

2. ACÚSTICA CONCEITUAL

É errado supor que a bagagem de conhecimentos indispensáveis ao arquiteto possa limitar sua capacidade criadora. É errado supor, também, que o objetivo prático da obra de arquitetura, possa entravar a liberdade de concepção. O artista saberá encontrar sempre sua própria e vigorosa expressão superando quaisquer injunções.
(Rino Levi).

A fim de que se possa estudar possíveis formas e dimensões que poderão ser adotadas pela Arquitetura para isolar o edifício de ruídos urbanos, torna-se necessário, neste momento, compreender as principais características das ondas sonoras, como sua origem, sua propagação e seu comportamento em um obstáculo. Este capítulo pretende, essencialmente, fornecer conceitos para viabilizar esta análise ulterior dos métodos ideais para atenuar o ruído na cidade.

O som é analisado, normalmente, em três momentos: a fonte e suas principais características; a propagação no ar e suas condicionantes; e o receptor.

2.1 Principais fontes na paisagem sonora

Os sons podem ser gerados por diversos mecanismos. Um deles é por meio de uma estrutura vibrante, como, por exemplo, um diapasão. Um outro mecanismo é por uma esfera pulsante, como um motor de combustão interna, onde a ponteira do escapamento libera gases da combustão de forma pulsante, e a esfera, por sua vez, ao pulsar desloca o ar que a circunda. Assim, enquanto a esfera pulsante gera

ondas esféricas, a ponteira do escapamento gera ondas cujas características dependem do comprimento de onda do som gerado (BISTAFA, 2006).

Quando o comprimento de onda é muito maior que a dimensão da fonte, as ondas geradas são esféricas; quando o comprimento de onda é igual ou menor que a dimensão da fonte, a radiação sonora tende a ser direcionada. Assim, nas altas frequências, cujos comprimentos de onda são pequenos, a fonte apresentará direções preferenciais de radiação sonora e se tratará de uma fonte direcional. Já quando uma fonte sonora não apresenta direções preferenciais de radiação, caso da esfera pulsante, será uma fonte onnidirecional. (BISTAFA, 2006).

O resultado da onnidirecionalidade é que a potência acústica tende a se distribuir uniformemente em todas as direções, já na sua ausência, o som é mais irradiado em determinadas direções do que em outras, conforme se observa na figura 21, onde um transformador elétrico produz som com contornos não circulares, pois uma de suas superfícies irradia mais som do que as outras.

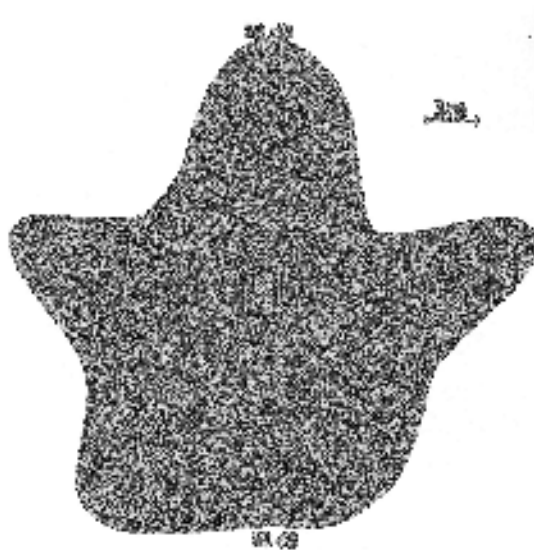


Figura 21 Contornos de mesmo nível de pressão sonora ao redor de um grande transformador de energia elétrica.

Fonte: Bistafa (2006).

Ainda que, em geral, as fontes sonoras não sejam pontuais, conforme cita De Marco (1982), quando se propagam ao ar livre e sem encontrar superfícies refletoras, as ondas que produzem tomam forma aproximadamente esférica, a partir de distâncias superiores a 1,5 vezes o comprimento de onda do som emitido pela fonte.

Quando a fonte tem dimensões pequenas, em comparação com o comprimento de onda do som que emite, a potência acústica tende a se distribuir uniformemente em todas as direções e a distância r superior a 1,5. A intensidade se obtém imaginando que a potência W atravessa igualmente todos os elementos da superfície esférica de raio r com centro na fonte ($S = 4\pi r^2$), onde K é uma constante para uma fonte determinada (DE MARCO, 1982), através da equação:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{W}{4\pi} \cdot \frac{1}{r^2} = K \cdot \frac{1}{r^2}$$

A intensidade varia na razão inversa do quadrado da distância. Mesmo quando a fonte não é direcional, esta lei do quadrado da distância vale ainda para pontos situados na mesma direção a partir da fonte, supondo-se que não haja ventos ou diferenças de temperatura entre as camadas de ar atravessadas (que efetivamente curvam os raios sonoros) (DE MARCO, 1982).

Assim, para cada duplicação da distância da fonte, a intensidade divide por 4; trabalhando com níveis sonoros e fazendo as operações a partir da definição, o novo nível será menor em 6dB, conforme figura 22 (DE MARCO, 1982).

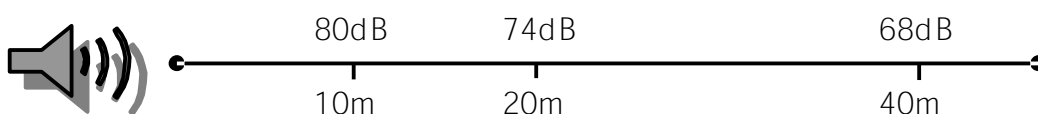


Figura 22 Decréscimo do nível sonoro com a distância.

Fonte: Adaptado de De Marco (1982).

Na figura 23, por exemplo, o primeiro receptor (R_2) está distante 20m da fonte de ruído (F_1), que o atinge com nível sonoro de intensidade de 74dB; para o segundo receptor (R_2) distante 40m da mesma fonte, ou seja, o dobro da distância do primeiro, o nível sonoro de intensidade que o atinge será reduzido em 6dB, passando, portanto, a ser de 68dB e assim sucessivamente.

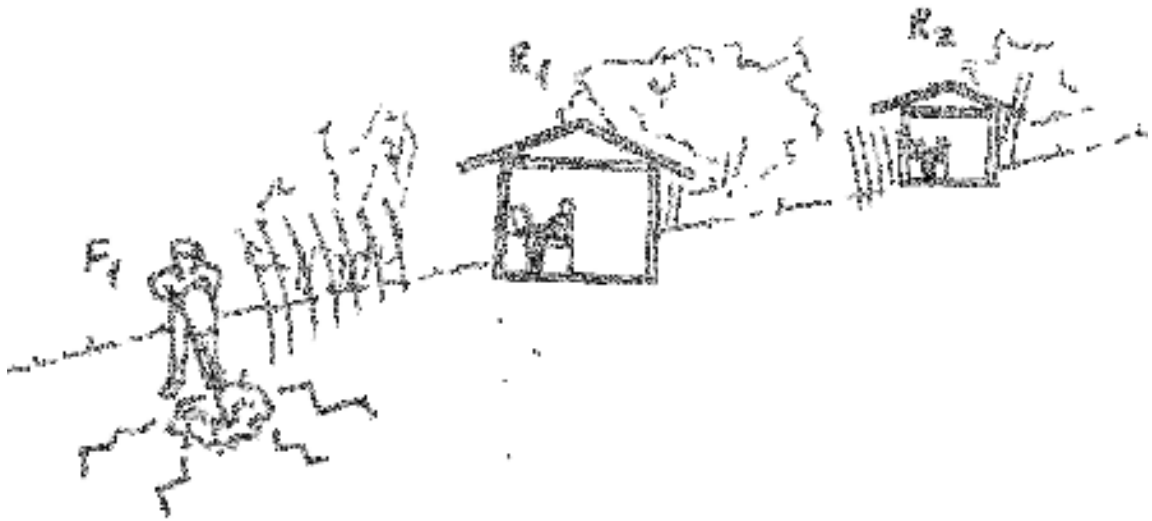


Figura 23 Exemplo de decréscimo do nível sonoro com a distância.

Fonte: Desenho da autora (2006).

As fontes dos ruídos que atingem a arquitetura podem ser consideradas internas ou externas, segundo De Marco (1982). Exemplos de fontes internas são rádios ou televisões dentro de um recinto fechado, e exemplos de fontes externas são aviões, trens, veículos, máquinas usadas em construção civil ou equipamentos de fábricas voltados para o seu exterior, entre tantos outros. Ressaltaremos a seguir as fontes dos ruídos de tráfego, que representam atualmente o maior problema na atenuação do ruído urbano. Entretanto, compreende-se que a análise destas fontes requer pesquisas específicas, dada a sua complexidade. Assim, apenas as principais características serão discriminadas nesta dissertação.

Tráfego aéreo

Os ruídos gerados pelos aviões são considerados os mais intensos na civilização atual, pela sua potência ser muito elevada, por volta de 100kW, e, principalmente, pela condição de propagação do som ser particularmente favorável, pois é livre de obstáculos, causando, assim, sempre um grande o incômodo.

As fases de decolagem e aterrissagem são as que mais atingem acusticamente a arquitetura, pois em seus momentos precedentes os aviões sobrevoam muito próximos ao solo, como se observa na figura 24. Especificamente antes da decolagem, enquanto o avião está no solo, a potência sonora emitida é a máxima, e o que diminui muito esta percepção é o fato de o ruído gerado ser em parte atenuado pelo solo, conforme será mais explicado adiante.



Figura 24 Avião aterrissando no aeroporto de Congonhas, em São Paulo.

Fonte: Fotos da autora (2006).

O nível sonoro produzido pela passagem de um avião para um observador situado nas proximidades de uma pista de decolagem e aterrissagem, conforme explicado em Josse (1975), aumenta progressivamente até um nível máximo (L) e diminui de forma mais gradual. A figura 25 apresenta um exemplo dessa variação de intensidade e nota-se que entre o primeiro e o segundo minutos o nível sonoro atingiu 94dB (L), sendo que no terceiro minuto já diminuiu, atingindo 54dB, como no início.

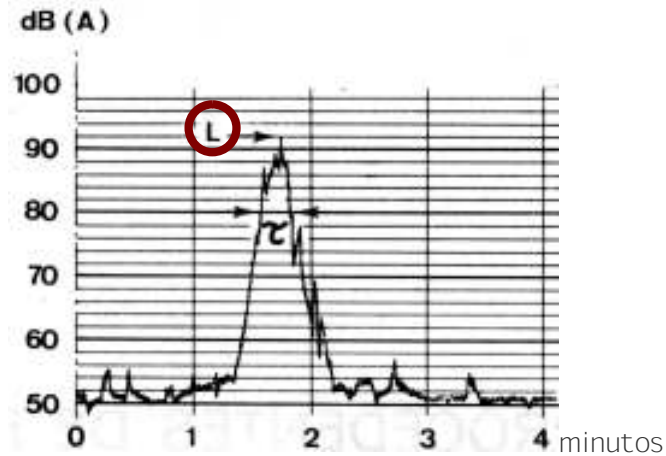


Figura 25 Registro gráfico, no solo, da variação de nível sonoro de um avião sobrevoando uma área.

Fonte: Josse (1975).

De forma simplificada, Josse (1975) afirma que o ruído gerado pela passagem de um avião pode ser caracterizado de três formas: pelo intervalo de tempo durante o qual o ruído do avião interfira no ruído de fundo e ultrapasse um valor que seja considerado referencial, por exemplo 80dB(A); pelo valor máximo alcançado na medição do nível sonoro de intensidade; pelo espectro do ruído obtido através dos níveis máximos observados por frequência.

A análise do ruído provocado pelo tráfego aéreo tem sido objeto de muitas pesquisas específicas recentes. Na Inter-noise 2006²¹, dezoito trabalhos pesquisaram os ruídos gerados a partir da implantação de um aeroporto. Esta dissertação apenas pretende ressaltar que esta é a fonte de ruído mais intensa desde o século XX, portanto extremamente incômoda, e seus métodos de atenuação na arquitetura serão discutidos nos próximos capítulos.

²¹ Congresso Internacional de Acústica, anual e realizado em 2006 na cidade do Rio de Janeiro.

Tráfego rodoviário

Embora não tão forte como o aéreo, o ruído produzido pelo tráfego rodoviário, devido ao grande desenvolvimento do setor, tornou-se o maior problema para o conforto acústico urbano. Em qualquer ponto de uma grande cidade existe um fundo sonoro contínuo, produzido pela superposição dos ruídos dos veículos (De Marco, 1982).

O nível sonoro de uma via veicular apresenta sempre muitas variações, resultado de que os veículos não são distribuídos de forma uniforme e que emitem diversas potências acústicas, seja pela sua própria natureza, seja pela maneira como são conduzidos. Na figura 26 se observa um exemplo dessa variação de intensidade, de uma rodovia com 2x3 pistas, tráfego de 3.850 veículos/hora, registrado a 3m da borda exterior da calçada (JOSSE, 1975).

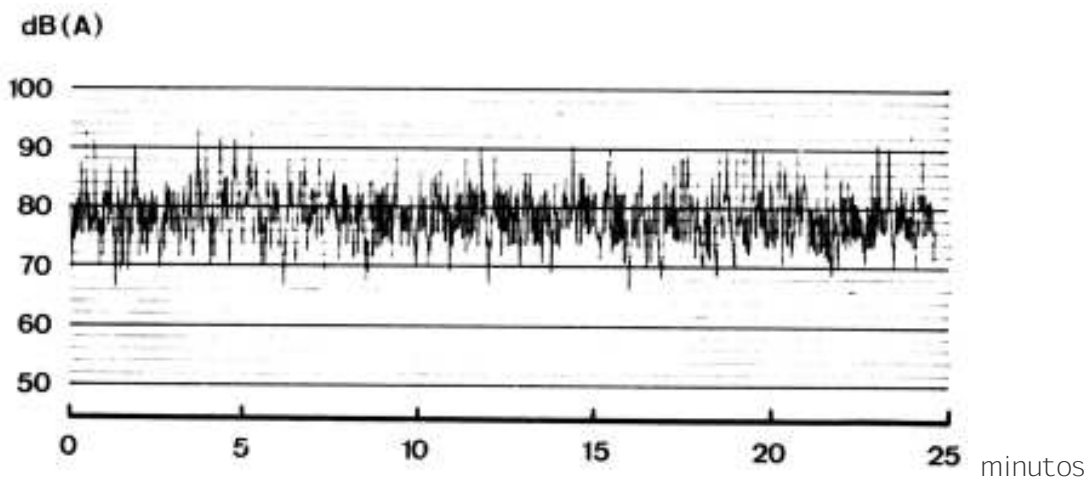


Figura 26 Registro gráfico, na beira de uma rodovia, da variação de nível sonoro do tráfego veicular.

Fonte: Josse (1975).

Tráfego ferroviário

Segundo Josse (1975), os estudos relativos aos aspectos físicos do ruído dos trens são escassos.

O ruído que se percebe durante a passagem de um trem é resultado, principalmente, dos choques e vibrações originados nos trilhos. Os motores a diesel fazem com que as máquinas matrizes sejam a causa de muitos ruídos complementares. Já quando é por tração elétrica, estes ruídos são insignificantes comparados aos gerados pelos trilhos.

A passagem de um trem provoca um ruído, cujo nível sonoro cresce rapidamente, se estabiliza em um valor considerado máximo, com algumas variações, e decresce depois mais lentamente do que a forma como iniciou. A figura 27 apresenta um exemplo dessa variação intensidade gerada pela passagem de um trem com sessenta vagões de carga, velocidade de 74km/h, sobre trilhos tradicionais, registrada a 30m do eixo da via férrea.

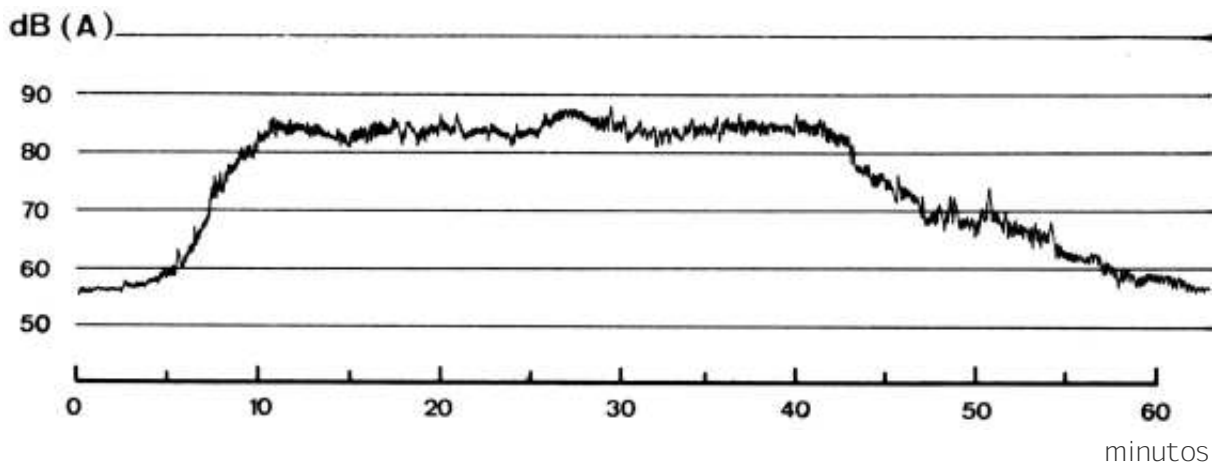


Figura 27 Registro gráfico, próximo a uma via férrea, da variação de nível sonoro da passagem de um trem.

Fonte: Josse (1975).

2.2 Propagação do som na atmosfera

A propagação do som ao ar livre é normalmente considerada em três fases: a fonte sonora, a trajetória e o receptor. Primeiramente, a fonte emite uma certa potência sonora, gerando um nível sonoro que pode ser medido nas imediações da fonte. A partir daí, o nível sonoro é atenuado à medida que o som se propaga, entre a fonte e o receptor, ao longo de determinada trajetória. Na figura 28 observam-se os mecanismos mais significativos da atenuação sonora ao ar livre (BISTAFA, 2006).

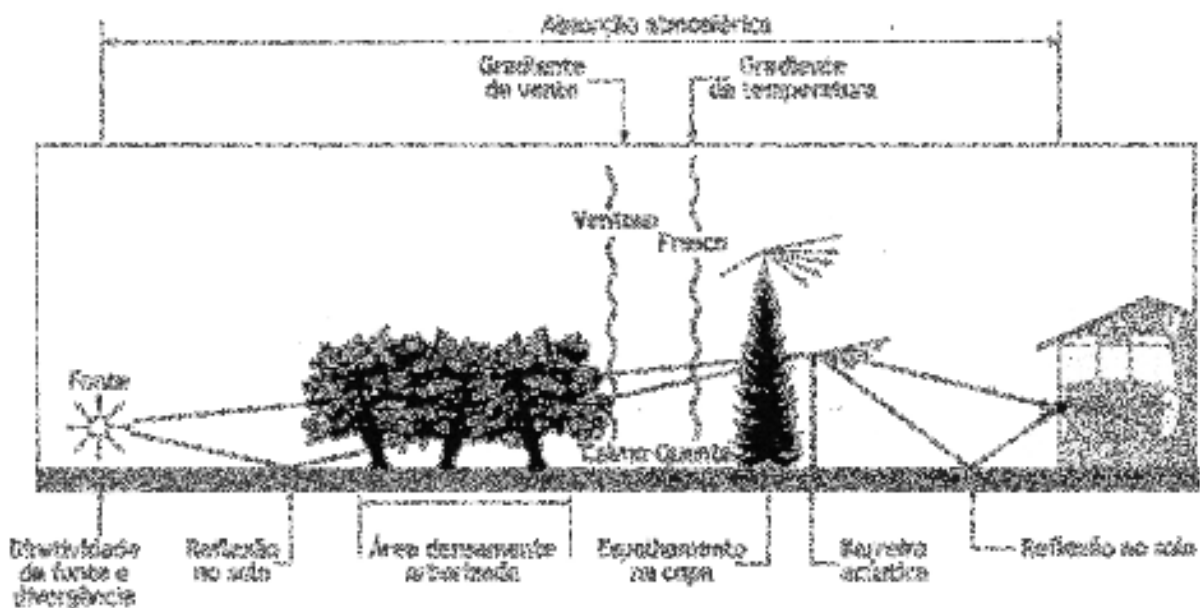


Figura 28 Mecanismos mais significativos da atenuação sonora ao ar livre.

Fonte: Bistafa (2006).

O nível sonoro vai se reduzindo com a distância, à medida que o som vai se divergindo da fonte. A absorção sonora do ar atmosférico atenua o som ao longo de sua trajetória. Reflexões no solo, áreas densamente arborizadas, barreiras naturais ou artificiais interferem na propagação do som, atenuando o seu nível de intensidade. Gradientes verticais de vento e de temperatura refratam as trajetórias sonoras para cima e para baixo, gerando regiões de “sombra” acústica, alterando a interferência com o solo e modificando a efetividade das barreiras (BISTAFA, 2006).

2.2.1 Sob efeito da temperatura

A velocidade do som no ar independe da pressão atmosférica, pois esta é constante para uma determinada temperatura. Porém alterando o nível térmico do ar, altera-se também a densidade do mesmo e, conseqüentemente, a velocidade do som no seu meio (SILVA, 2002).

Considerando um gradiente positivo, ou seja, temperatura crescente com a altura, como ocorre nos lagos gelados ou na terra após o pôr-do-sol, a velocidade do som nas camadas mais baixas é menor que nas camadas mais altas. Neste caso, o som consegue se propagar por grandes distâncias sem problemas, pois as frentes de onda nas camadas inferiores refletir-se-ão na superfície da terra várias vezes, conforme se observa na figura 29.

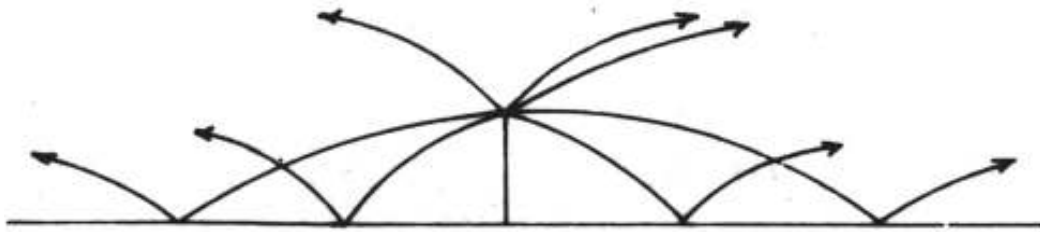


Figura 29 A propagação sonora sob efeito de gradiente positivo de temperatura.

Fonte: De Marco (1982).

Em razão deste fenômeno, é possível numa superfície de lagos gelados, por exemplo, ouvir um som normal, como o de uma voz humana, em distâncias superiores a 2.000m (SILVA, 2002).

Quando ocorre de o gradiente de temperatura ser nulo, isto é, a temperatura permanecer constante nas camadas mais altas e mais baixas da atmosfera, não haverá nenhuma alteração na propagação do som, por causa da temperatura. Essa constância, na prática, só é possível dentro de uma faixa limitada ou ambiente artificialmente condicionado.

Considerando um gradiente negativo, ou seja, temperatura decrescente com a altura, a velocidade do som nas camadas inferiores é maior que das camadas superiores, resultando na distorção da frente de onda para cima, afastando-se da terra, formando sombras acústicas, ou seja, zonas totalmente sem som, de acordo com a figura 30.

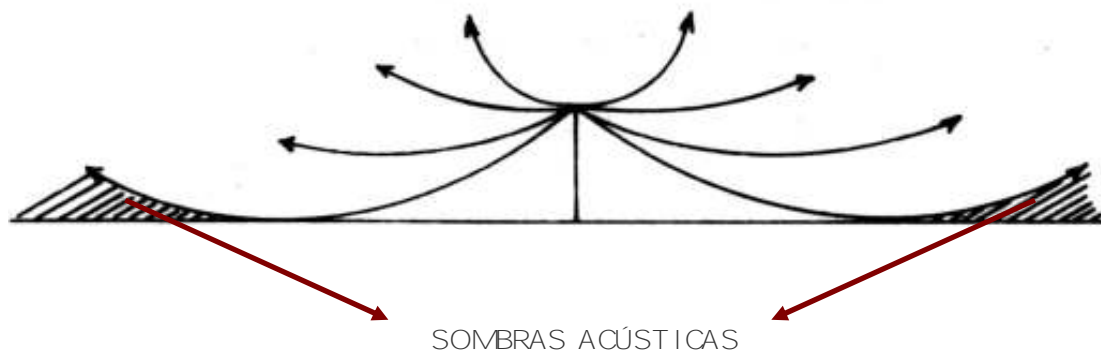


Figura 30 A propagação sonora sob efeito de gradiente negativo de temperatura.

Fonte: De Marco (1982).

2.2.2 Sob efeito da ventilação

O deslocamento do ar também influencia na propagação do som em seu meio. Se o som se propaga no sentido e na direção do vento, os efeitos se somam e a velocidade final da propagação é a resultante da soma dos valores da velocidade do som, mais a do vento. Já se o som se propaga na mesma direção do vento, porém no sentido inverso, a resultante será a diferença dos valores das suas velocidades (SILVA, 2002).

Como a velocidade do vento varia, aumentando com a altura (devido aos atritos com a superfície da terra), a direção do som também varia seguindo trajetórias como as indicadas na figura 31. No projeto de um auditório ao ar livre, por exemplo, deve-se procurar fazer com que a direção palco-platéia coincida com a direção do vento, a fim de que o som na platéia seja favorecido pela ação do vento (DE MARCO, 1982).

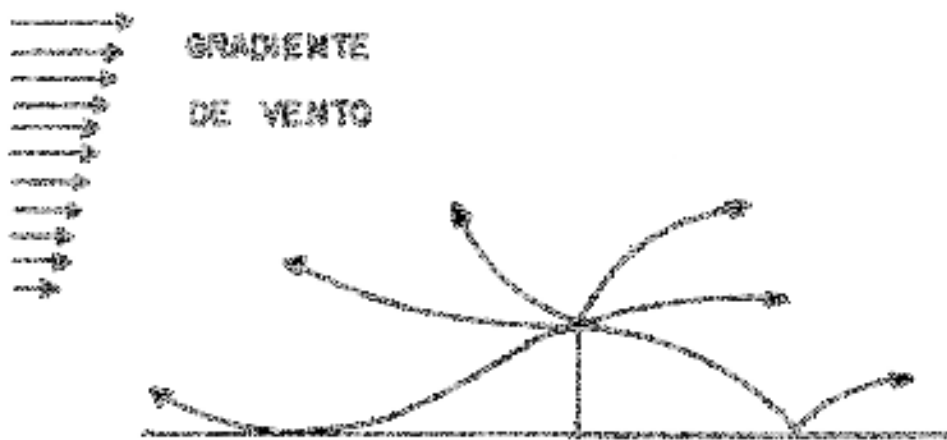


Figura 31 A propagação sonora sob efeito da ventilação.

Fonte: De Marco (1982).

Convém ressaltar que se a velocidade do vento aumenta com a altura, a propagação do som também aumenta. Daí a importância de pesquisar as direções dos ventos dominantes antes de executar o projeto acústico, pois elas podem aumentar consideravelmente a necessidade de proteção acústica em um edifício.

2.3 Comportamento das ondas sonoras em um obstáculo

Para Silva (2002), os sons podem advir de duas formas distintas: sons originados no ar, que são produzidos dentro da massa de ar de um ambiente, aberto ou fechado, e que se transmitem integralmente até o ouvinte; ou sons originados por impacto, que são produzidos pelo choque de elementos sólidos ou líquidos e pelo ar, sendo transmitidos até o nosso corpo sob a forma de vibração ou de sensação sonora. Na figura 32 é possível visualizar os dois tipos de sons.

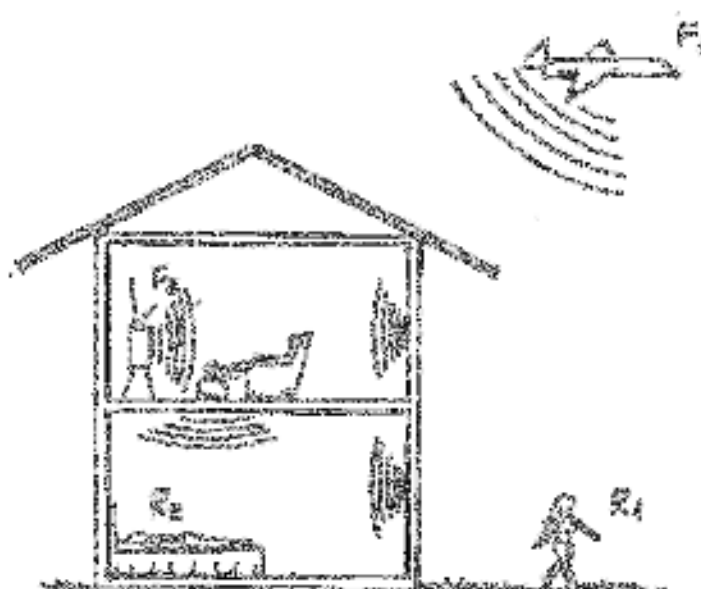


Figura 32 Sons originados no ar e por impacto.

Fonte: Desenho da autora (2006).

O primeiro receptor (R_1), localizado na área externa do edifício, ouve o som do avião (F_1) diretamente, ou seja, trata-se de um som gerado no ar. Já o segundo receptor (R_2), situado na área interna do edifício, cujas aberturas são consideradas hermeticamente fechadas, ouve o som do avião (F_1) sob impacto, assim como ouve o som da televisão (F_2) do vizinho superior, ambos através de vibrações recebidas pelas paredes e lajes, notáveis tanto por tato quanto por audição, pois estes sons são transmitidos da estrutura vibrante para o ar ambiente até chegarem ao receptor em questão (R_2).

A onda sonora, partindo da fonte, vai propagar-se pelo ar, condicionada pelos efeitos da ventilação e da temperatura, até perder sua intensidade ou encontrar algum obstáculo. Independente de como foi gerada, a onda tem um comportamento singular quando atinge uma superfície qualquer, como mostra a figura 33.

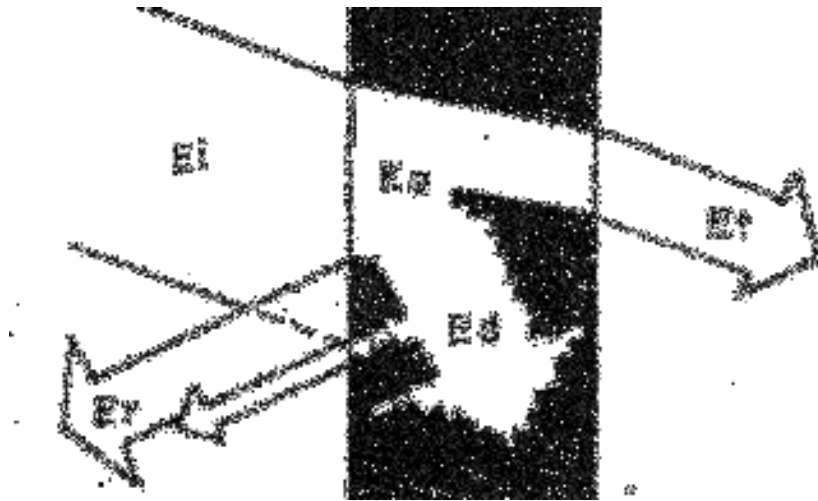


Figura 33 Distribuição da energia sonora em um obstáculo.

Fonte: De Marco (1982).

O choque da onda sonora em uma parede faz com que parte de sua energia seja refletida (E_r) para o mesmo meio e parte seja absorvida (E_a), produzindo uma vibração interna no novo meio, ou seja, na parede. Dessa vibração interna, parte da energia é dissipada (E_d), transformando-se em calor, parte voltará para o primeiro meio, somando-se com a refletida, e a última parte dessa energia é transmitida (E_t) por vibração ao ar do lado oposto da onda incidente, fazendo com que a parede seja uma nova fonte sonora, que criará uma onda num terceiro meio (DE MARCO, 1982).

Assim, a energia incidente é a soma da energia refletida com a energia absorvida, sendo que esta última é a soma da energia dissipada com a energia transmitida, conforme segue:

$$E_i = E_r + E_a \quad \text{e} \quad E_a = E_d + E_t$$

Portanto, temos como fórmula geral que a energia incidente é a somatória da energia refletida, dissipada e transmitida:

$$E_i = E_r + E_d + E_t$$

Dividindo as energias resultantes pela energia incidente, temos:

$$\frac{E_r}{E_i} = r \text{ coeficiente de reflexão;}$$

$$\frac{E_t}{E_i} = t \text{ coeficiente de transmissão;}$$

$$\frac{E_d}{E_i} = d \text{ coeficiente de dissipação;}$$

$$\frac{E_a}{E_i} = a \text{ coeficiente de absorção.}$$

Baseando-se neste levantamento, um projeto de acústica visa adequar os coeficientes de acordo com as necessidades do meio urbano que será inserido, devido ao ruído externo, e com as exigências da funcionalidade que será exercida em seu meio. Analisaremos melhor, neste momento, os fenômenos de reflexão, absorção e suas variáveis.

2.3.1 Reflexão

Quando uma onda sonora pura ou livre, isto é, isenta de reflexões secundárias, atinge uma superfície uniforme e relativamente grande em relação ao comprimento dessa onda, a reflexão do som assemelha-se muito à da luz (SILVA, 2002). Ou seja, a onda sonora incide sobre uma superfície e se reflete imediatamente de volta para o ambiente.

O primeiro momento de reflexão de uma onda chama-se frente de onda refletida, conforme a figura 34; trata-se do lugar geométrico M,N,P,Q,R dos raios refletidos.

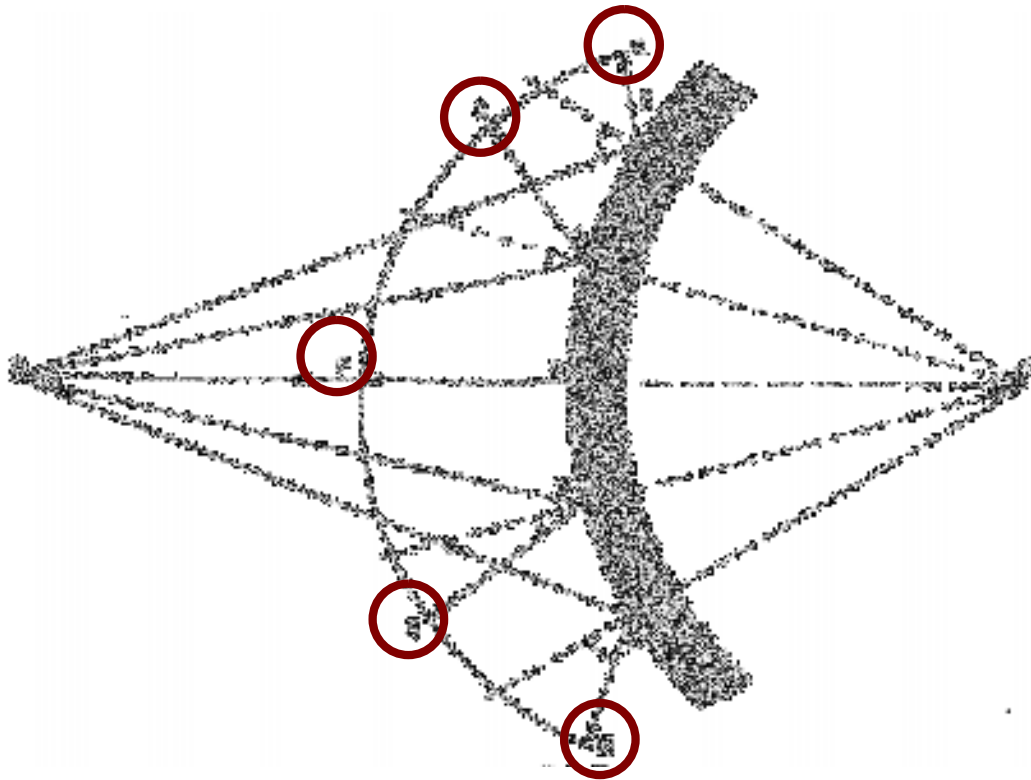


Figura 34 Frente de onda refletida.

Fonte: Silva (2002).

O ângulo do raio refletido segue o mesmo ângulo do raio incidente, considerando-se uma reta perpendicular à superfície, no exato ponto atingido pelo raio incidente, conforme representado na figura 35.

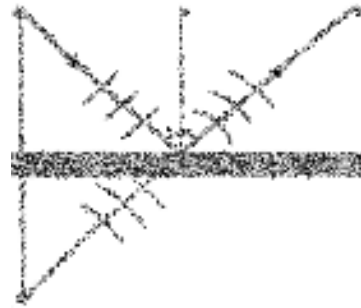


Figura 35 Ângulo refletido.

Fonte: Silva (2002).

No caso das superfícies côncavas ou convexas, o fenômeno se passa da mesma forma, desde que consideremos essas superfícies compostas de um número infinito de pequenos planos conectados. Neste caso, considera-se que o centro do arco seja o ponto inicial da perpendicular, que deve cortar a superfície no ponto atingido, para basear o ângulo de reflexão. O que difere estas duas superfícies é que as côncavas tendem a convergir os raios, já as convexas, a difundir os raios sonoros, conforme figura 36.

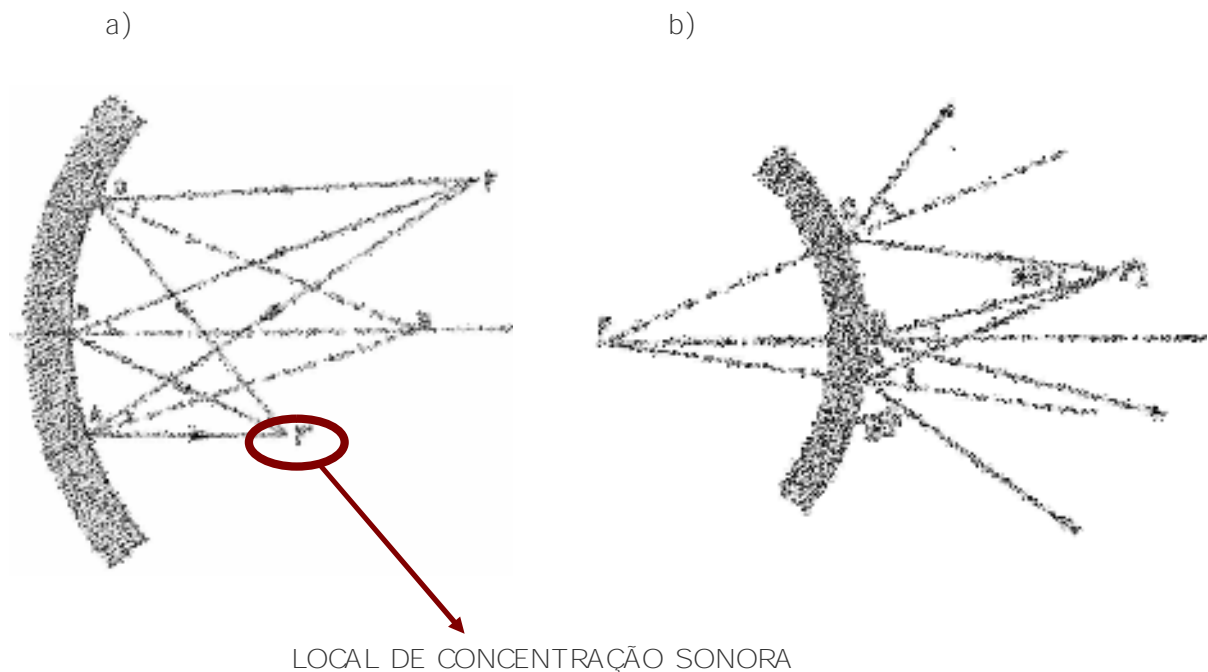


Figura 36 Reflexão sonora em superfície côncava (a) e convexa (b).

Fonte: Silva (2002).

A conversão dos raios refletidos de uma superfície côncava possui uma particularidade importante: os raios sonoros refletidos que foram originados no ponto F, a exemplo da figura 36, são concentrados num ponto F' real, ou seja, uma superfície côncava refletora focaliza a energia sonora em pontos certos. Essas concentrações de energia fazem com que as ondas sonoras se superponham, resultando em reforço do som em alguns pontos e enfraquecimento em outros, conforme sejam aditivos ou subtrativos os valores de suas amplitudes. Tanto os pontos onde haja excesso de intensidade sonora como aqueles onde haja falta, chamados de “pontos surdos”, são prejudiciais à boa audição nos ambientes (SILVA, 2002).

Já as superfícies convexas são difusoras, sendo assim podem ser usadas sem maiores complicações nos ambientes onde se exige boa audibilidade. Convém citar que, neste caso, o foco torna-se virtual, como se a superfície fosse um espelho (SILVA, 2002).

O índice de enfraquecimento (E)²² pode ser calculado em função do coeficiente de transmissão do material com a equação:

$$E = 10 \log \frac{1}{\alpha_t} \text{ (dB)}$$

Imagens Acústicas

Qualquer superfície plana reflete ondas sonoras, como um espelho plano reflete a luz, porém na reflexão a onda sonora altera alguns de seus condicionantes. O que ocorre é que quando um raio sonoro qualquer atinge uma superfície e por ela é refletido, seus raios seguem sob o comando de outro ponto original, chamado de imagem acústica, que é o ponto original projetado em linha reta na superfície, onde se cria sua imagem acústica virtual. Na figura 37, as imagens acústicas da fonte sonora O são os pontos O1, O2, O3 e O4.

²² Em livros ingleses E é chamado de TL , termo original: transmission loss.

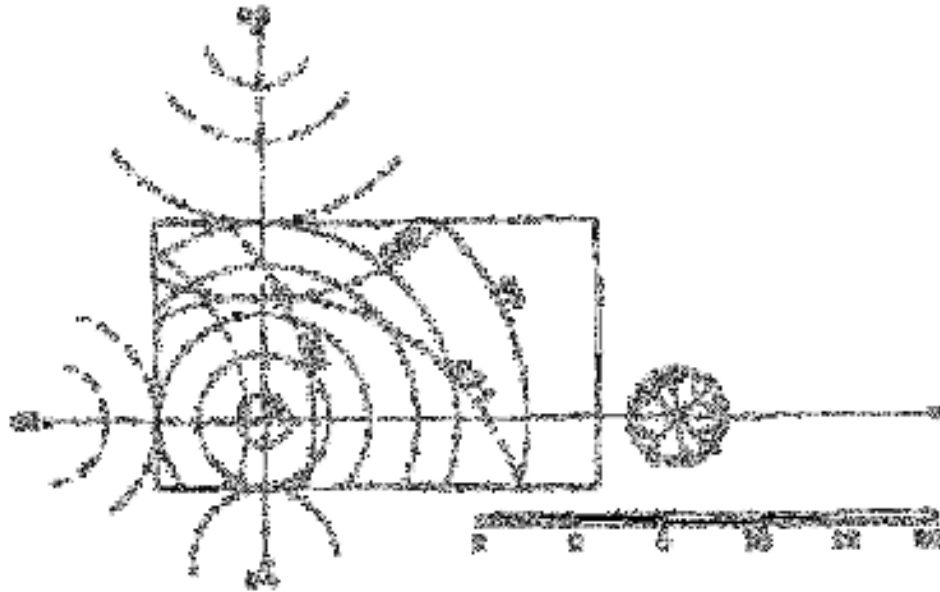


Figura 37 Imagens acústicas

Fonte: Silva (2002).

As ondas emitidas pela fonte sonora O são consideradas e chamadas de ondas primárias (OP) e depois de refletidas pela primeira vez são chamadas de ondas secundárias, sendo que seu ponto de origem passa a ser a imagem acústica da fonte sobre a superfície em questão.

Difração

Quando uma onda sonora encontra um obstáculo e seus raios contornam este obstáculo, mudando de direção, dá-se o nome de difração. Sua extensão dependerá da relação entre o comprimento da onda e o tamanho do obstáculo (SILVA, 2002).

Na figura 38, uma onda sonora encontra uma parede com um pequeno orifício, e seu comportamento a partir deste momento é como se fosse um novo centro de propagação sonora, porém nada mais é do que os raios em novas direções. Já na figura 39, a onda encontra um canto de uma parede e muda sua

direção. Como gosta de afirmar o prof. Péricles Silva: “O som passa até no buraco da fechadura [...]” (SILVA, 2002, p.80).

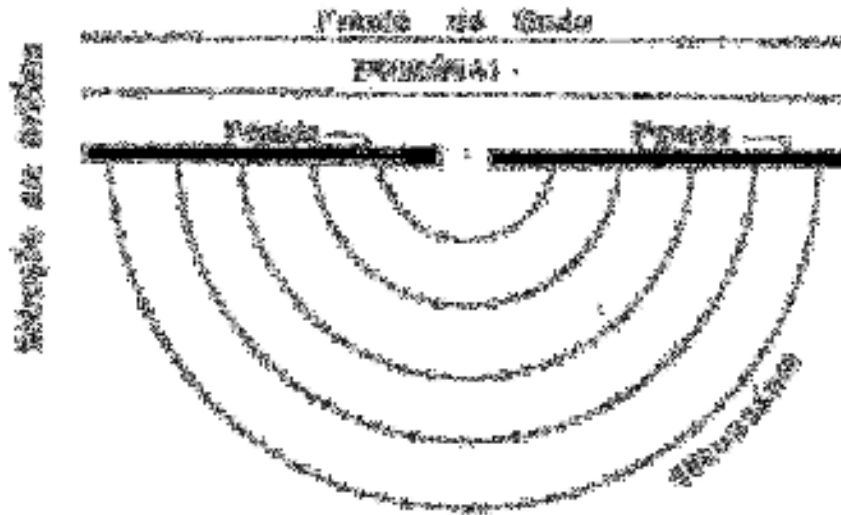


Figura 38 Difração sonora em um orifício.

Fonte: Silva (2002).

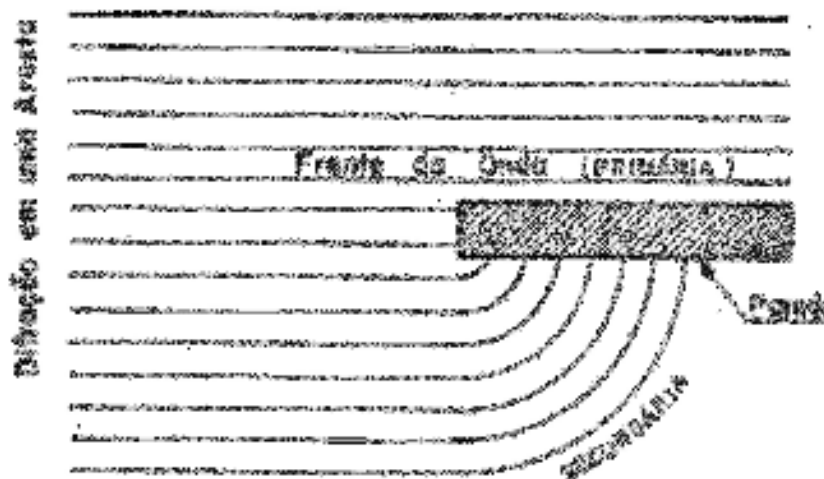


Figura 39 Difração sonora em uma quina.

Fonte: Silva (2002).

Interessante ressaltar que, apesar de em muitas propriedades o comportamento das ondas sonoras equivaler ao das ondas luminosas, no fenômeno da difração é bem diferente, pois ao contrário de uma onda sonora, que contorna um obstáculo e atinge um possível observador atrás deste obstáculo, a onda luminosa projeta este obstáculo em forma de sombra, fazendo com que este mesmo observador não seja atingido pelo raio luminoso.

F1

F2

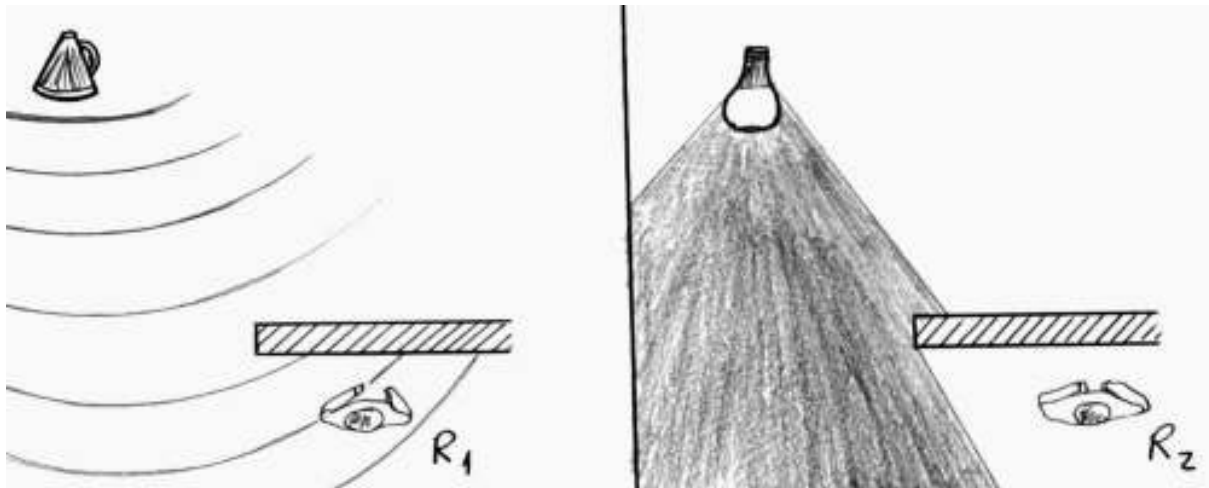


Figura 40 Comparação do comportamento de uma onda sonora e uma luminosa em um obstáculo.

Fonte: Desenho da autora (2006).

Eco ou Reverberação?

Alguns dos efeitos possíveis conseqüentes de ondas sonoras refletidas por uma superfície, lançadas novamente para o ambiente, é o eco e a reverberação.

O eco acontece quando recebemos sucessivamente um som e sua repetição, mais ou menos fiel, um instante depois, percebidos separadamente. Assim, é necessário que a membrana basilar descanse, no mínimo, 50ms depois de vibrar

com o primeiro som, para então vibrar e transmitir a nova mensagem. O processo é complexo e compreende relações de tempo com relações de intensidade entre o som original e o eco, mas, de forma geral, o eco poderá existir se a diferença entre o caminho percorrido pelo som direto e o percorrido pelo primeiro som refletido for maior do que 17m (DE MARCO, 1982).

Ainda que nesta pesquisa a análise seja em ambientes externos, para isolar o ruído urbano, e que o fenômeno da reverberação apenas ocorra em ambientes fechados, convém citá-lo, uma vez que mais adiante discorreremos sobre atenuações sonoras em túneis, podendo, neste caso, ocorrer o fenômeno da reverberação.

Portanto, a simples existência de fechamentos num recinto dá origem aos sons refletidos e implica no surgimento da intensidade reverberante (I_r). O som reverberante persiste um certo tempo no local, depois da fonte deixar de emitir o som (DE MARCO, 1982).

Assim, se o tempo de reverberação sonora for grande, isso pode vir a perturbar a clara percepção do som, como a inteligibilidade de um discurso, por exemplo. Entretanto, se o som desaparece imediatamente, onde a I_r é muito pequena, além de dificultar a audição em pontos afastados da fonte, prejudica a percepção de alguns tipos especiais de fonte sonora, como, por exemplo, grandes orquestras, que precisam de um certo tempo de reverberação para fundir o som.

Existe uma unidade comparativa para medir esse tempo de reverberação, que é definida com o tempo que demora um som para diminuir a sua intensidade à sua milésima parte, ou descer em 60dB o seu nível, a partir do momento em que cessa a fonte sonora (DE MARCO, 1982).

O que diferencia bem os dois termos citados anteriormente é que na reverberação, embora o som persista no ambiente, não é possível distinguir suas repetições, ao contrário do que ocorre no eco.

Quando existem dois fechamentos paralelos pode ocorrer o fenômeno do flutter eco, chamado também de eco palpitante. Ele consiste na prolongação do som produzido por sua reflexão sucessiva num outro fechamento. É notório em locais estreitos com paredes paralelas, como corredores (DE MARCO, 1982).

2.3.2 Absorção

A onda sonora incidente sobre uma superfície tem parte de sua energia refletida e outra parte absorvida, conforme já citado anteriormente.

Quando a energia sonora entra num material poroso, se este é tal que o ar tem condições de transitar livremente entre os poros, parte da energia é convertida em calor, devido à resistência viscosa e ao atrito nos poros e ainda pela vibração das pequenas fibras do material. Sendo a espessura do material suficiente e a porosidade razoável, até uns 95% da energia podem ser dissipados dessa maneira. Entretanto, existe uma relação direta entre o comprimento de onda do som e a espessura do material poroso: materiais finos só poderão absorver curtos comprimentos de onda (DE MARCO, 1982).

Um material considerado como bom absorvente acústico é identificado quando a energia sonora refletida por ele, de volta para o ambiente, é muito menor em relação à energia incidente, ou seja, boa parte da energia é absorvida. Diferente de um material considerado como bom isolante acústico, que é identificado quando a parcela da energia sonora refletida por ele, de volta para o ambiente, é próxima da energia incidente, ou seja, pouca energia é absorvida. Portanto, "bons absorventes, em geral, são péssimos isolantes, e vice-versa" (PASSERI, 2005, p. 38).

Logo, se um coeficiente de absorção for igual a 0,60, em determinada frequência, significa que ele deixará de refletir 60% da energia incidente sobre ele e esse valor será dissipado ou transmitido por vibração para o outro lado. A absorção equivalente de uma parede é dada pela equação:

$$A = a.S \text{ (m}^2\text{)}$$

Assim, materiais fibrosos (lã de vidro ou de rocha etc.) ou porosos (espumas de poliuretano etc.) são os tipicamente utilizados para absorção sonora (VER ANEXO II). A particularidade, porém, é a reduzida absorção nas baixas frequências. Uma alternativa para torná-los mais eficientes é afastar o material da superfície, outra seria optar por alternados sistemas de absorção sonora, como as placas vibrantes e os ressonadores.

Placas Vibrantes

Placas vibrantes consistem num sistema de absorção sonora onde duas membranas fixadas no seu perímetro, estimuladas a vibrar pela energia da onda sonora, transformaram parte desta em calor. Se o painel é rígido e pesado, a quantidade de energia absorvida é mínima, mas se for leve e flexível, a absorção é muito maior, especialmente nas frequências baixas. O maior problema deste sistema é a sua seletividade em frequência, que pode ser até certo ponto atenuada com a colocação de uma camada de material poroso na câmara de ar (DE MARCO, 1982).

Ressonadores

Todos os objetos, independentemente de seu tamanho, possuem uma frequência de ressonância natural, determinada parcialmente por sua massa e sua flexibilidade (PASSERI, 2005).

Quando são necessárias absorções muito seletivas, uma possibilidade é o uso dos chamados ressonadores de Helmholtz, que consistem basicamente num receptáculo no formato de garrafa que separa um espaço de ar interno do resto através de um estreito pescoço, conforme figura 40.

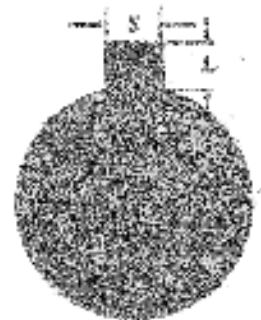


Figura 41 Ressonador de cavidade ou de Helmholtz.

Fonte: Bistafa (2006).

A frequência onde ocorre a absorção sonora máxima coincide com a frequência de ressonância da garrafa, sendo dada pela equação:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{lV}}$$

Baffles

Baffles são painéis pendurados paralelos e/ou perpendiculares entre si, em uma laje ou forro, compostos por materiais porosos, que, em geral, são aplicados nas duas faces de um elemento rígido qualquer. Quando uma onda sonora incide sobre um baffle, parte da energia é absorvida pelo material poroso e parte da onda é refletida, atingindo imediatamente o próximo painel. Este processo se repete continuamente até que toda a onda sonora tenha sido dissipada (PASSERI, 2005).

2.1 A atenuação sonora

A primeira opção para atenuar o ruído urbano é tentar reduzir sua intensidade ainda na fonte, conforme está sendo feito em muitos setores, como, por exemplo, no setor automotivo, em que a cada nova geração de veículos, estes tornam-se menos ruidosos, ou, como acontece em muitos países europeus, com o emprego de asfaltos especiais mais silenciosos em rodovias e ruas de tráfego intenso. Porém nem sempre é possível esperar essas providências que, na maior parte das vezes, são de responsabilidade de empresas privadas ou do poder público. Sendo assim, cada vez mais passam a ser explorados meios para interceptação dos raios sonoros, assim como métodos para isolar o ruído no próprio edifício, ou seja, ao invés de se tratar a fonte ruidosa, a atenuação ocorre na propagação sonora e no receptor.

Na tabela 6, Bistafa (2006) expõe os principais métodos de atenuação sonora, indicando sob que condições cada um deles é mais significativo. Os próximos capítulos pretendem, essencialmente, analisar esses métodos atenuadores do ruído urbano. Assim, o terceiro capítulo procura estudar as barreiras acústicas na cidade, interceptando os raios sonoros entre a fonte e o receptor; o quarto capítulo visa analisar as barreiras acústicas possíveis nos próprios edifícios receptores, isolando os ruídos externos.






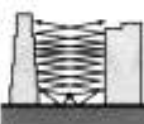
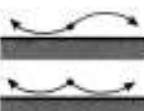
| Mecanismo | Descrição sucinta | Atenuação aproximada de 5 dB | | |
|--|--|---|--|--------|
| | | Condições | À distância de | |
| Absorção do ar  | Absorção sonora do ar atmosférico. | A 10°C e 70% de umidade relativa. | 800 m | A |
| | | | 1.500 m em 500 Hz 250 m em 4 kHz | Oitava |
| Solo macio  | Interferência (quase sempre destrutiva) entre o som direto e o refletido sobre solo acusticamente "macio". | Para alturas da fonte e do receptor da ordem de 1,2 m | 85 m | A |
| | | | 10 m em 250 e 500 Hz 50 m em 125 e 1.000 Hz | Oitava |
| Barreira  | Atenuação provocada por uma barreira acústica entre a fonte e o receptor, combinada com uma atenuação adicional de solo acusticamente "macio". | Quando o receptor encontra-se na sombra acústica gerada pela barreira, em temperaturas normais e sem vento. | Todas | — |
| Edificações  | Atenuação provocada por edificações entre a fonte e o receptor. | Com uma fileira de edificações com aproximadamente 25% de abertura. | Todas | — |
| Vegetação densa  | Atenuação provocada por vegetação densa entre a fonte e o receptor. | Áreas com muitas árvores e vegetação densa no solo. | 30 m | A |
| | | | 100 m em 500 Hz 50 m em 4.000 Hz | Oitava |
| Reverberação urbana  | Amplificação sonora devida a múltiplas reflexões em desfiladeiros urbanos. | Com edificações de no. mínimo 10 m de altura em ambos os lados da rua. | Todas | — |
| Vento e temperatura  | Alteração da atenuação do solo e/ou da barreira, ou criação de sombras acústicas causadas por gradientes verticais de temperatura e de ventos. | Em dias ensolarados, para alturas da fonte e do receptor da ordem de 1,2 m. | 150 m | A |
| | | | 150 m em 500 Hz 50 m em 4.000 Hz | Oitava |

Tabela 6 Principais métodos de atenuação sonora.

Fonte: Adaptado de Bistafa (2006).