José Maria Filardo Bassalo
www.bassalo.com.br

Uma Breve História das Vibrações Elásticas e da Acústica.

Foi o filósofo grego Pitágoras de Samos (c.560-c.480) um dos primeiros a descobrir uma relação harmoniosa entre os comprimentos das cordas dos instrumentos musicais e a força aplicada nelas, relação essa que produzia combinações harmônicas de sons (altura). Por exemplo, 2/1, correspondia à *oitava*; 3/2, à *quinta*; 4/3, à *quarta* etc. É oportuno registrar que essa descoberta levou Pitágoras a afirmar que as órbitas dos planetas formavam uma imensa *Lira* (instrumento musical nacional da Grécia) cujas cordas se curvavam em círculos. Assim, parecia evidente que os intervalos entre as "cordas" orbitais seriam governados pelas leis harmônicas. Portanto, para Pitágoras, o intervalo musical formado pela Terra e Lua era de um tom; da Lua a Mercúrio, havia um semitom; de Mercúrio a Vênus, também um semitom; de Vênus ao Sol, uma terça menor; de Sol a Marte, um tom; de Marte a Júpiter, um semitom; de Júpiter a Saturno, ainda um semitom; de Saturno à esfera das estrelas fixas, uma terça menor. Desse modo, a *Escala Harmônica Pitagórica* deve estar na mesma razão que os comprimentos das cordas (sob tensões iguais) que produzem as sete notas musicais: *dó*, *ré*, *mib*, *sol*, *lá*, *sib*, *si*. Observe que outros historiadores consideram uma outra escala diferente dessa (p.e.: *dó*, *ré*, *mi*, *fá*, *sol*, *lá*, *si*). [Arthur Koestler, O Homem e o Universo (IBRASA, 1989)].

Uma nova contribuição ao estudo da Acústica deve-se, provavelmente, ao artista e inventor Italiano Leonardo da Vinci (1452-1519) ao afirmar que: - *O golpe em um sino produz um eco e provoca um movimento fraco em uma outra corda semelhante da mesma altura colocada no outro lado*. Contudo, foi a partir do Século 17 que começaram os estudos quantitativos dos movimentos ondulatórios. Assim, em 1625, o matemático, filósofo e teólogo, o padre franciscano francês Marin Mersenne (1588-1648) observou que a frequência (número de ondulações por segundo - ν) de uma corda vibrante de comprimento ℓ, tensão T (força por unidade de comprimento) e densidade linear σ (massa por unidade de comprimento), satisfaz a seguinte expressão: $\nu \propto (1/\ell) \times \sqrt{T/\sigma}$. Em 1636, Mersenne publicou o livro Harmonie Universelle ("Harmonia Universal") no qual enumerou todas as melodias possíveis com até 64 sons não repetidos. Note que foi também de Mersenne a observação, em 1644, de que o período de um pêndulo é independente de sua amplitude, assim como, em 1646, ele foi o primeiro a determinar a duração de oscilação das figuras planas. Contudo, conforme vimos em verbete desta série, foi o físico e astrônomo italiano Galileu Galilei (1564-1642) quem formalizou as leis do pêndulo.

Em seu famoso tratado intitulado Philosophia Naturalis Principia Mathematica ("Princípios Matemáticos da Filosofia Natural") [Great Books of the Western World 32, Encyclopaedia Britannica, Inc./Chicago (1993)], composto de três livros e publicado em 1687, o físico inglês Sir Isaac Newton (1642-1727) apresentou no Livro II uma fórmula para o cálculo da *velocidade do som* (V_S) em um determinado meio: $V_S = \sqrt{e/d}$, onde e e d representam, respectivamente, a elasticidade (relação entre tensão e deformação) e a densidade (relação entre massa e volume) do meio.

Ao aplicar essa fórmula ao ar, Newton encontrou que V_S era ~ 15% abaixo do valor, posteriormente, conhecido que é de aproximadamente 340 m/s. É oportuno registrar que o som é uma *onda longitudinal* decorrente de compressões e distensões do ar atmosférico. É por essa razão que o som não se propaga no vácuo.

O estudo mais apurado da vibração musical resultou de um trabalho (*Mémoire*) apresentado à *Academia Francesa de Ciências*, em 1700, pelo físico francês Joseph Sauveur (1653-1716), no qual descreveu um método experimental para determinar a frequência absoluta de um *som musical*. Nesse método, Sauveur utilizou um par de órgãos afinados em um pequeno intervalo de tempo, com os batimentos correspondentes contados em um dado período de tempo. Por esse seu trabalho, Sauveur foi considerado como o criador da *Acústica Musical*. É interessante destacar que, em 1706, o professor de Direito, o italiano Giuseppe Averani (1663-1738) realizou, em Toscana (com a colaboração de Thomas Dereham e Henry Newton), experiências no sentido de determinar a *velocidade do som*, e que, em 1713, Sauveur apresentou uma nova *Mémoire* à *Academia Francesa de Ciências* na qual calculou a frequência vibracional de uma corda musical. Para esse cálculo, considerou uma corda esticada horizontalmente em um campo gravitacional, e sujeita a vibrações pequenas. [Morris Kline, Mathematical Thought from Ancient to Modern Times (Oxford University Press, 1972)].

Um dos primeiros trabalhos teóricos sobre a vibração de uma corda – a chamada corda vibrante – foi apresentado pelo matemático inglês Brook Taylor (1685-1731), ainda em 1713 [*Philosophical Transactions Royal Society of London* 28, p. 26 (publicado em 1714)], em um artigo intitulado De motu nervi tensi ("Sobre o movimento de uma corda tensa"), no qual deduziu a equação da corda vibrante: $a^2 \ddot{x} = \dot{s}\dot{y}\dot{y}$, onde $\dot{s} = ds/dt = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}$, $\dot{x}(\dot{y}) = dx(y)/dt$, a = ℓ/π, e ℓ é o comprimento da corda. De posse dessa equação e ao admitir para y a forma senoidal, isto é, y = A sen (xπ/ℓ), Taylor demonstrou que a frequência (ν) fundamental da corda vibrante é dada pela expressão (em notação atual): ν = [$1/(2\ell)$]$\times \sqrt{Tg/\sigma}$, onde g é a aceleração da gravidade e T é a tensão na corda. É oportuno salientar que a onda emitida por uma corda vibrante é uma *onda transversal* cuja velocidade (v) é dada por: v = $\lambda/P = \lambda\nu$, onde λ é o *comprimento de onda* (distância entre duas cristas ou entre dois cavados) e P é o *período*, o tempo gasto para um ponto percorrer λ.

Em 1715, no livro intitulado Methodus Incrementorum Directa et Inversa ("Métodos Direto e Inverso de Incrementação"), Taylor apresentou uma revisão do problema da corda vibrante. Note que foi nesse livro que Taylor descobriu o hoje famoso *desenvolvimento de Taylor*: f(x+a) = f (a) + $f^{(1)}$(a) x + ... + $f^{(n)}$(a) x^n/n!, onde o índice superior (entre parêntesis) indica a ordem da derivada. No ano seguinte, em 1716 (*Acta Eruditorum Lipsiensium*), o matemático suíço Jakob Hermann (1678-1733) tratou das oscilações da corda vibrante tratando-as, sem sucesso, como sendo as vibrações de um oscilador harmônico simples.

Mais tarde, em 1727 [*Commentarii Academiae Scientiarum Imperialis Petropolitanae* 3, p. 124 (publicado em 1732)], o matemático suíço Leonhard Euler (1707-1783) analisou o movimento de uma haste vibrante circular supondo que um elemento da mesma se comportava (na linguagem atual) dinamicamente como uma partícula com um grau de liberdade e acelerada por uma força decorrente de uma energia potencial igual à energia interna do elemento considerado. Ainda em 1727 [*Commentarii Academiae Scientiarum Imperialis Petropolitanae* 3 (1728), p. 13 (publicado em 1732)], o matemático suíço John (Johann, Jean) Bernoulli (1667-1748) estudou o movimento de uma corda vibrante sem peso, carregada com n massas iguais e igualmente espaçadas, sendo que tais massas satisfaziam à equação diferencial do oscilador harmônico: $d^2x/dt^2 + k\,x = 0$, sendo k uma constante, cuja solução ele a obteve por métodos analíticos. Ao considerar a corda como contínua, John Bernoulli demonstrou que essa solução é *senoidal* (forma da função trigonométrica seno). Maia tarde, em 1731, Euler escreveu o livro intitulado Tentamen Novae Musicae ex Certissimis Harmoniae Principiis Dilucide Expositae ("Uma Investigação sobre uma Nova e Clara Teoria da Música Baseada sobre Incontestáveis Princípios de Harmonia"), no qual demonstrou que uma corda vibrante de espessura variável [ou densidade linear não uniforme: $\sigma(x)$] emite *sons não-harmônicos*.

Em 1732 e 1733 [*Commentarii Academiae Scientiarum Imperialis Petropolitanae* 6, p. 108 (publicado em 1738)] e, posteriormente, em 1740 [*Commentarii Academiae Scientiarum Imperialis Petropolitanae* 12, p. 97 (publicado em 1750)], o matemático suíço Daniel Bernoulli (1700-1782) comunicou à *Academia de Ciências de São Petersburgo* os resultados de seus estudos sobre as pequenas vibrações de uma corda sem peso, pendurada em uma extremidade e carregada com n massas igualmente espaçadas, bem como sobre a vibração de pêndulos acoplados. Para o caso da corda, demonstrou que os deslocamentos y, a uma distância x de sua extremidade livre, satisfazem à equação diferencial ordinária dada por (em notação atual): $\alpha\, d/dx\,(x\, dy/dx) + y = 0$, cuja solução é: $y = A\, J_0\,(2\sqrt{x/\alpha})$, onde α satisfaz a equação $J_0\,(2\sqrt{\ell/\alpha}) = 0$, sendo ℓ o comprimento da corda e J_0 é a função de *Bessel de Ordem Zero*. Desse modo, Daniel encontrou que a vibração da corda suspensa poderia ser obtida de uma sucessão de um grande número de vibrações simples. Note que Daniel Bernoulli também tratou de cordas suspensas de espessura variável, cujas oscilações são representadas pela seguinte equação diferencial (em notação atual): $\alpha\, d/dx\,[g(x)\, dy/dx] + y\, dg(x)/dx = 0$, onde g(x) é a distribuição do peso da corda ao longo de ℓ. Desse modo, ao considerar que $g(x) = x^2/\ell^2$, Daniel Bernoulli obteve: $y = 2\,A\sqrt{\alpha/2x}\times J_1(2\sqrt{2x/\alpha})$, com α agora satisfazendo a equação $J_1\,(2\sqrt{2\ell/\alpha}) = 0$, sendo J_1 é a função de *Bessel de Ordem Um* (sobre as funções de Bessel, ver verbete nesta série).

Entre 1741 e 1743 [*Commentarii Academiae Scientiarum Imperialis Petropolitanae* 13, p. 167 (publicado em 1751)], Daniel Bernoulli realizou trabalhos nos quais estudou as vibrações de uma barra e os sons emitidos por ela, bem como separou os diversos modos dessas vibrações e observou que os sons correspondentes (ou diversos harmônicos) podiam existir juntos. Parece ser essa a primeira observação sobre a co-existência de pequenas oscilações harmônicas. Apesar de entender fisicamente esse problema, ele não foi capaz de resolvê-lo matematicamente.

A solução para as vibrações em cordas foi encontrada pelo matemático francês Jean le Rond d´Alembert (1717-1783), em 1746 [*Histoire de l´Académie Royale des Sciences et des Belles-Lettres de Berlin* 3 (1747), p. 214 (publicado em 1749)], ao obter a seguinte equação diferencial parcial da corda vibrante (em notação atual): $\partial^2 y/\partial t^2 = a^2\ \partial^2 y/\partial x^2$, onde $a^2 = T/\sigma$ e T é a tensão na corda de comprimento ℓ e σ sua densidade linear (massa por unidade de comprimento). Para essa equação, d ´Alembert encontrou a seguinte solução: $y\,(x, t) = (1/2)\,[f\,(x + a\,t) + f\,(x - a\,t)]$, com $f\,(x) = y(x, 0)$ sendo uma função arbitrária representando a posição inicial (t = 0) da corda. Observe que essa solução representa uma combinação de uma *onda progressiva* (para frente) e de uma *onda regressiva* (para trás).

Em 1747, Euler estudou a propagação de pulsos através de um meio elástico, com o objetivo de entender a transmissão do som no ar. Nesse estudo, tomou um conjunto de n massas conectadas por molas de massa desprezível e, ao considerar que elas se movimentavam longitudinalmente, ele determinou a frequência dos modos harmônicos simples individuais de vibração de cada uma dessas massas, bem como demonstrou que o movimento geral delas é a soma desses modos. No ano seguinte, 1748, Euler demonstrou que se a forma inicial de uma corda de comprimento ℓ fosse periódica [em notação atual: $y(x,0) = \sum_n A_n sen(n\pi x / \ell)$], todos os possíveis movimentos posteriores da corda também seriam periódicos dados por: $y(x,t) = \sum_n A_n sen(n\pi x / \ell) \cos[(n\pi a / \ell)t]$, com $a^2 = T/\sigma$. No entanto, nessa solução geral, Euler não especificou se o somatório envolvia um número finito ou infinito de termos, apesar de ele já considerar a ideia de superposição dos modos vibracionais da corda. Esses trabalhos de Euler foram publicados, em 1749 (*Nova Acta Eruditorum*, p. 512) e em 1750 [*Histoire de l´Académie Royale des Sciences et des Belles-Lettres de Berlin* 4 (1748), p. 69]. É interessante destacar que, somente em 1750, foi publicado o trabalho de Euler sobre a solução da equação diferencial do oscilador harmônico simples e forçado, encontrada por ele, em 1739 (*Histoire de l ´Académie Royale des Sciences et des Belles-Lettres de Berlin* 11, p. 128). Também em 1750, d´Alembert apresentou um novo trabalho à *Academia Real de Ciências e Letras de Berlim*, no qual voltou ao problema da corda vibrante, corroborando suas ideias anteriores sobre o mesmo, porém, afirmou, sem demonstrar, que o tempo de vibração da corda era independente de sua forma inicial. Note, no entanto, que foi Daniel Bernoulli, em 1753 [*Histoire de l´Académie Royale des Sciences et des Belles-Lettres de Berlin* 9, p. 147 (publicado em 1755)], quem demonstrou que o somatório considerado por Euler envolve um número infinito de termos, demonstração essa que foi confirmada por d´Alembert também em 1753 [*Histoire de l´Académie Royale des Sciences et des Belles-Lettres de Berlin* 9, p. 196 (publicado em 1755)]. A natureza e a propagação do som também foi objeto de pesquisa por parte do matemático franco-italiano Joseph Louis, Conde de Lagrange (1736-1813), em 1759 (*Miscellanea Philosophica-Mathematica Societatis Privatae Taurinensis* 1_3, p. 1), ao considerar uma corda carregada com um número (n) finito de massas iguais e igualmente espaçadas; desse modo, ao fazer $n \to \infty$ obteve os mesmos resultados de Euler e de d´Alembert. (Kline, op. cit.).

A análise das vibrações em uma *membrana* foi apresentada por Euler em 1764 [*Novi Commentarii Academiae Scientiarum Imperialis Petropolitanae* 10, p. 243 (publicado em 1766)], ao demonstrar que a oscilação de uma membrana circular (de raio r) era descrita pela equação diferencial: $d^2u/dr^2 + (1/r)\, du/dr + (\alpha^2 - \beta^2 / r^2)$, cuja solução foi encontrada por ele por intermédio de uma série infinita. É interessante registrar que, em 1824, o astrônomo alemão Friedrich Wilhelm Bessel (1784-1846) encontrou essa mesma equação diferencial – conhecida hoje como *equação de Bessel* - estudando a anomalia das órbitas dos planetas (vide verbete nesta série). Note que a solução da equação acima encontrada por Euler nada mais é do que a função $J_\beta(r)$, a menos de um fator dependente de β. Para ver a solução matemática das vibrações (em cordas e membranas), ver: José Maria Filardo Bassalo e Mauro Sérgio Dorsa Cattani, Elementos de Física Matemática, Volume 2: Equações em Derivadas Parciais e Cálculo das Variações (Livraria da Física/Casa Editorial Maluhy & Co., 2010).

Por sua vez, em 1787, o físico e músico alemão Ernest Florenz Friedrich Chladni (1756-1827) publicou o livro intitulado Entdeckungen über die Theorie des Klanges (“Descobertas sobre a Teoria do Som”), no qual estudou as vibrações de placas (de várias formas geométricas) de vidro e de cobre (Cu), encobertas de areia, vibrações essas decorrentes do *som* de um violino tocado por ele e próximo das extremidades das placas. Chladni observou a estrutura dessas vibrações, analisando a areia reunida ao longo das linhas nodais, onde não havia movimento. Usando esse *método da areia* estudou, também, as vibrações de hastes prismáticas e cilíndricas.

Na primeira metade do Século 19, foram realizados trabalhos experimentais e teóricos relacionados com o desenvolvimento da Acústica. Com efeito, logo em 1802, o físico francês Jean Baptiste Biot (1774-1862) iniciou suas primeiras experiências para a determinação da velocidade do som (V_S). Mais tarde, em 1808, Biot usou uma tubulação de 951 m de ferro (Fe) fundido para determinar a V_S através da mesma. Depois de várias experiências, Biot determinou o intervalo de tempo entre a transmissão e a recepção do som através dessa tubulação e do ar. Conhecendo a V_S no ar sob dadas condições de temperatura e pressão, ele mostrou que V_S através do tubo de ferro era 10,5 vezes maior do que no ar, que é da ordem de 340 m/s. [M. P. Crosland, *IN*: C. C. Gillispie (Editor), Dictionary of Scientific Biography (Charles Scribner´s Sons, 1981)].

Em 1816, o matemático e astrônomo francês Pierre Simon, Marquês de Laplace (1749-1827) corrigiu a fórmula que Newton, em 1687, apresentou para calcular a velocidade do som nos meios elásticos, ou seja: $V_S = \sqrt{e/d}$ e, ao aplicá-la ao ar, ele encontrou um valor cerca de 15% abaixo do valor conhecido (~340 m/s), segundo registramos anteriormente. Para Laplace, a propagação do som no ar é um processo adiabático (troca de calor nula) e não isotérmico (temperatura constante) como Newton havia considerado. Portanto, para Laplace, o valor de e deveria ser multiplicado pela relação (c_P/c_V) entre os *calores específicos* à pressão e a volume constantes. [Charles Coulston Gillispie, *IN*: C. C. Gillispie (Editor), Dicionário de Biografias Científicas III (Contraponto, 2007)].

Pertencendo a uma família de fabricantes e negociantes de instrumentos musicais, o físico inglês Sir Charles Wheatstone (1802-1875) interessou-se por Acústica, em 1823 (*Scientific Papers* 6), quando começou a estudar as características (ver mais adiante) de um som em termos de vibração. Mais tarde, em 1827 (*Quarterly Journal of Sciences, Literature and Arts* 1, p. 344), Wheatstone descreveu um dispositivo que havia inventado – o *caleidofone* ou *caleidoscópio sônico* -, para estudar as vibrações de um bastão com uma extremidade presa e a outra livre. Essas vibrações se tornavam bastante visíveis, quando a extremidade livre recebia um feixe luminoso. Quatro anos depois, em 1831 (*Journal of the Royal Institution* 2, p. 223), Wheatstone estudou a progressão e regressão de *sons musicais* através de condutores lineares sólidos. No ano seguinte, no *Report of the British Association for the Advancement of Science* 2, p. 558 (1832), ele demonstrou que os movimentos de uma *onda estacionária* nas extremidades de um tubo aberto são em direções opostas, pois decorrem da interferência [construtiva: soma de cristas (amplitude máxima positiva) e cavados (amplitude máxima negativa); destrutiva: diferença entre um pico e um cavado] entre ondas progressivas e regressivas. Interessado nas *figuras de Chladni*, em 1833 (*Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 123, p. 593), Wheatstone realizou experiências para estudar a superposição de modos vibracionais de uma placa quadrada. [Sigalia Dostrovsky, *IN*: C. C. Gillispie (Editor), Dictionary of Scientific Biography (Charles Scribner´s Sons, 1981)]

Segundo vimos em verbete desta série, em 1842 (*Abhhandlungen der Königliche Böhmische Gesellchaft de Wissenchaften* 2, p. 465), o físico austríaco Christian Johann Doppler (1803-1853) descobriu que o som emitido por uma fonte

sonora que se desloca na direção do observador parece mais agudo (frequência alta) que o emitido por uma fonte que se desloca com o observador e o som de uma fonte que se afasta do observador, parece mais grave (frequência baixa). Essa observação ficou conhecida como *efeito Doppler acústico*, traduzido pela expressão:

$$f = f_o\ (1 \pm v_{obs}/v_{som})/(1 \mp v_{fonte}/v_{som})\ ,$$

onde f e f_o representam, respectivamente, as freqüências aparente e verdadeira, v_{som}, v_{obs} e v_{fonte} indicam, respectivamente, as ***velocidades do som***, do observador e da fonte e os sinais superiores (inferiores) indicam aproximação (afastamento). Note que a expressão acima foi comprovada pelo meteorologista holandês Christoph Hendrik Diederik Buys Ballot (1817-1890), em 1845, em uma experiência realizada na linha férrea Utrecht-Maarsen. Com efeito, o som de um trompete colocado em um vagão-plataforma de um trem em movimento nessa linha se tornava mais alto para um observador que se encontrava próximo ao trilho, à medida que o trem se aproximava dele, e diminuía quando o trem se afastava.

As vibrações em lâminas metálicas também foram estudadas pelo físico francês Jules Antoine Lissajous (1822-1880). Com efeito, em 1850, ele defendeu, na *Faculdade de Ciências de Paris*, sua Tese de Doutoramento intitulada **Sur la position des noeuds dans les lames qui vibrent transversalement** ("Sobre a posição dos nós em lâminas que vibram transversalmente"). Em 1855 (*Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l´Académie des Sciences de Paris* **41**, p. 93), Lissajous apresentou o resultado de suas experiências sobre a superposição de ***vibrações acústicas***. Para realizar essas experiências, ele inventou um modo de estudar essas vibrações refletindo sobre uma tela (*screen*) um feixe de luz dirigido a um objeto vibrante. Desse modo, produziu as famosas ***figuras de Lissajous***, ao fazer um feixe de luz refletir sucessivamente em espelhos presos em ***diapasões*** (barra metálica em forma de U, fixada a uma caixa; o **som** é produzido quando os ramos da barra são golpeados por um martelo) que vibravam em direções perpendiculares. A persistência da visão sobre a tela causava várias curvas, cujas formas dependiam da frequência relativa, fase (diferença de ângulo entre dois picos da onda) e amplitude (altura da onda) das vibrações dos ***diapasões***. Por exemplo, ***diapasões*** com a mesma frequência e com determinadas diferenças de fase, produzem vários tipos de elipses e suas degenerescências (círculo e reta). Para prosseguir em suas pesquisas, Lissajous inventou o ***fonoptômetro***, que é um microscópio (ver verbete nesta série) vibrante que tem ligado um ***diapasão*** em sua lente objetiva. Assim, as vibrações do objeto com as da lente objetiva formam ***figuras de Lissajous*** e, desse modo, as vibrações do objeto podem então ser analisadas. Os resultados dessas experiências acústico-ópticas foram apresentados por Lissajous em: 1855 (*Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l´Académie des Sciences de Paris* **41**, p. 814), 1857 (*Annales de Chimie* **51**, p. 147), 1868 (*Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l´Académie des Sciences de Paris* **58**, p. 1868) e 1873 (*Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l´Académie des Sciences de Paris* **76**, p. 878). [Sigalia Dostrovsky, **Dictionary of Scientific Biography** (op. cit)].

Na conclusão deste verbete, é interessante destacar algumas características do som. Por exemplo, a altura de um som é a característica que distingue um *som grave* de um *som agudo*. Por outro lado, a intensidade de um som (I) é a característica que distingue um *som forte* de um *som fraco*. Note que I está relacionado com a amplitude da onda sonora que, por sua vez, representa a energia transportada pela *onda sonora*, que atravessa uma unidade de área na unidade de tempo (potência/área). A unidade de medida da *intensidade sonora* é dada em *decibel* [db = b/10, sendo o *bel* (b) uma unidade adimensional que exprime o quociente entre

duas potências (energia por unidade de tempo) (elétrica ou sonora), sendo uma de referência; o b é dado pelo logaritmo decimal ($\log_{10}$) desse quociente]. O timbre de um som é a característica que permite distinguir sons idênticos em altura e intensidade, porém provenientes de fontes distintas; o timbre é determinado pela *forma da onda*. Destaquemos ainda que os *limites de audibilidade* do ouvido humano variam entre 20 e 20.000 hertzs [1 Hz é a unidade de frequência e vale uma vibração (oscilação) por segundo], que correspondem ao limite 0-120 db. Acima do limite máximo, temos os ultrassons; abaixo do limite mínimo, são os infrassons. Por sua vez, o som, sendo uma onda, pode *refletir* (bater e voltar), *difratar* (contornar um obstáculo) e *interferir* (superposição). Chama-se de eco a reflexão do som em um obstáculo. Como $V_S \sim 340$ m/s, a distância mínima (d) para se ouvir o eco (ida e volta) de um som é definida pela expressão: $d = V_S (\Delta t/2)$. Ora, como é de 1/10 de segundo (Δt) a capacidade da audição humana de ouvir dois sons distintos (p.e: no caso do eco), então, a expressão acima dará: $d \sim 17$ m. Para situações em que se tenha $d < 17$ m, o eco chegará aos nossos ouvidos enquanto emitimos o som. Nesse caso, haverá *interferência* entre as ondas incidentes (emitidas) e refletidas, o que provoca o fenômeno conhecido como *reverberação*, manifestada como uma desagradável superposição de *ondas sonoras*. Por outro lado, no caso de uma corda vibrante (p.e: instrumentos de corda), a *interferência* entre as ondas incidentes e as refletivas pelas extremidades presas, produz ondas estacionárias, que são os agradáveis (quando afinados) *harmônicos acústicos*. Ainda é interessante destacar que, como o comprimento de onda ($\lambda = V_S \Delta t$) do som é da ordem de metro, então o som contorna obstáculos que tenham comprimentos dessa ordem. É por essa razão que ouvimos em um compartimento, o que outra pessoa fala em outro compartimento (desde que não sejam isolados acusticamente), fenômeno esse decorrente da *difração do som*. Encerrando este verbete, é interessante dizer que a análise do som (com todas as características anotadas acima) é realizada por um *analisador de Fourier*, que estuda todo o espectro das frequências, espectro esse traduzido pela *série de Fourier* (proposta em 1822, conforme registramos em verbete nesta série). [Francis Weston Sears, Física: Mecânica, Calor e Acústica (Ao Livro Técnico Ltda., 1956); Ugo Amaldi, Imagens da Física: As Ideias e as Experiências do Pêndulo aos Quarks (Scipione, 1995)].

ANTERIOR SEGUINTE