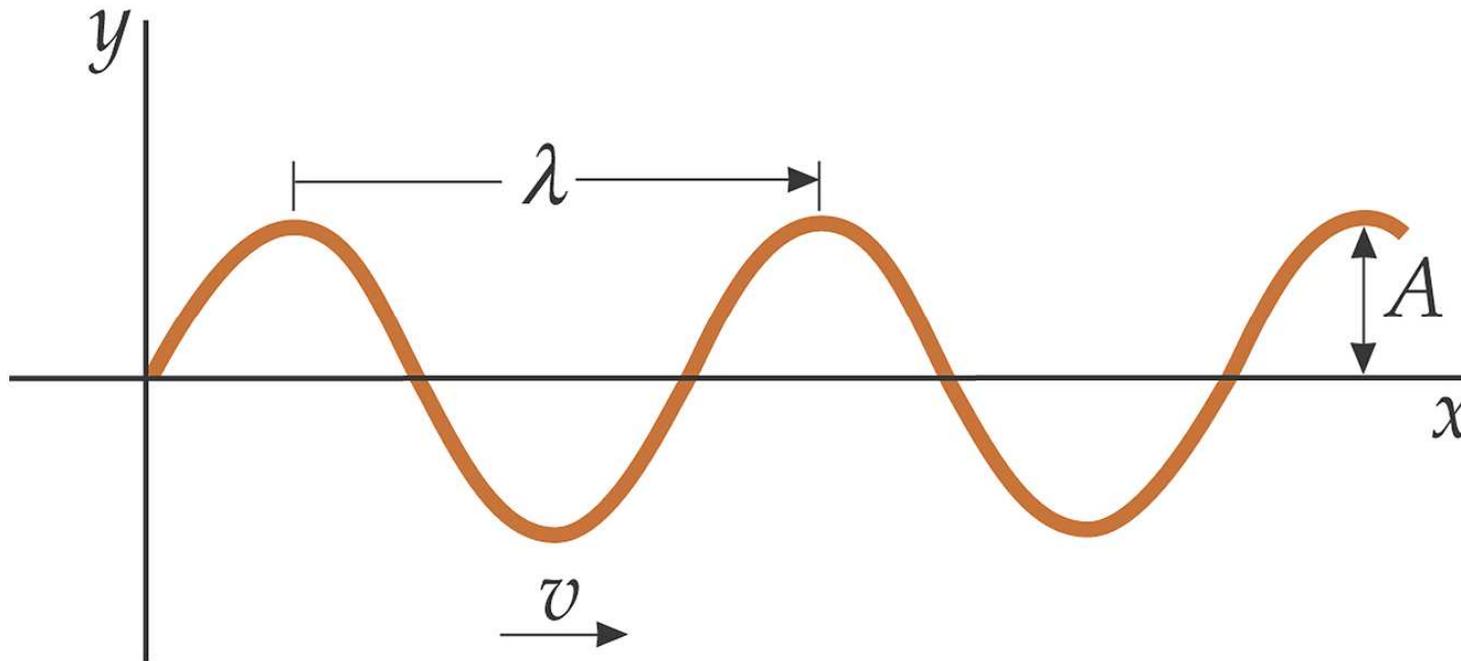
Onda transversal: pulso numa corda



Descrição de uma onda: velocidade, período, amplitude, comprimento de onda

$$v = \frac{\lambda}{T} = f\lambda$$

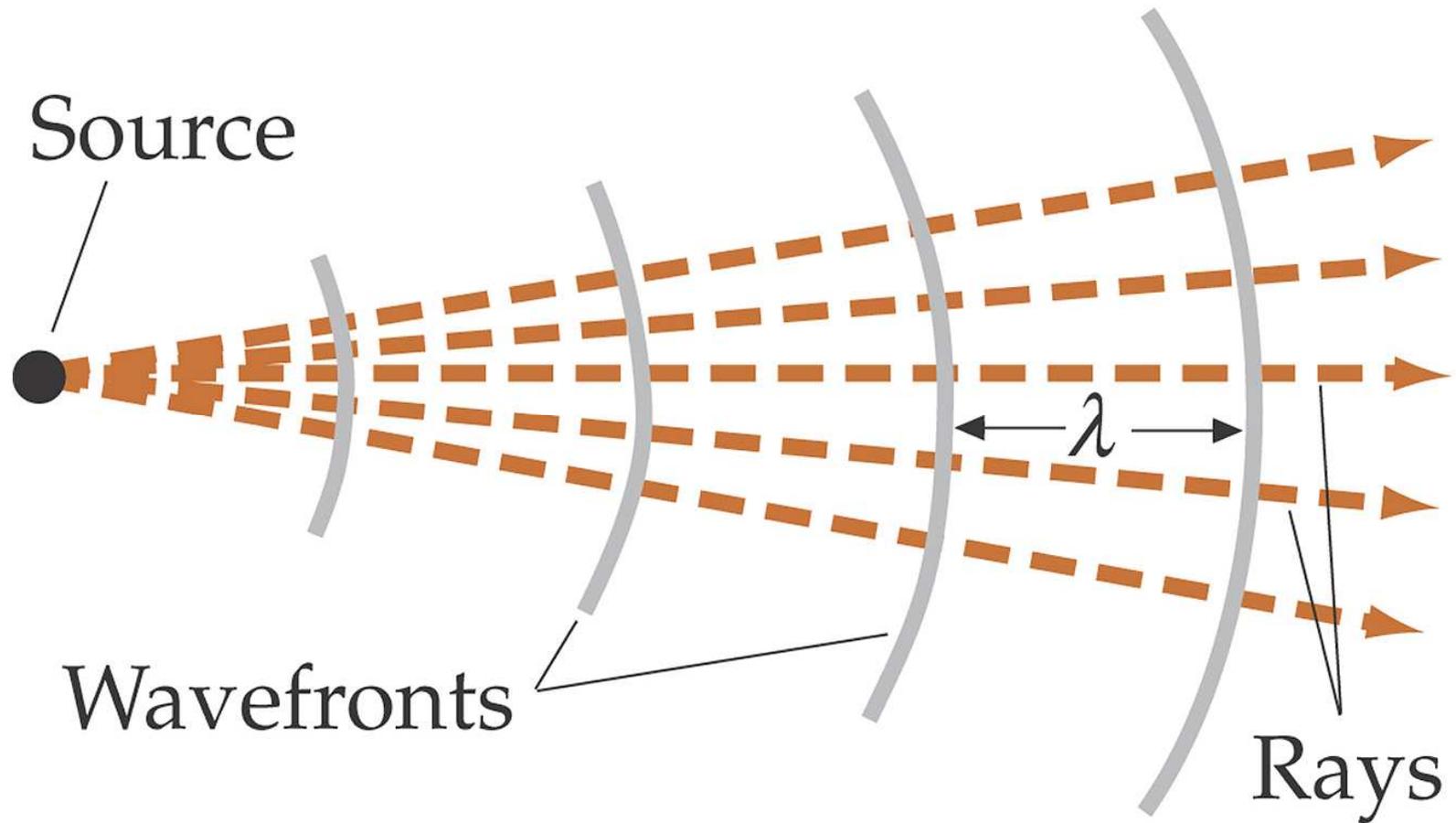
$$\omega = 2\pi f$$





©2008 by W.H. Freeman and Company

Frentes de onda a partir de uma fonte



Tanque de ondas



Nível de intensidade sonora: $SL = (10dB)\log\frac{I}{I_0}$ $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$

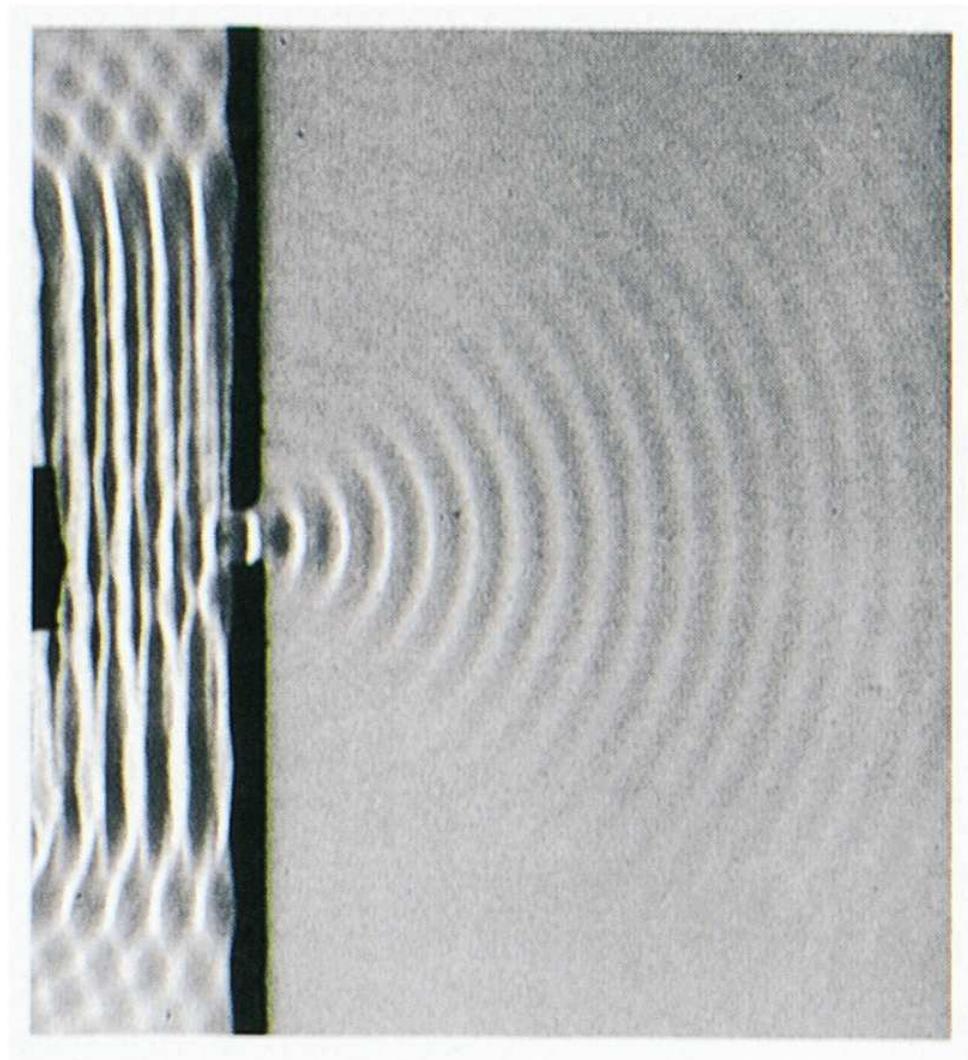
Table 15-1 Intensity and Intensity Level of Some Common Sounds ($I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$)

Source	I/I_0	dB	Description
	10^0	0	Hearing threshold
Normal breathing	10^1	10	Barely audible
Rustling leaves	10^2	20	
Soft whisper (at 5 m)	10^3	30	Very quiet
Library	10^4	40	
Quiet office	10^5	50	Quiet
Normal conversation (at 1 m)	10^6	60	
Busy traffic	10^7	70	
Noisy office with machines; average factory	10^8	80	
Heavy truck (at 15 m); Niagara Falls	10^9	90	Constant exposure endangers hearing
Old subway train	10^{10}	100	
Construction noise (at 3 m)	10^{11}	110	
Rock concert with amplifiers (at 2 m); jet takeoff (at 60 m)	10^{12}	120	Pain threshold
Pneumatic riveter; machine gun	10^{13}	130	
Jet takeoff (nearby)	10^{15}	150	
Large rocket engine (nearby)	10^{18}	180	



©2008 by W.H. Freeman and Company

Difração



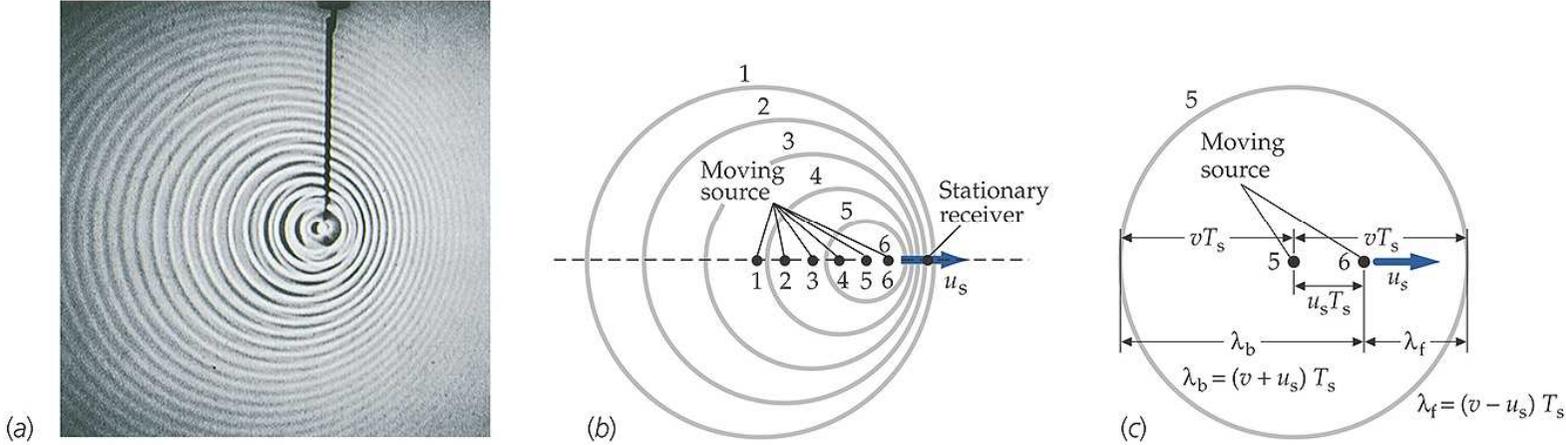
©2008 by W.H. Freeman and Company

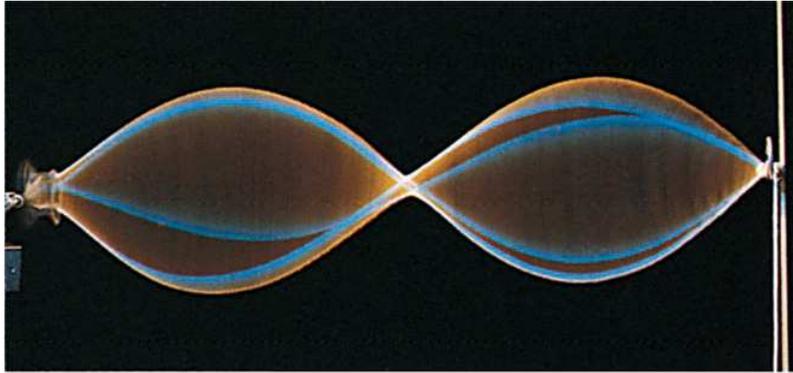
Ultra-som



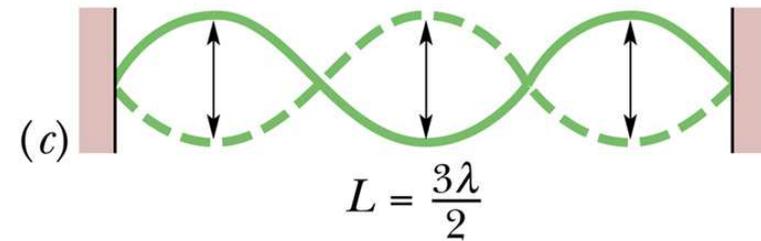
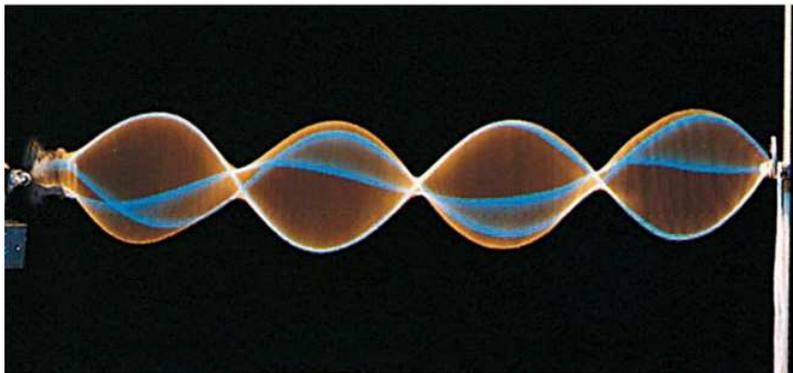
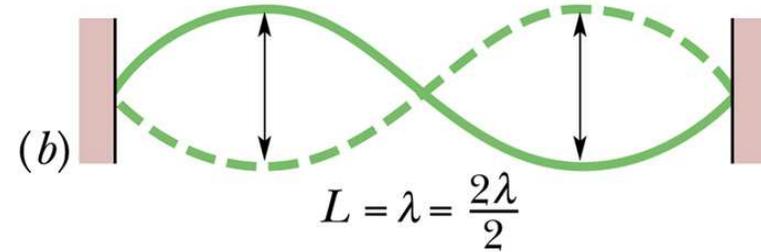
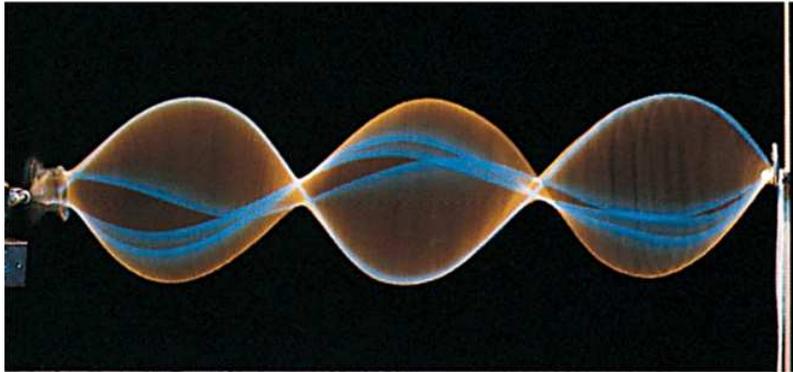
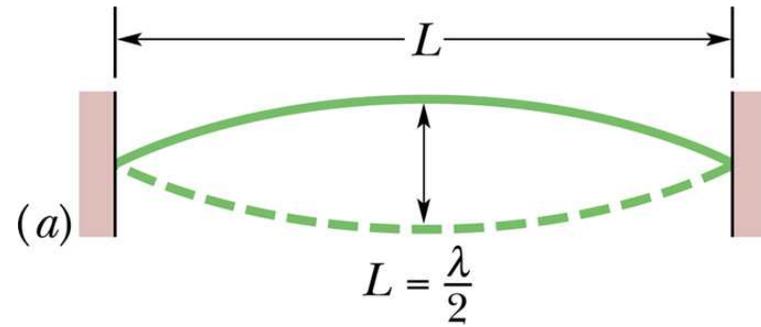
©2008 by W.H. Freeman and Company

Fonte em movimento: Efeito Doppler





Ondas estacionárias



Ondas estacionárias: modo de vibração do tímpano



Halliday, Resnick, Walker, *Fundamentos de Física*