

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

FCM 208 Física (Arquitetura)

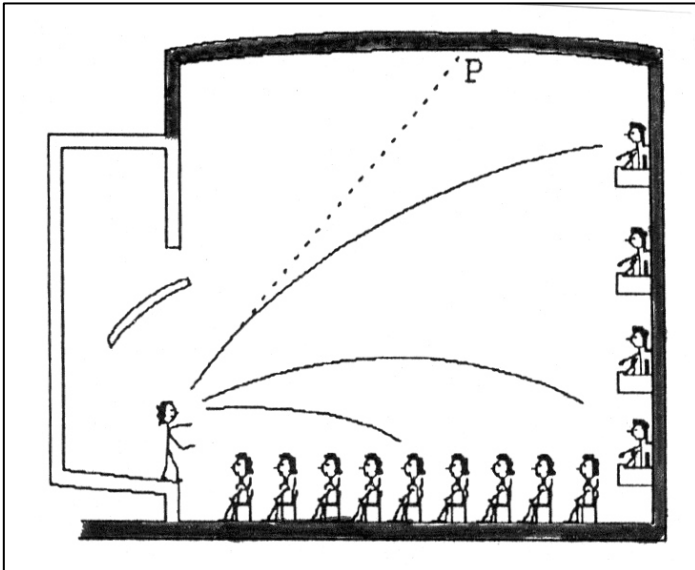
Som e Acústica

Segunda parte: natureza ondulatória do som

Prof. Dr. José Pedro Donoso

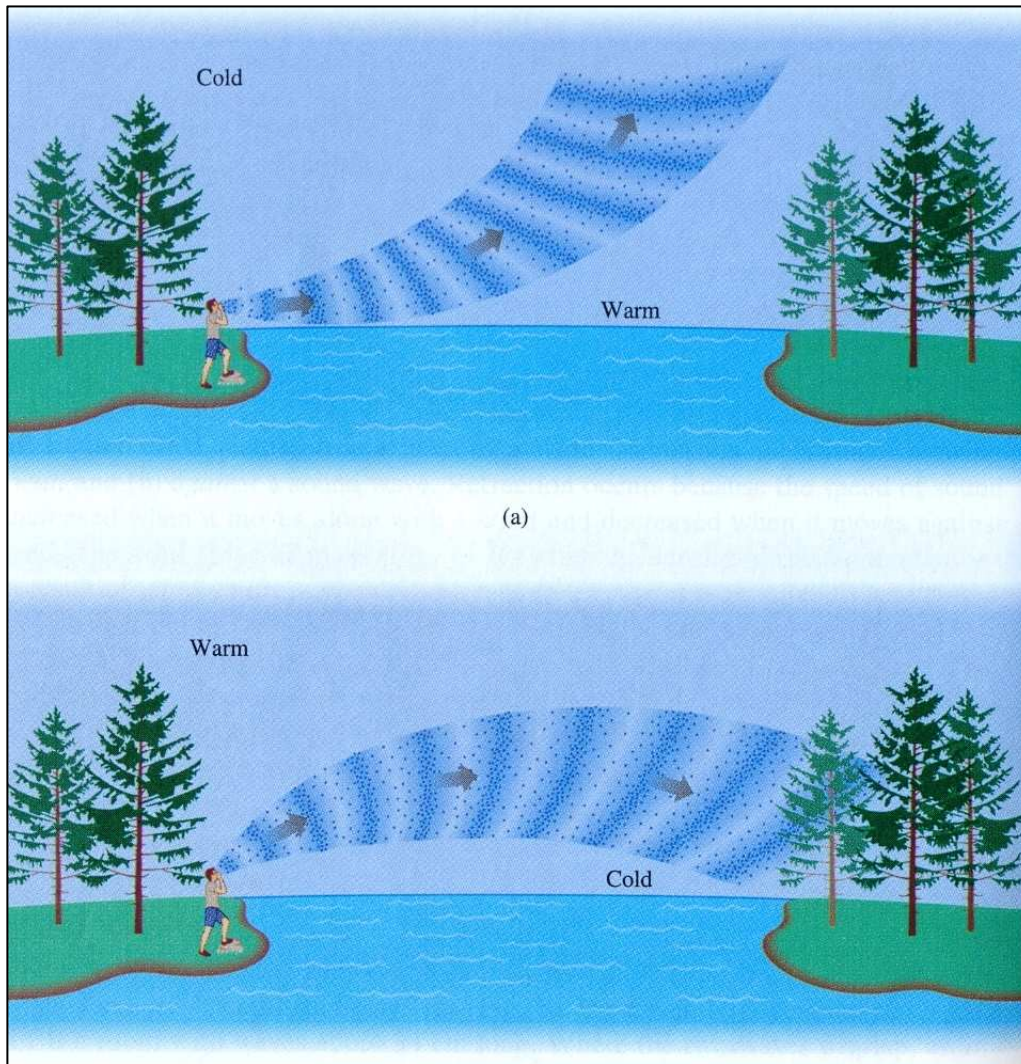
Natureza ondulatória do som

Reflexão, refração, difração, interferência, superposição e ressonância



A figura ilustra a **refração do som** numa sala de concerto. A maior temperatura na região superior em relação a platéia, refrata o som e favorece a sua propagação.

O ar a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ transporta o som a 1180 km/h ; à temperatura de uma sala ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$) o som viaja a 1250 km/h . Desse modo, quando as ondas do som se movem do ar frio para o ar quente, ganham velocidade. Se entrarem na camada quente em ângulo, a parte superior de cada onda é a primeira a mover-se mais depressa; cada onda é curvada.

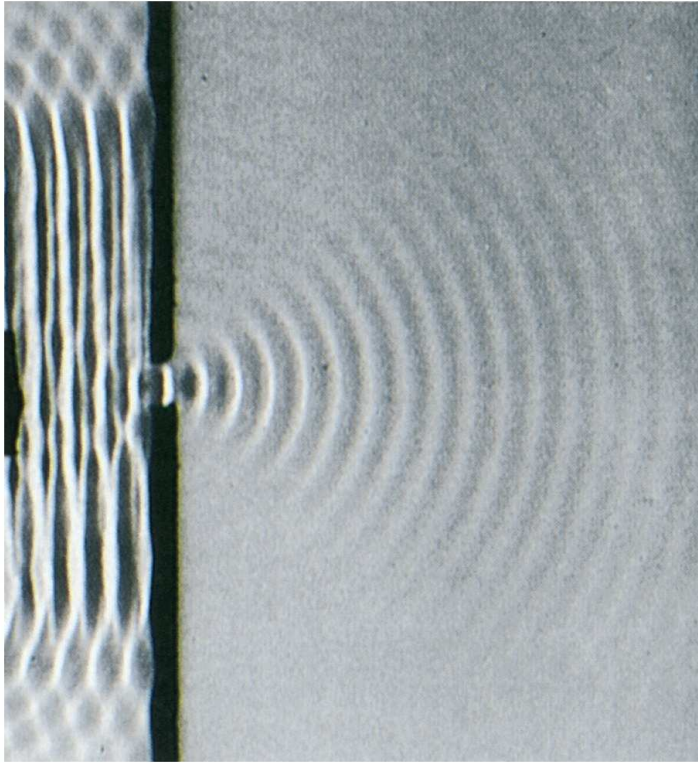


E. Hecht, *Physics* (Brooks Cole, 1994)

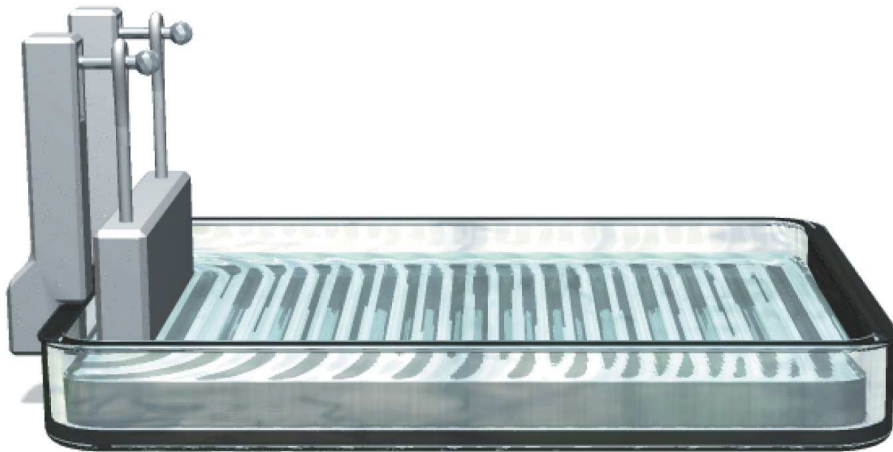
Refração do som

A densidade do ar varia como resultado da variação da temperatura.

A velocidade do som é maior no ar quente. Como a frequência do som não se altera, o comprimento de onda λ aumenta. A frente de onda se inclina e altera a direção de propagação.



Ondas planas num tanque de onda, incidindo sobre uma barreira que tem uma abertura pequena frente ao comprimento de onda, λ . Depois de superada a barreira, as frentes de onda são circulares, centradas na abertura. Este encurvamento da frente de onda é a **difração**.



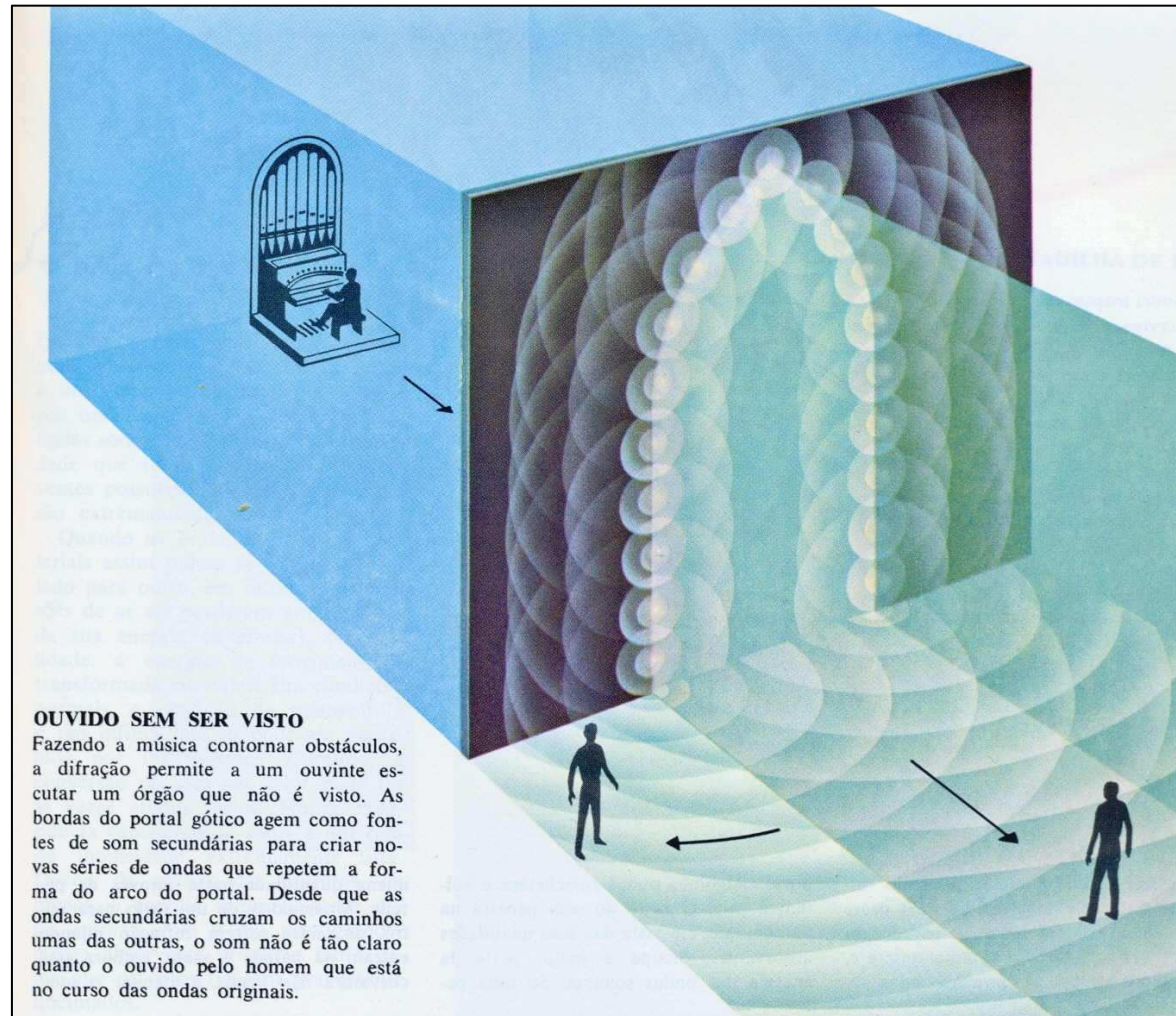
O comportamento de uma onda pode ser estudado num tanque de ondas, geradas por uma lâmina que oscila na água. Esta técnica também é utilizada para simular o comportamento das ondas sonoras frente a obstáculos.

Tipler, *Física* (Editora LTC, 2000)



Pela **difração** as ondas sonoras podem contornar obstáculos criando novas séries de ondas. Estas ondas secundárias se irradiam do obstáculo como se este fosse a fonte do som.

A figura ilustra a **difração do som**, que é a propriedade de propagar-se rodeando obstáculos para chegar a lugares que estão à “sombra”.

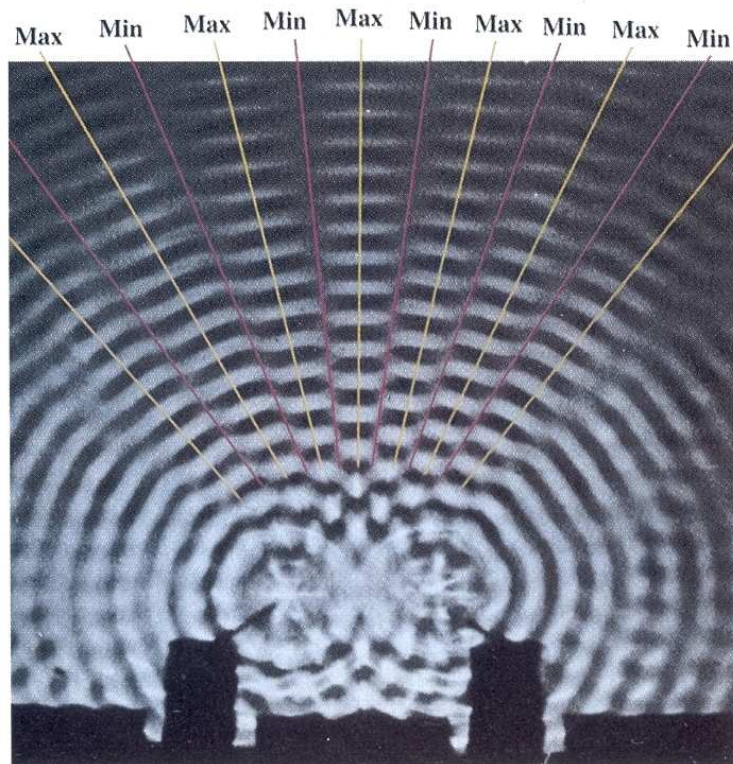


OUVIDO SEM SER VISTO

Fazendo a música contornar obstáculos, a difração permite a um ouvinte escutar um órgão que não é visto. As bordas do portal gótico agem como fontes de som secundárias para criar novas séries de ondas que repetem a forma do arco do portal. Desde que as ondas secundárias cruzam os caminhos umas das outras, o som não é tão claro quanto o ouvido pelo homem que está no curso das ondas originais.



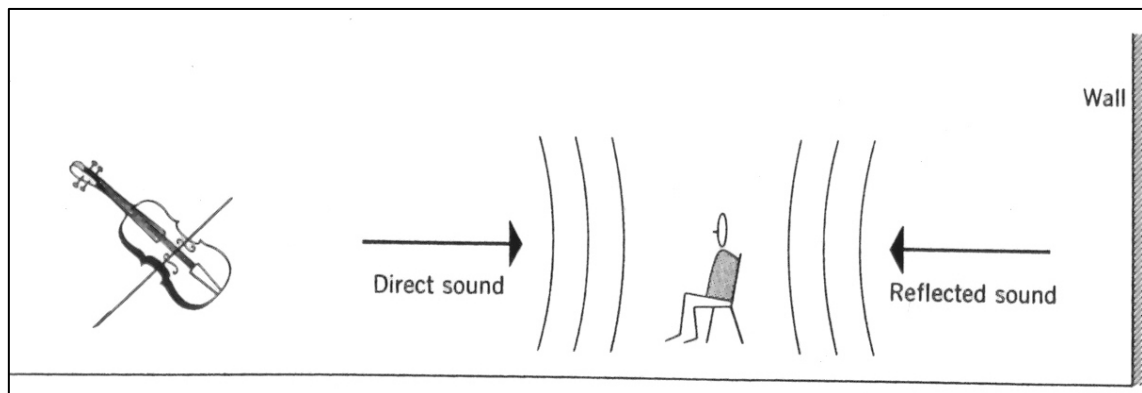
As ondas sonoras são formadas de zonas alternadas de pressão alta (compressões) e baixa (rarefações). Quando ondas de fontes diferentes se chocam, ocorre a **interferência**. Este fenômeno pode ser observado num tanque de ondas na água.



Reflexão do som

A reflexão do som pode dar origem ao **reforço**, à **reverberação** ou ao **eco**, dependendo do intervalo de tempo entre a percepção do som direto e do refletido.

O ouvido humano só consegue distinguir dois sons que chegam a ele com um intervalo de tempo superior a **um décimo de segundo** (0.1 s). Se em algum ponto de uma sala a diferença de caminhos entre o som direto e o refletido for muito grande, a **audição será confusa**



Beranek, *Music, acoustic and architecture* (Wiley, 1962)

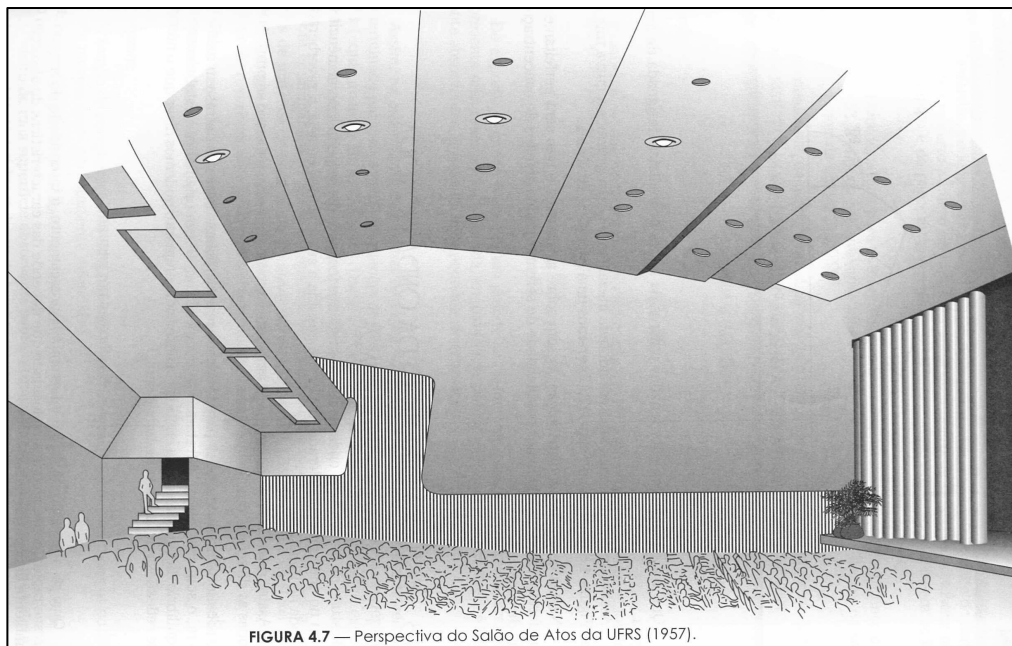
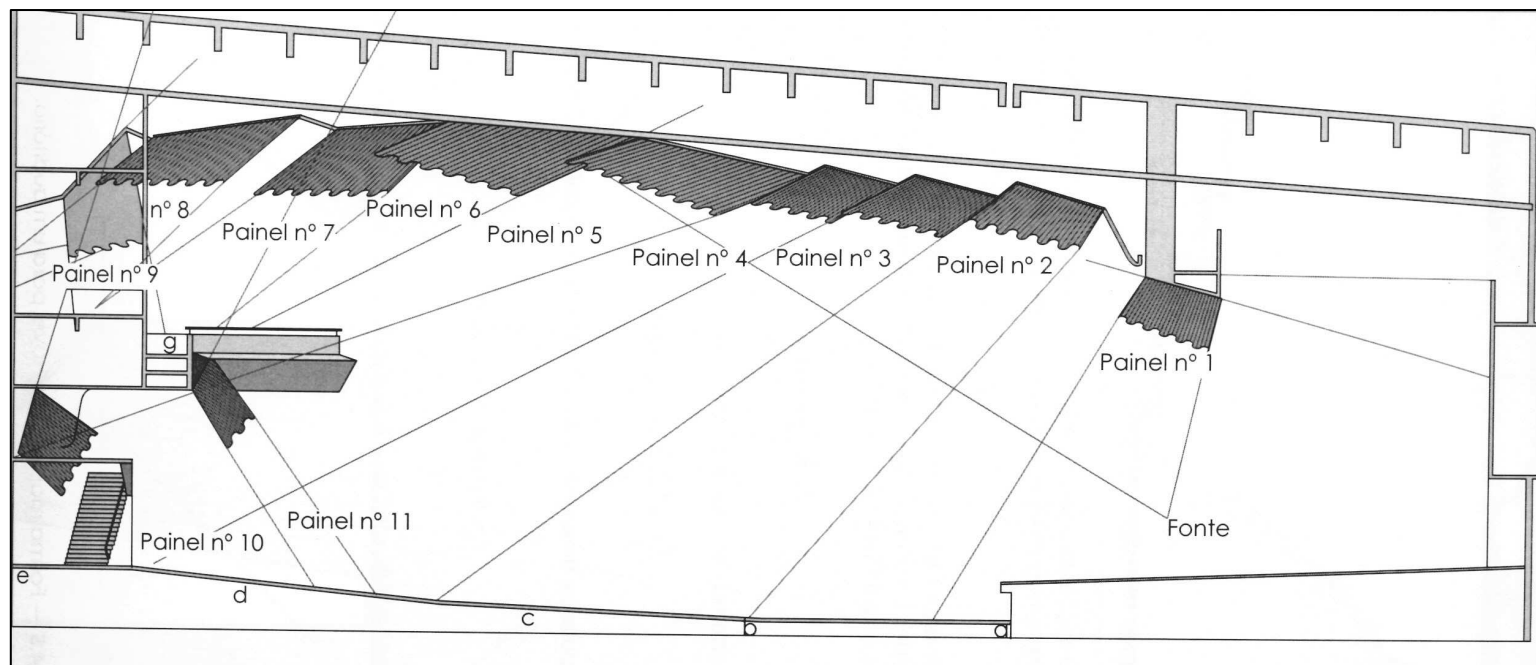


FIGURA 4.7 — Perspectiva do Salão de Atos da UFRS (1957).

Utilização de superfícies refletoras no forro, com orientação tal que as ondas refletidas atinjam os ouvintes, com intervalos de tempo reduzidos em relação ao som direto.

Ref: Ennio Cruz da Costa, *Acústica Técnica* (Editora Blücher, 2003)





Painéis refletores

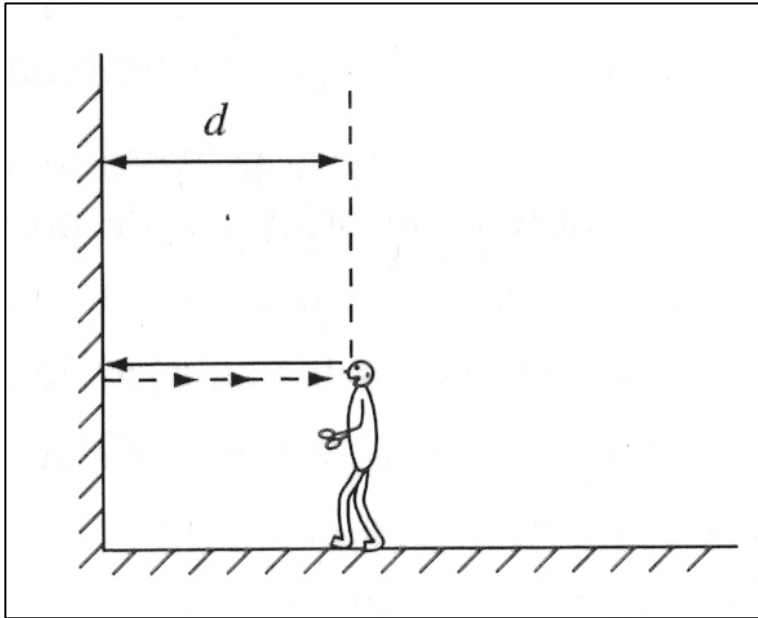
Aula Magna, Ciudad Universitaria de Caracas (Venezuela)

O auditório não tem as colunas, lustres e ornamentos que difundiam o som e impediam os ecos nas salas antigas.

Os painéis foram planejados por um técnico em acústica e concebidos pelo escultor [Alexandre Calder](#), os painéis suspensos do teto e paredes difundem o som que, de outro modo, poderia repercutir dentro do vasto e curvo auditório.

F. Daumal I Domènech: *La arquitectura del sonido*. **Tectonica** vol. 14 (ATC, Madrid, 1995)
S.S. Stevens, F. Warshofsky, *Som e Audição* (Biblioteca Life, Ed. Jose Olympio, 1982)

Aplicações

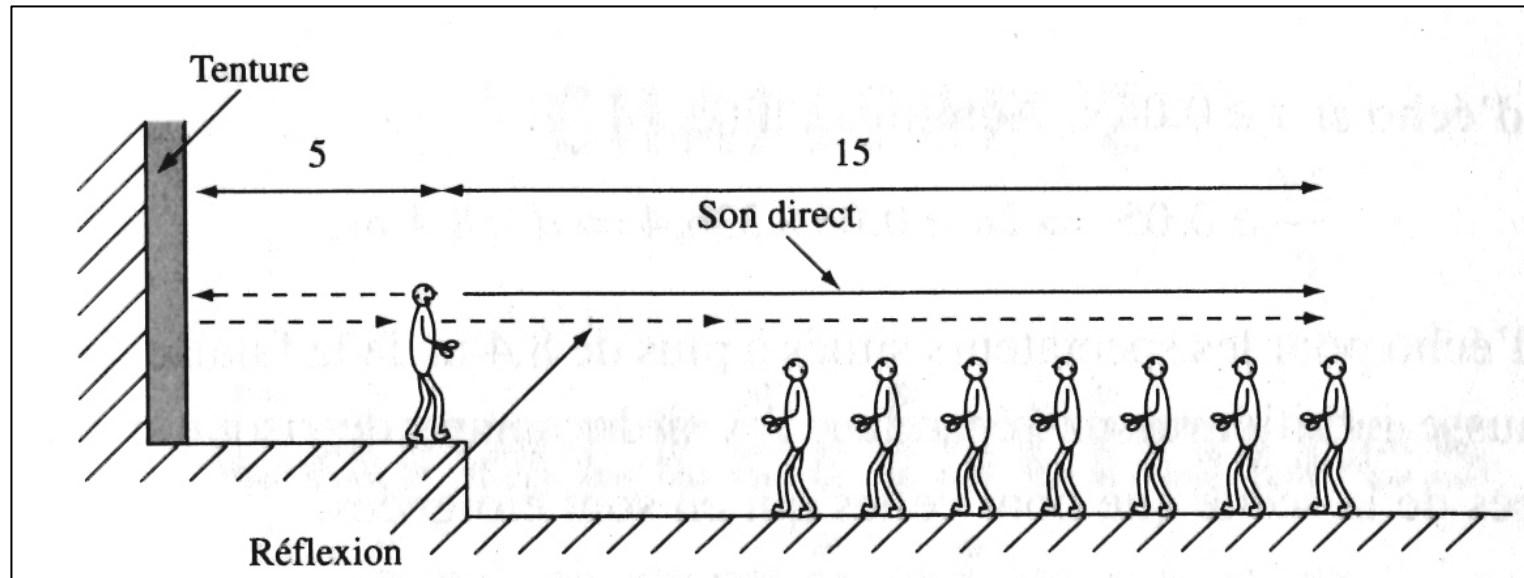


Uma pessoa se coloca frente ao muro e dá um grito. Determinar a distância mínima, d a partir da qual um eco será perceptível

Solução: Para ir até o muro e voltar, o som leva um tempo: $\tau = 2 \frac{d}{v}$
onde v é a velocidade do som no ar (340 m/s).

Escutaremos um eco se: $2 \frac{d}{v} \geq 50ms$
ou seja, se $d \geq 8.5$ m

A. Fischetti, *Initiation à l'acoustique* (Ed. Belin, Paris, 2003)

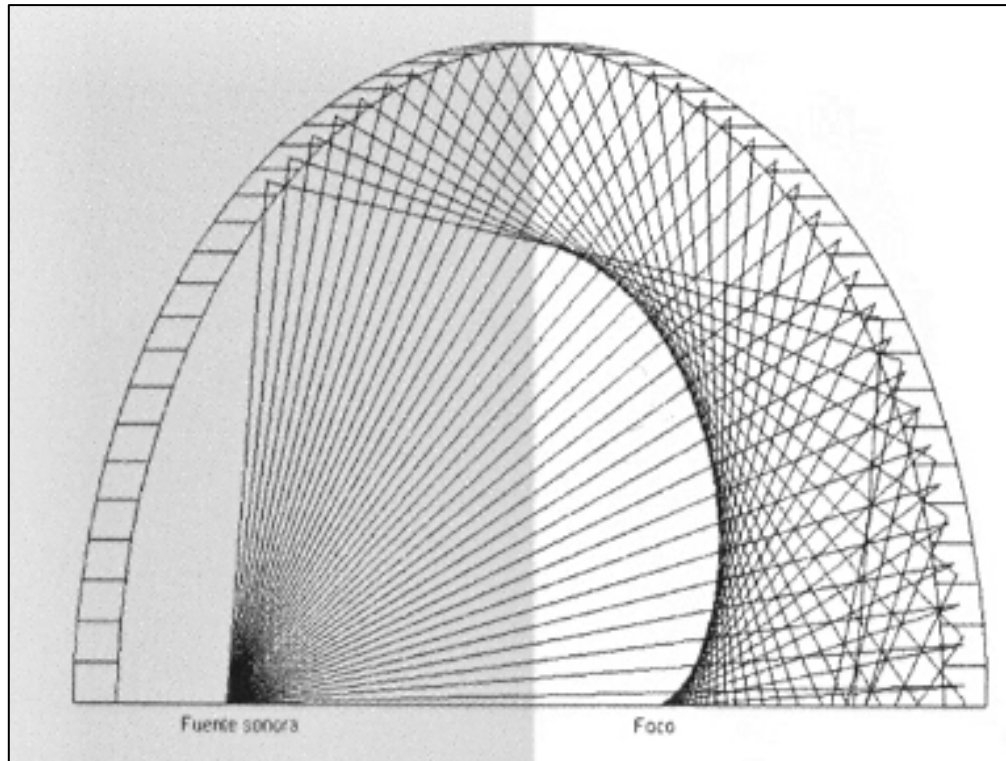


Um teatro possui um palco de 5 m de profundidade. Frente ao muro do fundo há uma cortina de pano. A questão é saber se, ao ser levantada a cortina, as reflexões de som no muro vão provocar um eco desagradável na audiência.

Resposta: Consideremos um espectador a 15 m do palco. O som direto percorre 15 m enquanto que o refletido percorre 25 m. Os 10 m de diferença resultam num retardo de 29.4 ms. O eco não será percebido pelo espectador.

A. Fischetti, *Initiation à l'acoustique* (Ed. Belin, Paris, 2003)

Focalização do som

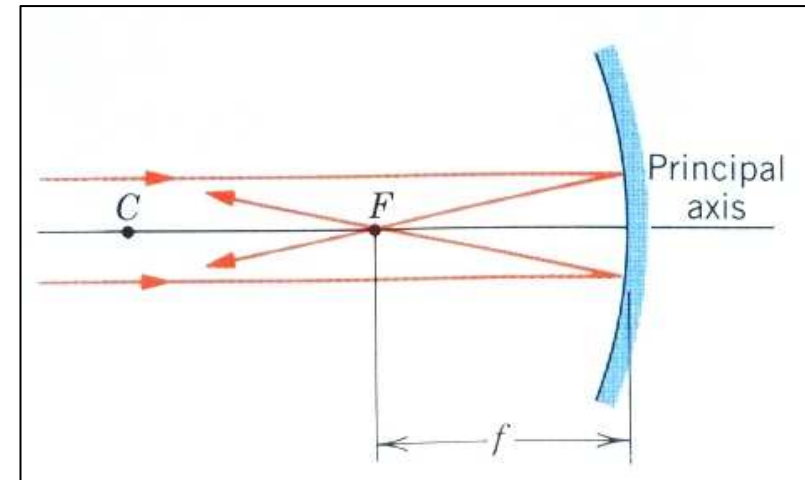


G.R. Vilarroig, J.M. Marzo Diez
Tectónica, vol. 14: Acústica
(ATC ediciones, Madrid, 1995)

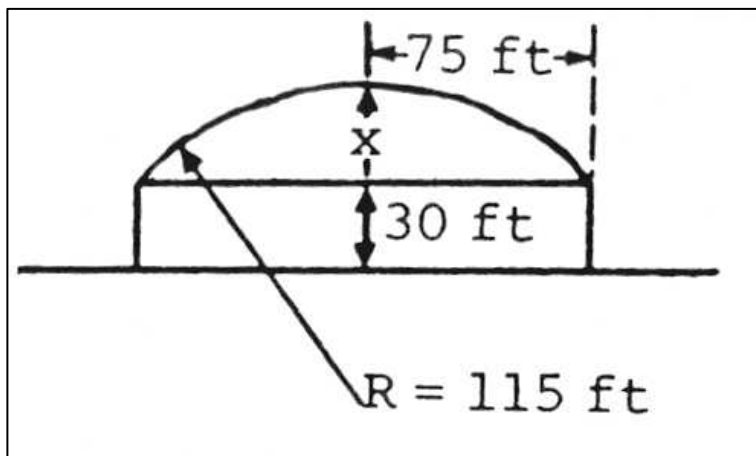
Exemplo de focalizações: concentrações sonoras numa sala hemisférica com teto refletivo. As focalizações se produzem quando o som refletido se concentra numa região, provocando uma excessiva energia sonora no local. A causa principal é a existência de superfícies côncavas: cúpulas parabólicas ou circulares, plantas elípticas, etc.

Espelhos acústicos

As superfícies esféricas podem causar perturbações acústicas importantes porque elas atuam como verdadeiros **espelhos acústicos**, concentrando as ondas sonoras refletidas.



Exemplo: área de esportes na forma de um domo (abóbada) com raio de curvatura $R = 35$ m, montada numa base cilíndrica de 23 m de raio e 9.2 m de altura. Determine a localização da distância focal com relação à superfície do campo.

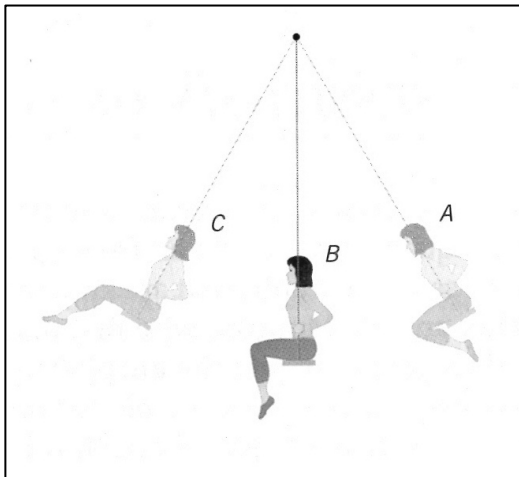


Resposta: A altura da abóbada é 17.7 m. O ponto focal do espelho acústico fica na altura do chão. Todo o ruído dos espectadores é focalizado no centro do campo, de forma que os jogadores de *hockey* não conseguiram comunicar-se nem escutar a voz do árbitro.

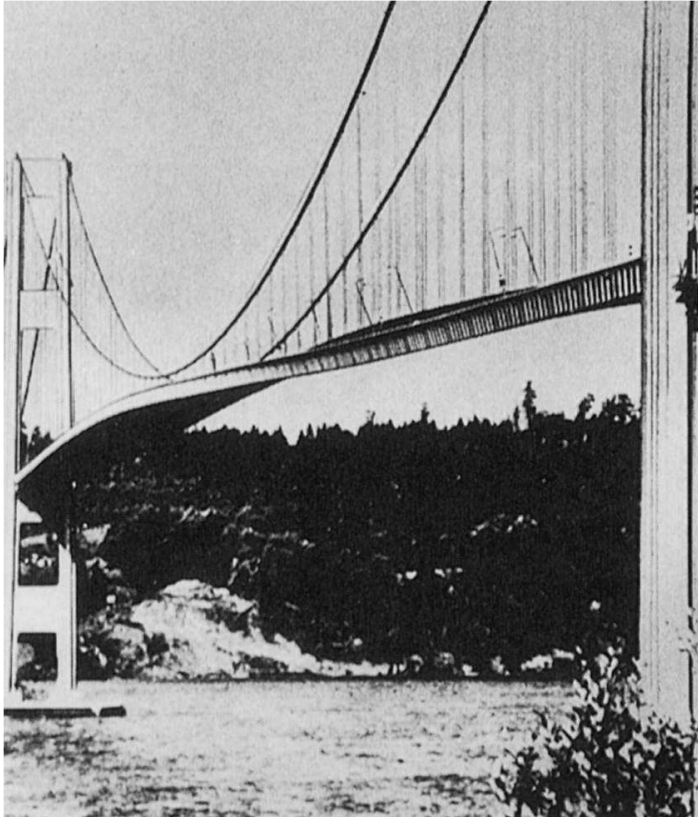
Fogiel, *Physics Problems Solver* (REA, 1995)

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.

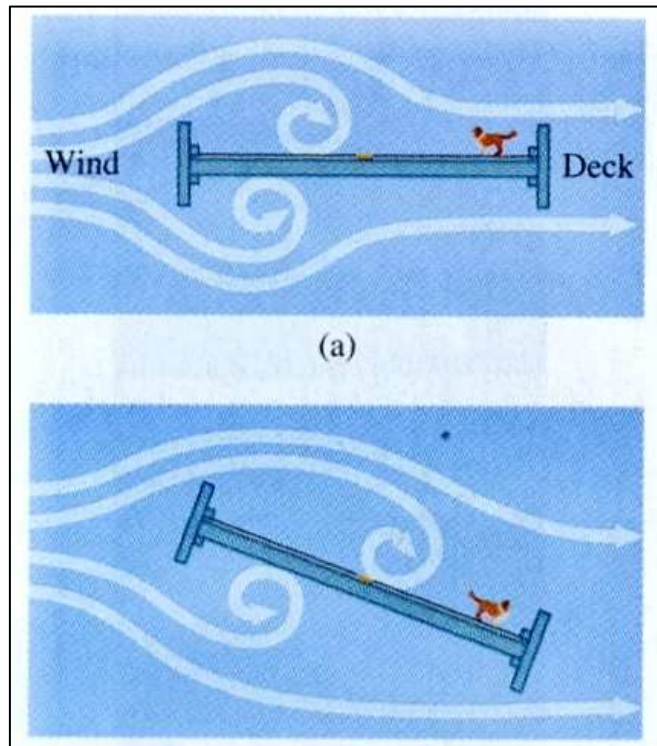


Um exemplo histórico do fenômeno de **ressonância** foi a queda da ponte pênsil do estreito de Tacoma (Washington, EUA) quando ventos soprando sobre a ponte provocaram oscilações de ressonância que levaram à sua destruição em novembro de 1940, quatro meses depois de ter sido inaugurada.

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.

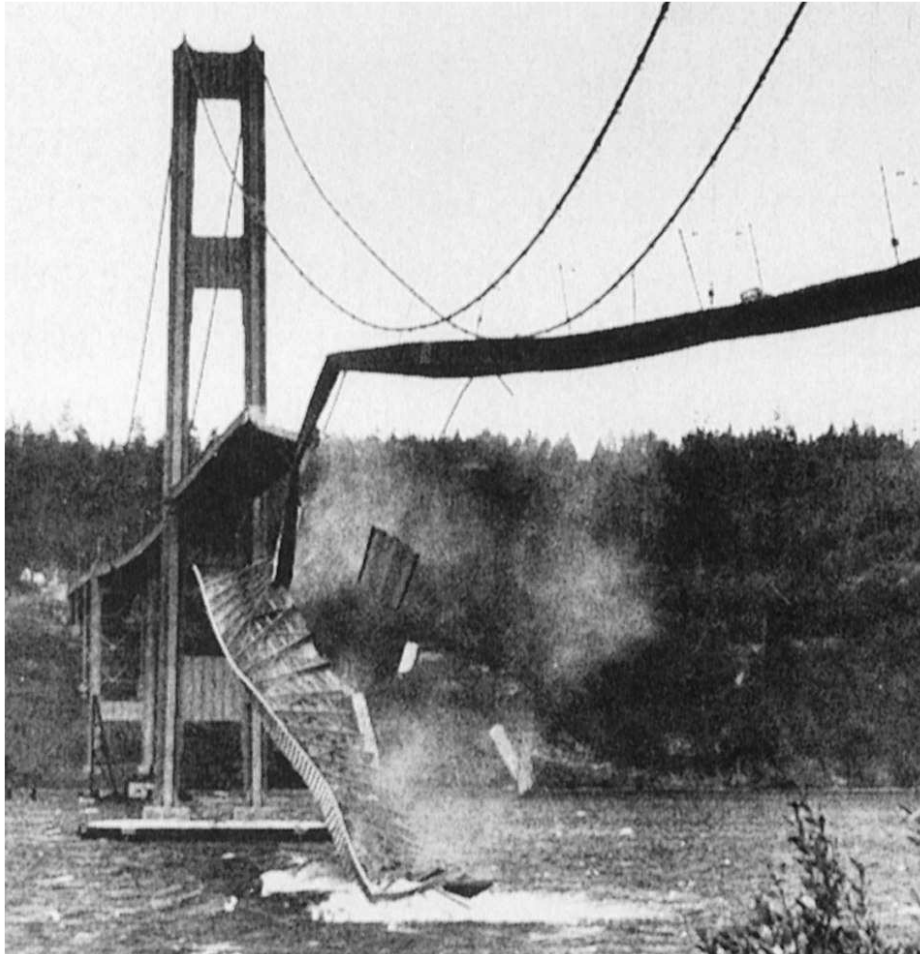
E. Hecht, *Physics* (Brooks & Cole, 1994)



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)



Ressonância acústica

O fenômeno de ressonância é muito importante na compreensão das propriedades dos **instrumentos musicais** e o modo como eles produzem seu som característico.

O ar contido numa cavidade possuirá uma série de freqüências de ressonância associadas aos modos normais de vibração, constituindo uma cavidade acústica ressonante.

O som que se origina das cordas vibrantes de um instrumento musical (violino ou piano) é profundamente influenciado pela “caixa acústica” do instrumento.

Afinação das cordas

A **frequência de vibração** depende do comprimento (L), a massa (μ) e a tensão da corda (T):

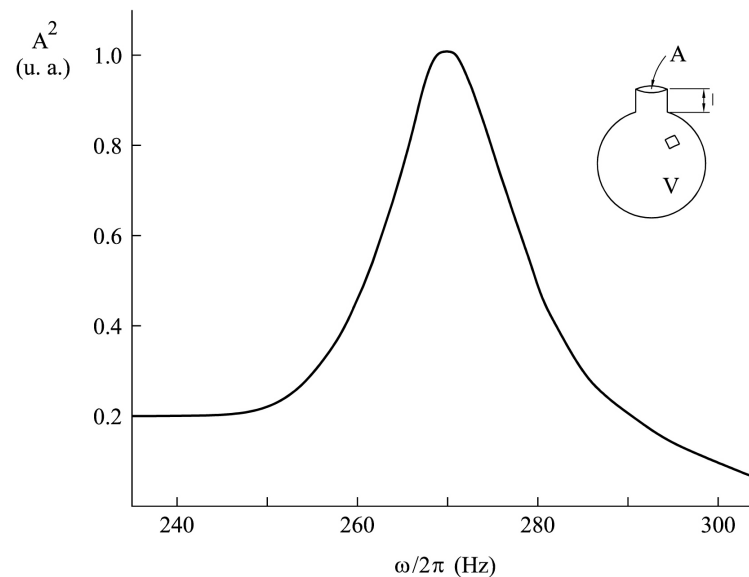
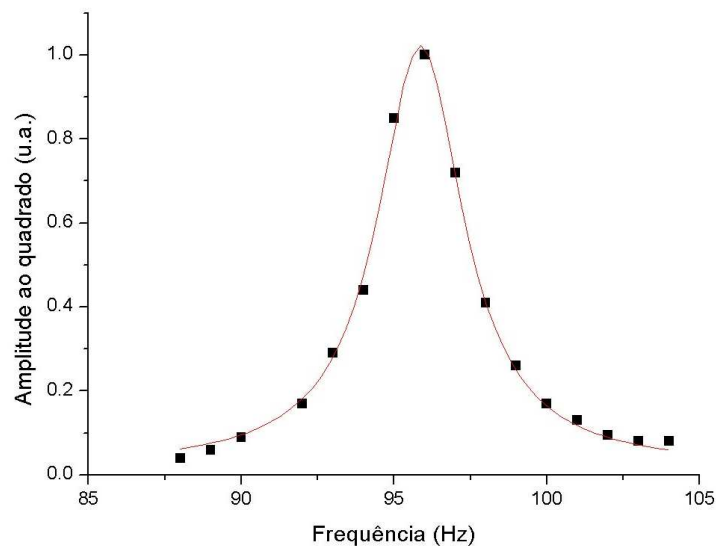
$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$



- Sol₃ (G₃) : 196 Hz
- Re₄ (D₄) : 293.66 Hz
- Lá₄ (A₄) : 440 Hz
- Mi₅ (E₅) : 659.26 Hz

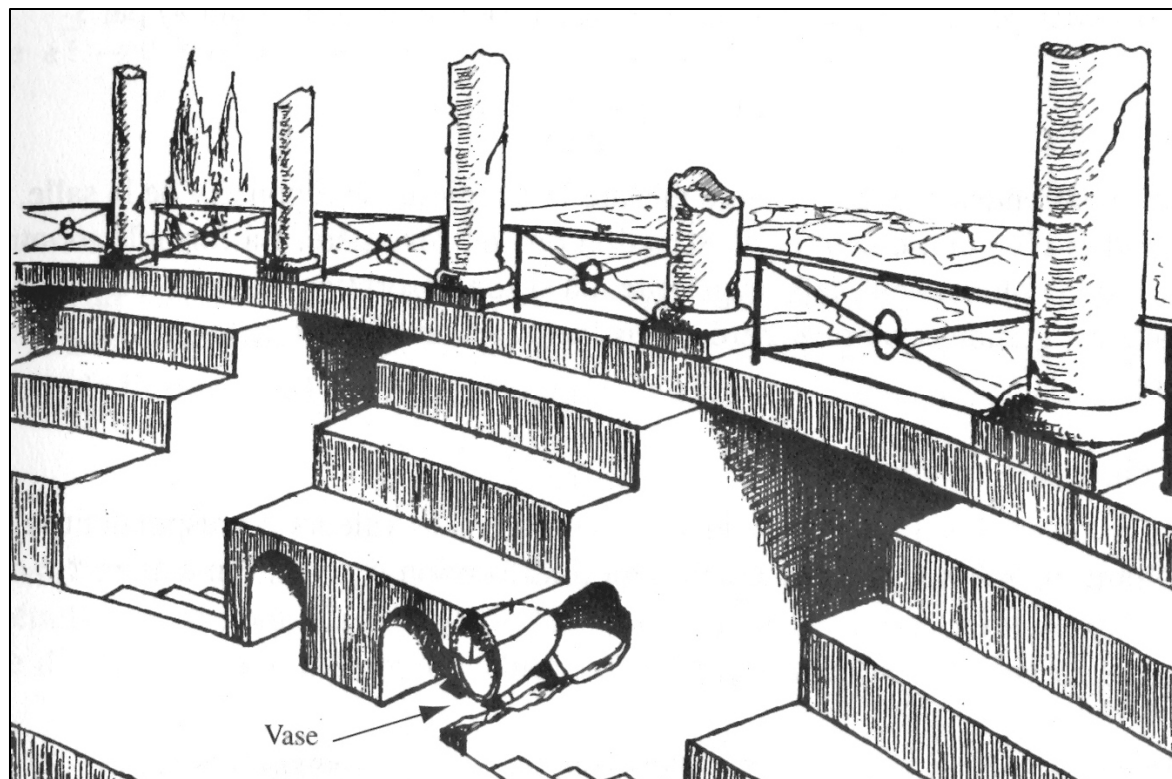
Nota	Frequência (Hz)
La	27,500
Si	29,135
Do	30,863
Re	32,703
Mi	34,648
Fa	36,708
Sol	38,891
La	41,203
Si	43,654
Do	46,249
Re	48,999
Mi	51,913
Fa	55,000
Sol	58,270
La	61,735
Si	65,406
Do	69,269
Re	73,416
Mi	77,782
Fa	82,407
Sol	87,307
La	92,499
Si	97,999
Do	103,83
Re	110,00
Mi	116,54
Fa	123,47
Sol	130,81
La	138,59
Si	146,83
Do	155,56
Re	164,81
Mi	174,61
Fa	185,00
Sol	196,00
La	207,65
Si	220,00
Do	233,08
Re	246,94
Mi	261,63
Fa	277,18
Sol	293,66
La	311,13
Si	329,63
Do	349,23
Re	369,99
Mi	392,00
Fa	415,30
Sol	440,00
La	466,16
Si	493,88
Do	523,25
Re	554,37
Mi	587,33
Fa	622,25
Sol	659,26
La	698,46
Si	739,99
Do	783,99
Re	830,61
Mi	880,00
Fa	932,33
Sol	987,77
La	1.046,5
Si	1.108,7
Do	1.174,7
Re	1.244,5
Mi	1.318,5
Fa	1.396,9
Sol	1.480,0
La	1.568,0
Si	1.661,2
Do	1.760,0
Re	1.864,7
Mi	1.975,5
Fa	2.093,0
Sol	2.217,5
La	2.349,3
Si	2.489,0
Do	2.637,0
Re	2.793,0
Mi	2.960,0
Fa	3.136,0
Sol	3.322,4
La	3.521,0
Si	3.729,3
Do	3.951,1
Re	4.186,0

Nos instrumentos de corda, a ressonância do ar na cavidade (A_0) coincide com a frequência da nota da segunda corda



	Corda 1	Corda 2	Corda 3	Corda 4	A_0
Violino	Sol ₃ 196.0 Hz	Re ₄ 293.7 Hz	La ₄ 440 Hz	Mi ₅ 659.3 Hz	275 Hz
Cello	Do ₂ 65.4 Hz	Sol ₂ 95 Hz	Re ₃ 146.8	La ₃ 220 Hz	96 Hz

Absorção por ressonadores

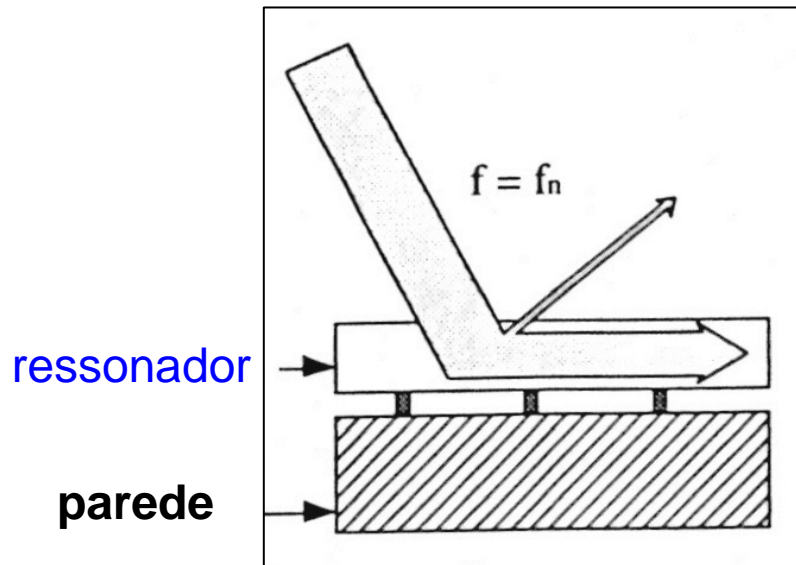


Fischetti, *Initiation
à l'acoustique*
(Belin, 2003)

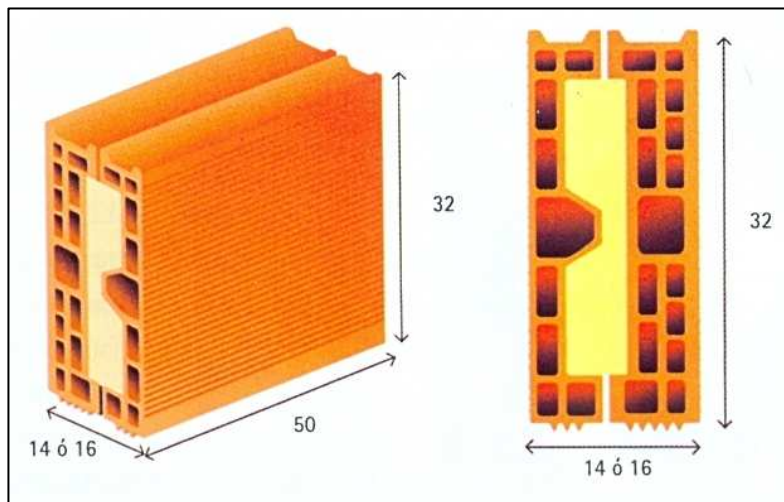
Nos teatros antigos e nas igrejas da idade média se encontram cavidades, chamadas de *vasos acústicos*. Nos teatros, estes ressonadores serviam para amplificar a voz dos atores. Nas igrejas eles tinham uma função de absorção, contribuindo para atenuar a reverberação na região de baixas frequências (a frequência de ressonância destes vasos é da ordem de 200 Hz).

Painéis acústicos

Atuam como absorvedores de baixas frequências. Montados à frente de uma parede, funcionam como um sistema massa/mola. Se a frequência da onda incidente for igual à frequência própria do dispositivo ressonante, haverá a máxima transferência de energia, diminuindo a onda refletida.



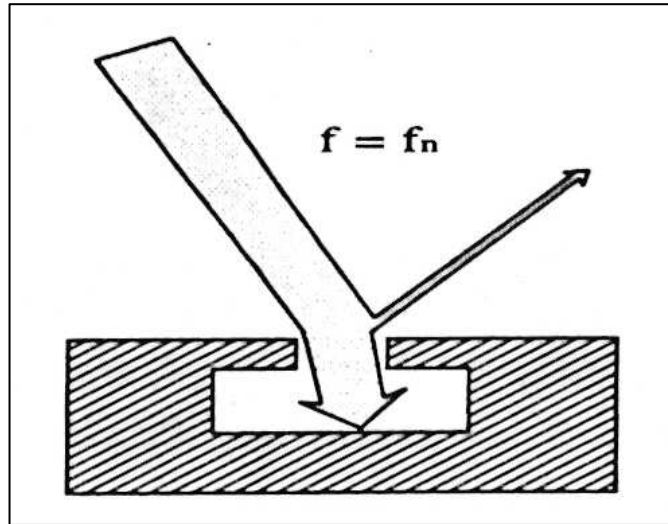
Grehant, *Acoustique et Batiment*



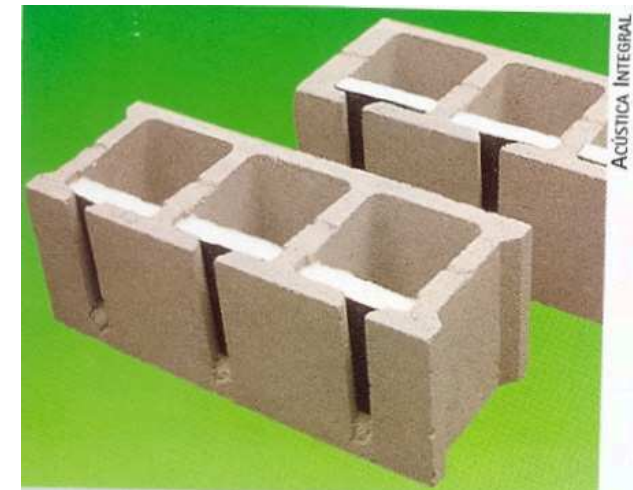
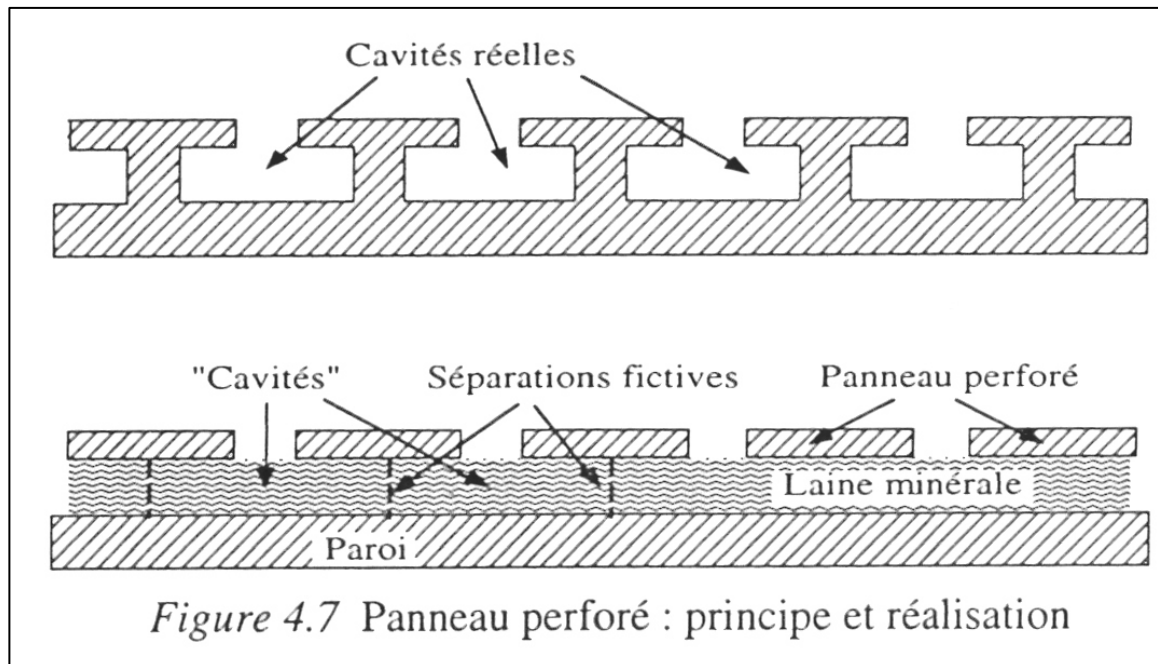
Elementos cerâmicos isolantes

Acustistac@ : bloque cerâmico formado por duas peças entre as quais se incorpora lã de vidro. As paredes construídas com este produto conseguem um isolamento de 53 dB

Tectónica, vol. 14 (ATC ediciones, Madrid, 1995)

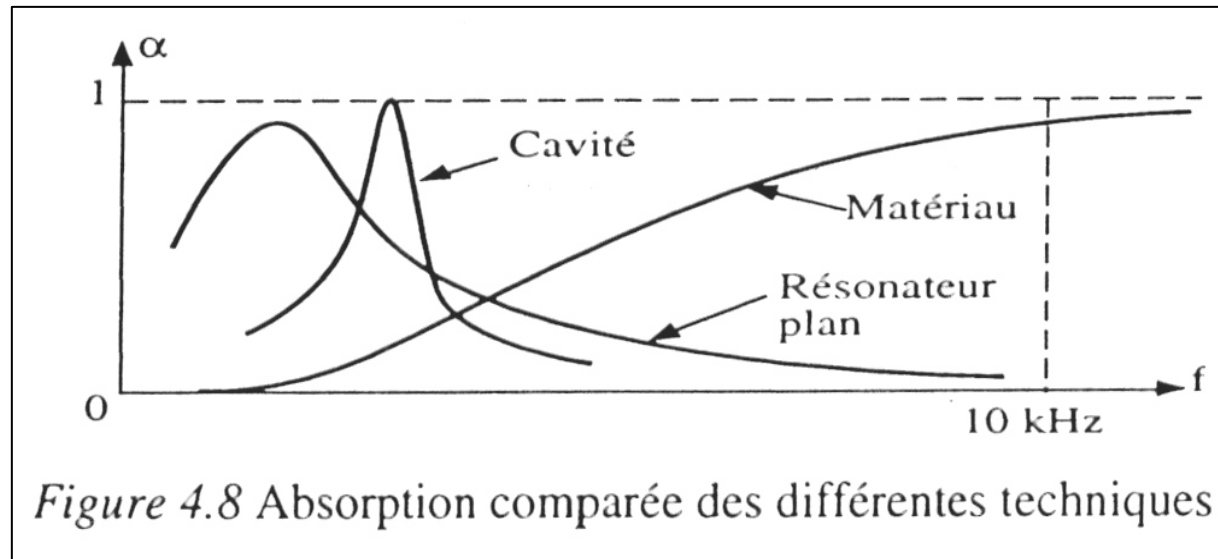


Outro ressonador muito utilizado consiste num conjunto de **cavidades de Helmholtz**. Cada cavidade constitui um ressonador cuja frequência de absorção depende da geometria da cavidade. Estas cavidades podem ser tijolos atrás de painéis perfurados. Um material absorvente é frequentemente intercalado entre o painel perfurado e a parede



B. Grehant
Acoustique et bâtiment

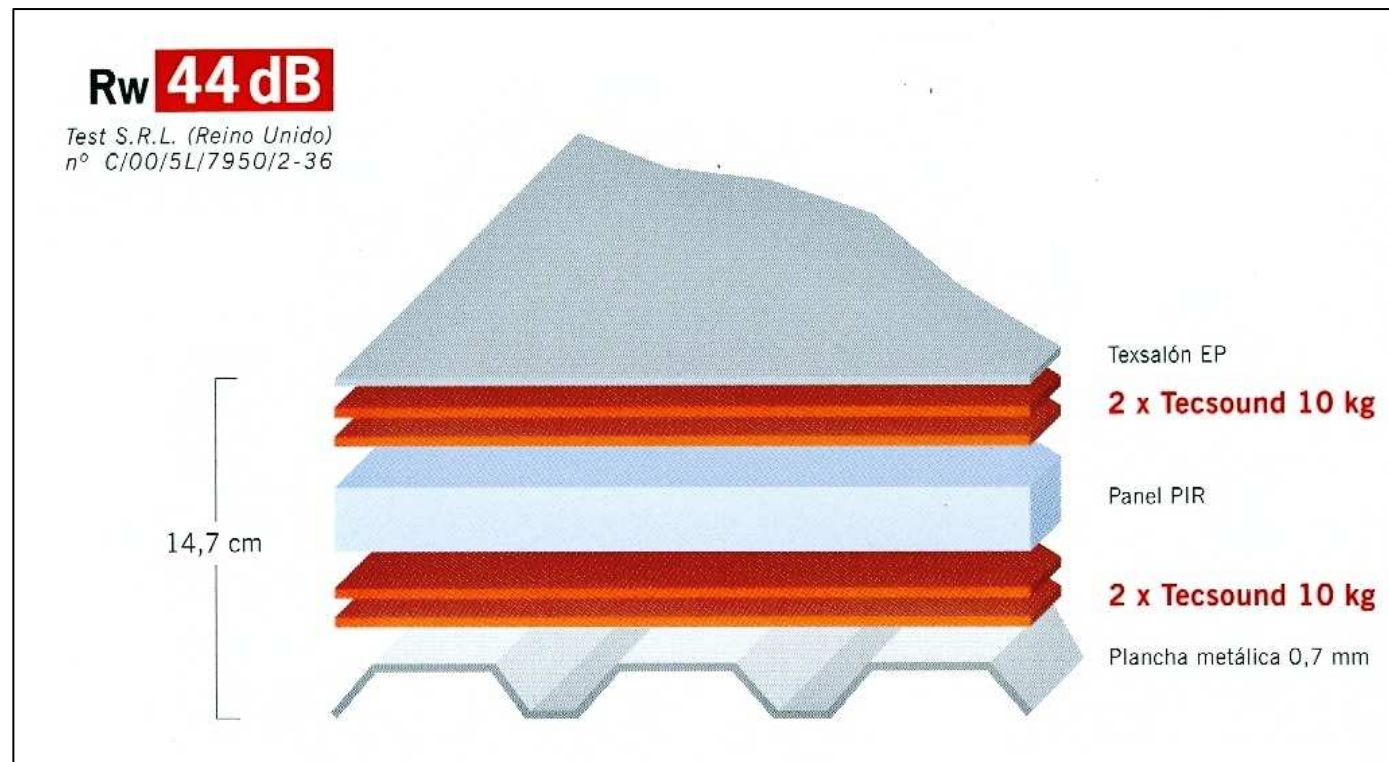
Comparação dos métodos de absorção acústica



Os painéis acústicos são absorvedores muito eficientes em baixas frequências. Os ressonadores de Helmholtz (cavidades nas paredes) são mais eficientes que outras técnicas de absorc o, mas a banda de frequência onde atuam   bastante estreita. A presença de materiais porosos (com alto coeficiente de absorc o) resulta na absorc o em frequências ainda mais elevadas.

B. Grehant, *Acoustique et batiment* - **A. Fischetti**, *Initiation   l'acoustique*

Aplicações industriais: combinação de materiais fono-absorventes para isolamento acústico de cabines, salas de máquinas, etc. A *Tecsound@* é uma lâmina sintética com base polimérica de alta densidade (www.texsa.com)



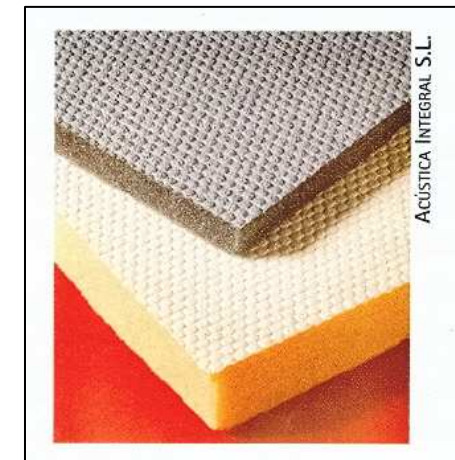
Revista Tectónica, vol. 14: Acústica (ATC ediciones, Madrid, 1995)

Steven Holl (Holanda)

Acondicionamento acústico com materiais fibrosos ou porosos. O material absorvente se coloca dentro de bandejas metálicas perfuradas de forma que os mecanismos de absorção acústica se integram no conceito arquitetônico.



G.R. Vilarroig, J.M. Marzo Diez
Tectónica, vol. 14: Acústica
(ATC ediciones, Madrid, 1995)



Exemplo: Frequências de ressonâncias de uma sala retangular

Considere uma onda sonora de frequência f e comprimento de onda λ . Se um número inteiro de $(\lambda/2)$ da onda sonora se acomodam entre as duas paredes opostas de uma sala, se estabelecerá uma onda estacionária. As frequências de ressonância para um recinto de dimensões $l_x \times l_y \times l_z$ são:

$$f_{x,y,z} = \frac{v}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2}$$

Determine as frequências de ressonância para $(n_x, n_y, n_z) = (002), (003), (010), (011), (101), (110), (200)$ e (020) de um **box de banheiro** de $0.8 \text{ m} \times 1.2 \text{ m} \times 2.1 \text{ m}$.

Resposta: 162 Hz, 243 Hz, 142 Hz, 163 Hz, 227 Hz, 425 Hz, 255 Hz e 283 Hz.

Todas elas ficam muito próximas, reforçando as notas cantadas na região correspondente a oitava central do piano. Esta acústica, com paredes lisas e refletoras, e tempos de reverberação longos, favorece o “artista” que canta no box do banheiro, dando uma sensação de uma voz encorpada e ressonante.

Referências bibliográficas

- *Acústica Técnica*, Ennio Cruz da Costa (editora Edgard Blucher, 2003)
- *Initiation à l'acoustique*, Antonio Fischetti (Ed. Belin, Paris, 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)
- *Acustica 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)