

Pensada para uso do profissional e do estudante de Arquitetura, esta obra reúne conceitos básicos de Acústica e suas implicações no projeto arquitetônico. Como objetivo principal, o problema do ruído e os critérios de conforto são detalhadamente estudados, para que se possa equacionar, de forma perfeita, o isolamento necessário.

Ênfase especial é dada ao projeto acústico de auditórios — para a palavra e a música, abertos ou ao ar livre — descrevendo as soluções possíveis, seja quanto ao desenho geométrico, seja quanto ao cálculo estatístico.

Elementos de Acústica Arquitetônica

Elementos de Acústica Arquitetônica

Conrado Silva De Marco

ISBN: 85-213-0093-7

1965

Coordenação editorial:
Carla Milano Benclowicz
Equipe de produção:
Myriam Carvalho dos Santos e Sueli Geraldo Pereira
Capa:
Alexandre Luiz Rocha

Conrado Silva De Marco

Elementos de Acústica Arquitetônica

CIP-Brasil. Catalogação-na-Publicação
Câmara Brasileira do Livro, SP

De Marco, Conrado Silva, 1940 -
Elementos de acústica arquitetônica/Conrado Silva De Marco. --
São Paulo: Nobel, 1982

Bibliografia.
ISBN 85-213-0093-X

1. Acústica (Arquitetura) I. Título.

82-1299

CDD-729.29

Índices para catálogo sistemático:

1. Acústica: Projeto arquitetônico 729.29

Citação:
DE MARCO, Conrado Silva. Elementos de acústica
arquitetônica. São Paulo: Nobel, 1982. ISBN 85213-0093-X



DEDALUS - Acervo - FAU



2ª edição
1ª reimpressão
1990

Aluarte



É proibida a reprodução

Nenhuma parte dessa obra poderá ser reproduzida sem a permissão por escrito dos editores, através de quaisquer meios — xerox, fotocópia, fotográfico, fotomecânico. Tampouco poderá ser copiada ou transcrita, nem mesmo transmitida através de meios eletrônicos ou gravações. Os infratores serão punidos através da Lei 5.998, de 14 de dezembro de 1973, artigos 122-130.

Livraria Nobel S.A.
Rua da Balsa, 559
CEP 02910 Freguesia do Ó
São Paulo, SP



Introdução

Objetivos. Os problemas da Acústica Arquitetônica. Uma possível metodologia. Curso semi-programado..... 1

1. Aspectos físicos do som

Movimento oscilatório. Onda sonora. Intensidade do som.
Operações.....7

2. Aspectos psico-fisiológicos do som

Representação tridimensional. Fisiologia do aparelho auditivo.
Problemas psico-acústicos..... 15

3. Propagação do som

A onda no ar. Transições por meios diferentes. Reflexão. Difração. Intensidade de som reverberante. Transmissão e isolamento.
Operações..... 23

4. Comportamento do som nos recintos

Modos normais de ressonância no recinto. Reverberação do som. Tempo de reverberação. Absorção do som. Materiais porosos. Placas vibrantes. Ressonadores. Construções especiais. Operações. Coeficientes de absorção..... 35

5. O ruído

Definição de ruído. Medição do ruído. Fontes de ruído. Fontes de ruídos exteriores. Fontes de ruídos interiores. Critérios de ruído. Níveis admissíveis nos locais residenciais ou não.

Limites superiores do nível de ruído de fundo ou do ruído ambiente. Limites superiores do nível de ruídos particulares. Operações..... 49

6. Isolamento sonoro — Aspectos técnicos

Princípios de isolamento sonoro. Isolamento contra ruído aéreo. Isolamento contra ruído de impacto. Critérios de isolamento entre habitações. Detalhes construtivos. Fechamentos móveis. Portas e janelas. Paredes. Entrepisos..... 65

7. Projeto de isolamento acústico

Procedimento geral. Casos particulares: moradia, escolas, hospitais, teatros, estúdios de gravação, rádio e TV, escritórios. Distâncias aproximadas para o uso de janelas. Casos especiais. . 81

8. Projeto de auditório — Caso geral

Generalidades. Processo de trabalho. Isolamento contra ruídos. Problemas de forma. Cálculo de reverberação. Estudo em modelos. Operações. 93

9. Projeto de auditório — Casos particulares

Auditórios para voz: características da voz falada. Especificações de forma. Especificações de materiais de revestimento. Auditórios para música: características dos diferentes tipos de música. Especificações gerais. Especificações de forma. Auditórios de uso múltiplo. Cinemas 103

10. Auditórios ao ar livre

Exemplos históricos. Propagação do som ao ar livre. Efeito do vento. Efeito da variação de temperatura. Absorção do som no ar. Superfícies absorventes. Projeto de auditórios ao ar livre. Elaboração do programa. Definição e estudo da localização. Projeto arquitetônico. 113

Bibliografia 123

Introdução

O ensino de Acústica nas Escolas de Arquitetura do Brasil é bastante deficitário. Com exceção de contadas Faculdades, onde bons especialistas ditam cursos de alto nível, a maior parte delas simplesmente desconhece a existência da Acústica, ou se limita à aplicação de velhas regras sem justificação, sequer conceitual.

Por outro lado, apesar da grande quantidade de livros editados em diferentes países, não existe nenhum texto em português que esteja atualizado com a realidade acústica de hoje e que, ao mesmo tempo, procure um enfoque prático do uso desta ciência pelo arquiteto.

Os objetivos deste texto são modestos: pretende-se um enfoque simples, porém complexo, dos fenômenos sonoros e sua incidência no projeto arquitetônico, dirigido ao estudante de Arquitetura. A linguagem é, propositalmente, direta e o enfoque conceitual, no geral, acompanhado de seu equacionamento matemático. Aos leitores interessados em se aprofundar nos diferentes temas do curso, reportamos à Bibliografia indicada no fim do livro.

Os problemas da Acústica Arquitetônica

Dentro da gama de atividades nas quais a Acústica tem incidência, a Acústica Arquitetônica ocupa-se de duas áreas específicas:

a. *Defesa contra o ruído*: Sons indesejáveis devem ser eliminados, ou então amortecidos. Isto se refere tanto à intromissão de ruídos alheios ao local, através dos diferentes fechamentos, quanto àqueles produzidos no próprio interior.

b. *Controle de sons no recinto*: nos locais onde é importante uma comunicação sonora — salas de aula, teatros, auditórios — necessita-se de uma distribuição homogênea do som que preserve a qualidade e a inteligibilidade da comunicação, evitando defeitos acústicos comuns (ecos, ressonâncias, reverberação excessiva).

Além destas duas áreas, o som incide nas construções sob a forma de vibrações — sons de muito baixa frequência —, produzidos por maquinarias. O seu amortecimento constitui um campo específico da Acústica, o qual fica fora do contexto do curso.

Para resolver este e outros problemas, que se apresentam na vida profissional do arquiteto, é preciso conhecer os princípios básicos que determinam os fenômenos acústicos e as formas como eles interferem no homem, tanto as formas de emissão do som, a propagação nos meios materiais e o comportamento frente às barreiras, como os critérios de interferência com as comunicações sonoras, sempre subjetivas e de difícil generalização. Devem também ser levadas em conta as propriedades acústicas dos materiais, forma e tamanho dos locais, disposição dos diferentes elementos, etc.

É fundamental que se pense na Acústica logo no início do projeto; atendo-se à problemática do som e à sua incidência nas diferentes partes, projetar-se-á de forma coerente e econômica. A intervenção do acústico, depois de realizada a construção, além de não permitir soluções tão eficazes como as que se obtêm no momento do projeto, encarece consideravelmente o orçamento das construções.

Uma possível metodologia

O estímulo para escrever este texto nasceu no tempo em que o autor permaneceu no Departamento de Artes e Urbanismo da Universidade de Brasília, quando foi realizada uma experiência de curso semi-programado, devido à grande quantidade de alunos que deveriam fazê-lo.

O curso teórico era completado através de assistência direta aos trabalhos do ateliê onde se realizava a aplicação prática dos conhecimentos numa série de projetos, parte indispensável para a assimilação da matéria. Nesta fase, o texto servia ainda como fonte de consulta para os estudantes.

Anexamos a continuação à proposta metodológica empregada nesse tempo. Obviamente, não queremos dizer com isto que esta seja a melhor maneira de empregar o texto; cada professor saberá organizar o material conforme sua própria experiência ou objetivos educacionais.

Curso semi-programado

Em cada semana será estudada uma unidade. Das duas horas semanais, a primeira será empregada para esclarecer dúvidas, ou desenvolver algum ponto específico da unidade, em forma de seminário ou aula audio-visual e a última será utilizada para responder um teste simples sobre a própria unidade.

O aluno que passar no primeiro teste de uma unidade determinada, poderá imediatamente se encaminhar à seguinte; quem não passar, poderá fazer um novo teste da mesma unidade, após uma semana. Caso aprovado, terá a possibilidade de realizar o teste posterior de imediato. Se não passar, terá, ainda, por três vezes no curso, a possibilidade de realizar um teste oral individual. O aluno obterá aprovação depois de ter feito os testes de todas as unidades.

1 — Aspectos físicos do som

A Física define o som como uma perturbação que se propaga nos meios materiais e é capaz de ser detectada pelo ouvido humano. A perturbação é gerada por um corpo que vibra, transmitindo suas vibrações ao meio que o rodeia (fig. 1.1). As moléculas deste sofrem, alternadamente, compressões (fig. 1.1.B) e rarefações (fig. 1.1.C),

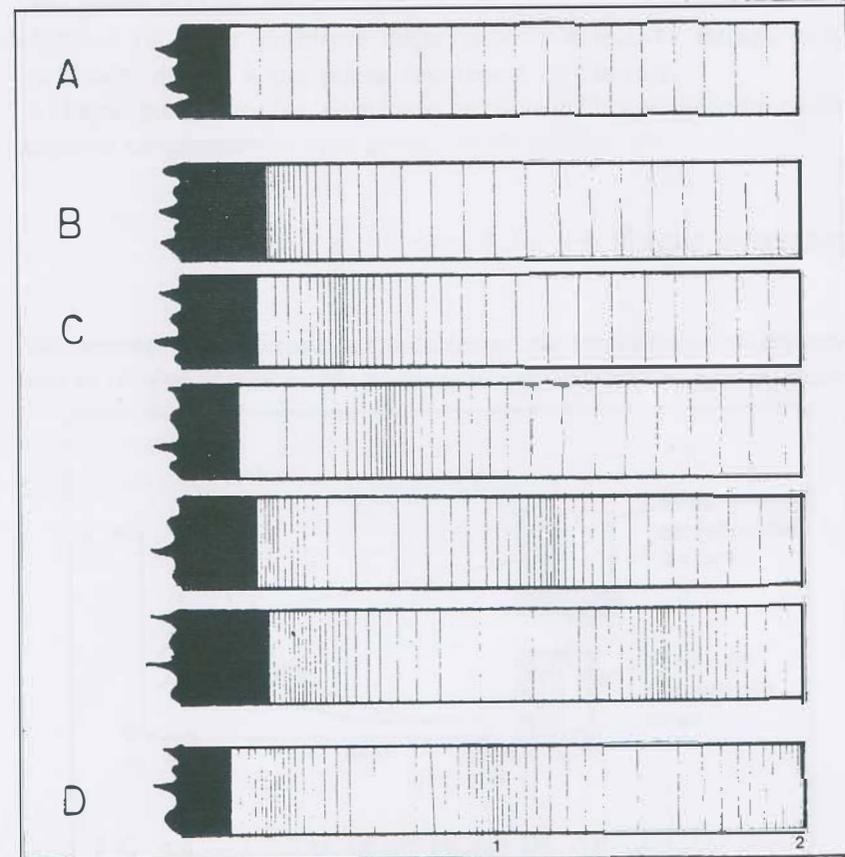


FIG.1.1 — VIBRAÇÕES NUMA SUPERFÍCIE

acompanhando o movimento do corpo. Esta variação de pressão é logo comunicada às moléculas vizinhas do meio, criando ondas longitudinais de compressão e rarefação que partem do corpo (fig. 1.1.D). As moléculas do meio, porém, não se deslocam. Elas oscilam em torno de suas posições de equilíbrio e o que se propaga é o *movimento oscilatório*.

Neste movimento podem-se distinguir vários elementos. Cada molécula repete seu movimento oscilatório de forma cíclica, tardando um tempo determinado, chamado período (T), para completar cada ciclo. A freqüência com que estes ciclos se sucedem na unidade de tempo será, então, a inversa do período:

$$f = \frac{1}{T} \text{ (c/s)}$$

A freqüência mede-se em ciclos por segundo (c/s) ou Hertz (Hz). O movimento de cada molécula pode-se descrever graficamente, colocando em abscissas o tempo e em ordenadas o deslocamento da posição de equilíbrio. O valor máximo atingido no período se chama amplitude (fig. 1.2). O espectro é outra forma de indicar o mesmo movimento oscilatório, mostrando a amplitude em função da freqüência. Processos vibratórios mais complexos podem ser descritos de maneira análoga (fig. 1.4).

Fourier mostrou que toda função periódica (ou quase periódica) pode ser expressa como uma soma de números finitos (ou infinitos) de funções senoidais, cujos períodos são iguais a múltiplos do período da função periódica.

1.2 — Onda sonora

Até agora temos falado do movimento das moléculas. Voltemos à fig. 1 para verificar o *movimento de oscilação*. A onda se desloca com uma velocidade que independe da freqüência e da amplitude da oscilação. Depende, porém, das características do meio: da pressão, da umidade e, especialmente, da temperatura. O seu valor aproximado é de 345 m/s para 22 °C. A sua variação com a temperatura pode ser indicada como:

$$c = (331,4 + 0,607t) \text{ m/s.}$$

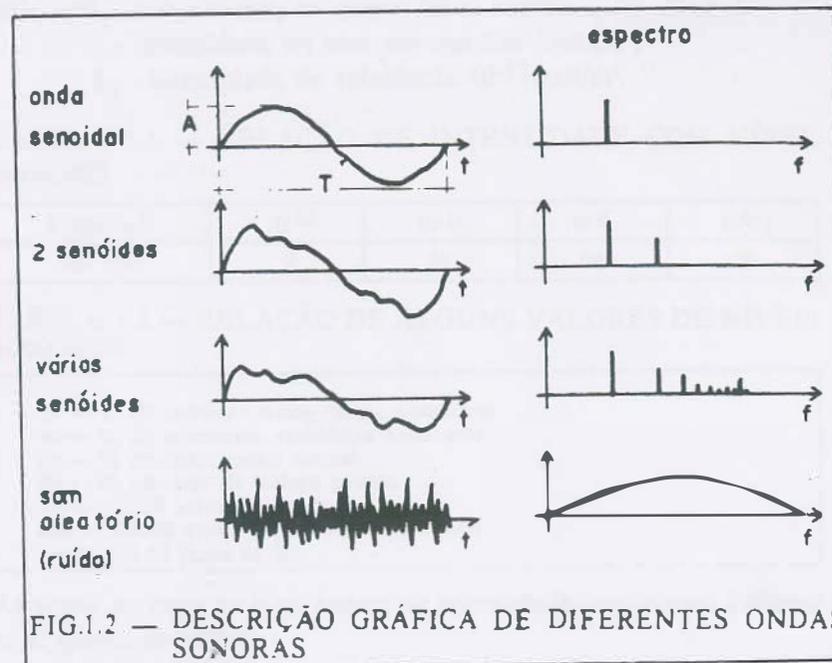


FIG.1.2 — DESCRIÇÃO GRÁFICA DE DIFERENTES ONDAS SONORAS

Se imaginarmos a fonte sonora como pontual e o meio de propagação como homogêneo, as ondas emitidas serão esferas concêntricas que se dilatarão à velocidade do som. Observando essas ondas a uma distância suficientemente afastada da fonte, podemos assumir, para entornos pequenos, que as ondas são planas.

Chamaremos *frente de onda* ao conjunto de pontos onde há, num determinado instante, a mesma fase de rarefação ou compressão do meio. Raio sonoro é uma linha teórica perpendicular às frentes de onda.

Huygens lançou a teoria de que, na propagação do som, cada molécula vem constituir uma nova fonte sonora secundária, de emissão também esférica, sendo que, devido à contraposição das moléculas vizinhas, só poderá propagar-se na direção do raio sonoro.

Comprimento de onda (λ) é a distância entre duas frentes de onda consecutivas, ou seja, a distância percorrida pela onda no período. Como:

$$c = \frac{x}{t} \text{ então } c = \frac{\lambda}{T} \text{ e } c = \lambda \cdot f \text{ (m/s)}$$

(λ é a distância entre os pontos 1 e 2. na fig. 1.1.D).

As frequências do som que interessam na arquitetura estão contidas num âmbito entre 20 e 20 000 c/s, aproximadamente, pois estes valores variam de pessoa a pessoa. As frequências inferiores a 20 c/s e superiores a 20 000 c/s são, respectivamente, tão graves ou tão agudas, que o ouvido humano não mais as percebe como som. As primeiras são chamadas de *infrasons* e as segundas, *ultrasons*.

Se considerarmos a velocidade do som de 345 m/s, os valores limites correspondentes para os comprimentos de onda serão 17,25m e 0,0172m.

1.3 — Intensidade do som

Um corpo que vibra transmite energia ao meio que o rodeia, através da onda sonora. Quanto mais longe estamos da fonte, é intuitivo que menor será a quantidade de energia sonora que vamos receber. Define-se a *intensidade sonora* num ponto e numa direção determinada como a quantidade de energia transportada pela onda sonora por unidade de superfície normal à direção da onda.

$$I = \frac{E}{S} \text{ (watt/m}^2\text{)}$$

O âmbito das intensidades sonoras, às quais o ouvido responde, é muito amplo. Por exemplo, para 1000 c/s, o *limiar de audibilidade* (ou seja, o som mais fraco que uma pessoa média pode apenas ouvir) está situado nos 10^{-12} watt/m², enquanto a intensidade na qual o ouvido começa a doer é, aproximadamente, um milhão de vezes aquela: da ordem de 1 watt/m².

Sendo o âmbito tão amplo, resultaria muito difícil trabalhar com tais unidades. É por isso que, aproveitando o fato assinalado por *Weber e Fechner*, de que para obter incrementos iguais de sensação sonora precisamos incrementos exponenciais da excitação (cfr. a diferença entre as percepções do incremento de 1 cm, na variação de 2 a 3cm, e na variação de 20 a 21cm), foi definida uma nova unidade: o *nível sonoro de intensidade*.

$$NSI = 10 \log \frac{I}{I_0} \text{ (dB)}$$

onde NSI - nível sonoro de intensidade, expresso em decibels,

I - intensidade do som em questão (watt/m²)

I₀ - intensidade de referência 10^{-12} watt/m².

TABELA 1.1 — RELAÇÃO DE INTENSIDADE COM NÍVEL SONORO

I (watt/m ²)	10^{-12}	10^{-11}	10^{-6}	$10^0: 1$
NSI (dB)	0	10	60	120

TABELA 1.2 — RELAÇÃO DE ALGUNS VALORES DE NÍVEIS SONOROS

20 — 30 dB ambiente muito calmo, dormitório
40 — 50 dB escritórios, residência barulhenta
60 — 70 dB conversação normal
80 — 90 dB ruído de tráfego pesado
90 — 110 dB indústria pesada
110 — 120 dB aviões a jato a curta distância
aprox. 130 dB limiar de dor

Às vezes, no lugar do nível sonoro de intensidade, costuma-se definir o *nível sonoro de pressão*:

$$NSP = 20 \log \frac{P}{P_0} \text{ (dB)}$$

onde P_0 será o valor da pressão de referência = 2×10^{-4} μ b.

1.4 — Operações

Verificar, a partir da equação de definição do NSI, que:

1. A uma multiplicação da intensidade pelo fator 10, corresponde um acréscimo de 10 dB no seu nível sonoro.
2. A uma multiplicação por 100, um acréscimo de 20 dB.
3. Se $I' = 2I$; $NSI' = NSI + 3$ dB.
4. Se $NSI = 80$ dB e $NSI' = 70$ dB, então $NS(I + I') = 80,4$ dB ou aproximadamente 80 dB, já que as frações de decibels são desprezíveis.

[Illegible text]



2 — Aspectos psico-fisiológicos do som

[Illegible text]

[Illegible text]

2.1 — Representação tridimensional do som

Sendo três as dimensões do som: frequência de onda, intensidade da perturbação (ou o seu nível) e tempo, o som pode ser representado num sistema tridimensional de coordenadas ortogonais.

Para seu estudo detalhado, será possível separar qualquer dos planos definidos pelos eixos. Por exemplo, o plano definido pelos eixos frequência-nível sonoro, expressa o *espectro do som*, a descrição de sua estrutura interna num instante determinado.



FIG. 2.1 — REPRESENTAÇÃO DO SOM

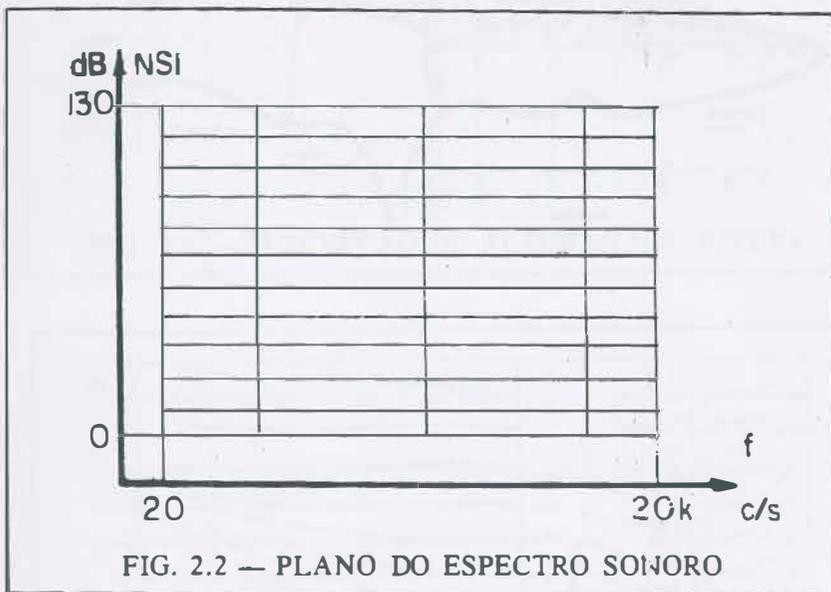
Os limites do gráfico (fig. 2.2) seriam: o mínimo nível audível, o nível de dor, a frequência do som mais grave perceptível e a do mais agudo. Neles, porém, vem a interferir um problema psico-fisiológico: nosso ouvido não percebe da mesma forma dois sons da mesma intensidade e de diferentes frequências.

É para compreender esse fenômeno que devemos estudar a forma de funcionamento de nosso ouvido.

2.2 — Fisiologia do Aparelho Auditivo

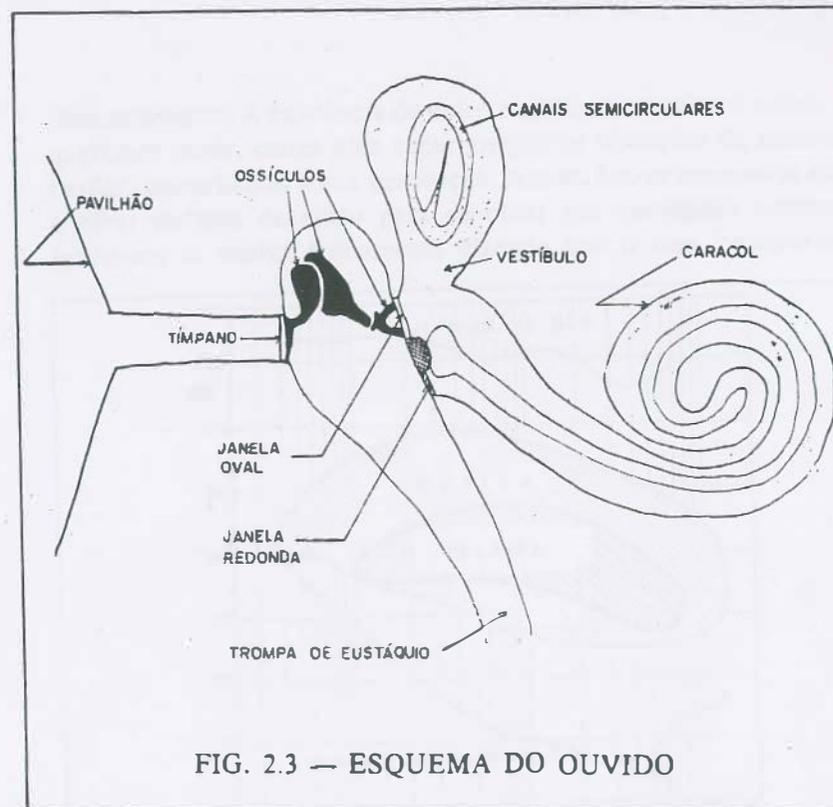
Para transformar as ondas que o atingem pelo ar em "bits" de informação a serem transmitidos ao cérebro, o ouvido deve funcionar

como um transformador que muda as variações de pressão que chegam ao nosso ouvido em variações de tensão elétrica, que os nervos transportarão ao cérebro.



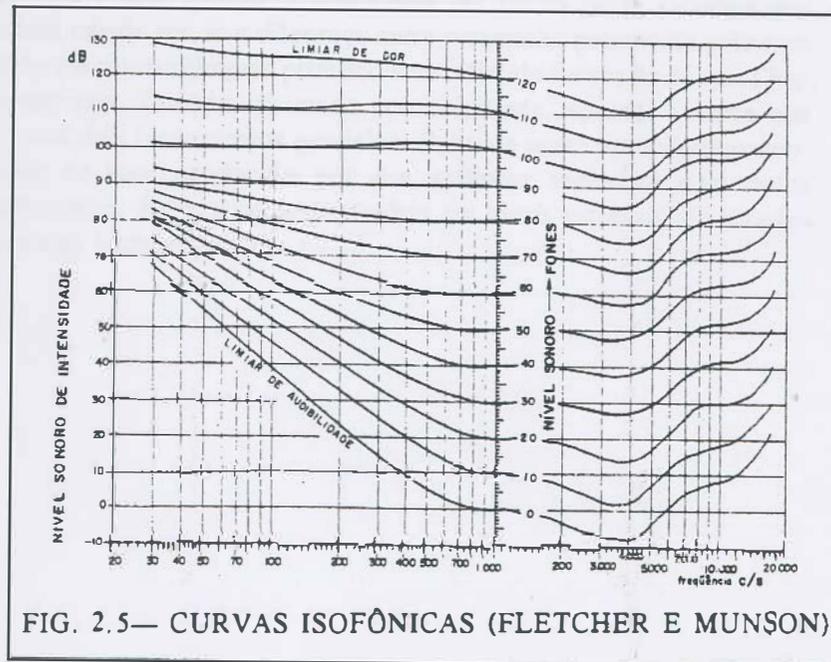
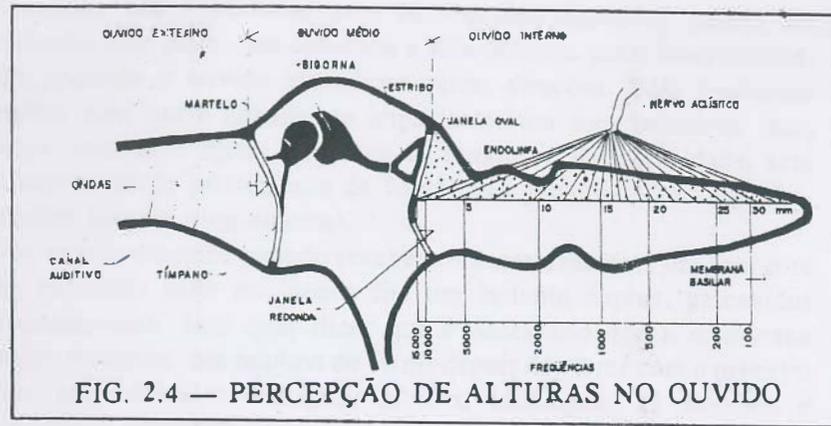
Para esta complexa transformação, o ouvido está especialmente preparado; anatomicamente é composto de três partes (fig. 2.3): o ouvido externo, que vai do pavilhão até a membrana do tímpano, pelo canal auditivo; o ouvido médio, composto de uma cadeia de três ossículos — martelo, bigorna e estribo — e cuja função é a de transmitir e amplificar em 15 vezes a energia mecânica da vibração do tímpano; e o ouvido interno, composto basicamente de um canal quase cilíndrico, enrolado em espiral, chamado caracol. Numa sensível parede deste canal, a membrana basilar, realiza-se essa complexa transformação. A vibração das células origina impulsos eletroquímicos, que serão transmitidos ao cérebro através do nervo auditivo.

A percepção da intensidade se faz com base na quantidade de fibras nervosas excitadas e a percepção da altura do som de acordo com o ponto de maior amplitude da vibração da membrana basilar (fig. 2.4). Da mesma forma que qualquer outra membrana, a membrana basilar não é sensível de forma homogênea em toda a sua superfície, tendo seu máximo na região central.



Por este motivo deveremos corrigir o gráfico do espectro físico, a partir dos resultados da experiência que definem uma série de linhas de igual sensibilidade em função das diferentes frequências de vibração. Essas curvas definem uma nova escala de níveis sonoros: o nível subjetivo de sonoridade, cuja unidade, o fon, foi definida para cada curva, coincidindo com o nível objetivo na frequência de 1000 c/s (fig. 2.5).

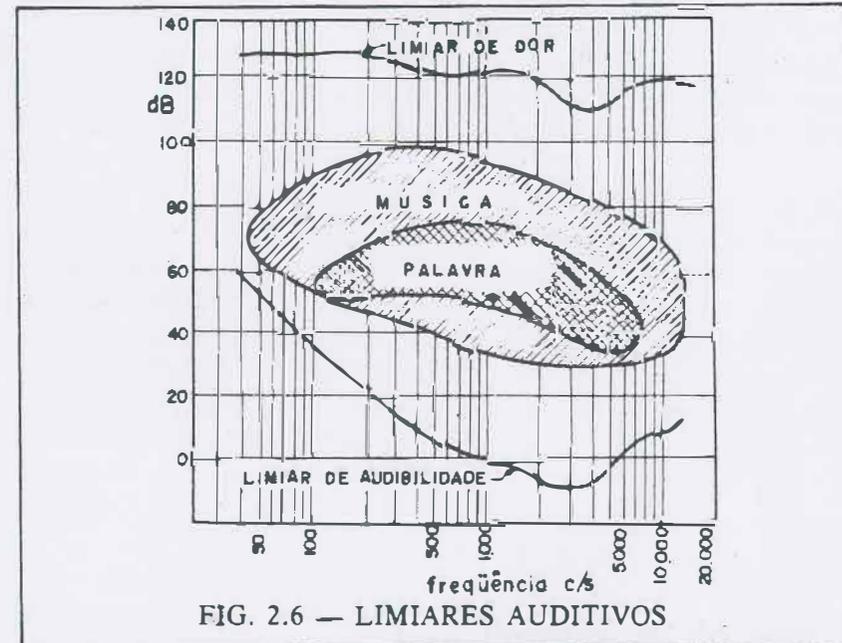
Também, a partir de experiências, são definidos os limites de audibilidade e de dor em função da frequência. Outro ponto interessante diz respeito à mínima variação de um certo parâmetro de som que permita a sua percepção pelo ouvido. Na frequência, por exemplo, é necessária uma variação de uns 3 c/s, na região dos graves, e de uns 0,3%, nos agudos, para ser perceptível uma variação de altura. Nas intensidades, para os sons fracos, é necessária uma variação de 0,5 dB



para uma diferenciação perceptível, enquanto que para sons fortes, basta um incremento de 0,3 dB.

No tempo é preciso uma média de 50 milissegundos entre dois sons para que o ouvido possa percebê-los separadamente. Entretanto, nem toda extensão do nosso gráfico costuma ser utilizada: a palavra ocupa uma área mínima; a da música é pouco maior (fig. 2.6)

Mascaramento. A existência de outro som, simultâneo com aquele que queremos ouvir, causa uma superposição de vibrações da membrana basilar, perturbando a sua percepção. Assim, faz-se necessário elevar o nível do som desejado para se obter sua percepção correta. O fenômeno se traduz fisicamente dizendo que o som "mascarante"



eleva o limiar de audibilidade para o som "mascarado". O fenômeno é bastante complexo e no curso só lembraremos que, enquanto um som puro é especialmente perturbado por outro som puro de frequência próxima, ruídos com predominância de baixas frequências perturbam mais aos de altas frequências, do que reciprocamente.

Localização. A percepção espacial do som é possível devido à existência de nossos dois ouvidos. Com efeito, são dois fatos que se somam para possibilitar essa percepção. Um certo som chegará um instante antes a um ouvido do que a outro, e ainda chegará com maior intensidade àquele primeiro. Ainda que tanto a diferença de tempo quanto a de intensidade sejam ínfimas, a informação é suficiente para que o cérebro possa definir a direção da procedência do som. Essa

percepção não é perfeita, pois tal reconhecimento só poderá ser realizado num plano que contenha a reta definida pelas duas orelhas, não podendo o ouvido identificar outras direções. Esse fenómeno implica num outro igualmente importante: um som percebido duas vezes, com uma ligeira diferença de tempo ou de intensidade, será percebido como proveniente da fonte mais próxima (caso dos alto-falantes laterais num cinema).

Eco. O eco acontece quando recebemos sucessivamente um som com sua repetição mais ou menos fiel um instante depois, percebidos separadamente. Isso quer dizer que é necessário que a membrana basilar descanse um mínimo de 50 ms depois de vibrar com o primeiro som, para 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, dizemos que poderá existir eco se a diferença entre o caminho percorrido pelo som direto e o percorrido pelo primeiro som refletido for maior do que 17m.

Flutter eco. Também chamado eco palpitante, aparece sempre que existam dois fechamentos paralelos. Consiste numa apreciável prolongação do som produzido por sua reflexão sucessiva num outro fechamento. É especialmente notório em locais estreitos, de paredes paralelas (corredores, etc.).

3 — Propagação do som

$$v = \lambda \cdot f$$

Ainda que, em geral, as fontes sonoras não sejam pontuais, quando se propagam ao ar livre, sem encontrarem superfícies refletoras, as ondas sonoras 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: a fonte é dita "adirecional" ou "onidirecional". Neste caso, à distância r superior a $1,5 \lambda$, 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.

$$I = \frac{W}{4 \pi r^2} = \frac{W}{4 \pi} \cdot \frac{1}{r^2} = k \cdot \frac{1}{r^2} \quad (\text{Watt/m}^2)$$

A intensidade, pois, varia na razão inversa do quadrado da distância. Mesmo quando a fonte não é direcional (a saber, irradiando mais potência em torno de certas direções), 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 temperaturas entre as camadas de ar atravessadas (que efetivamente curvam os raios sonoros).

	80 dB	74	68	62
	10 m	20	40	80

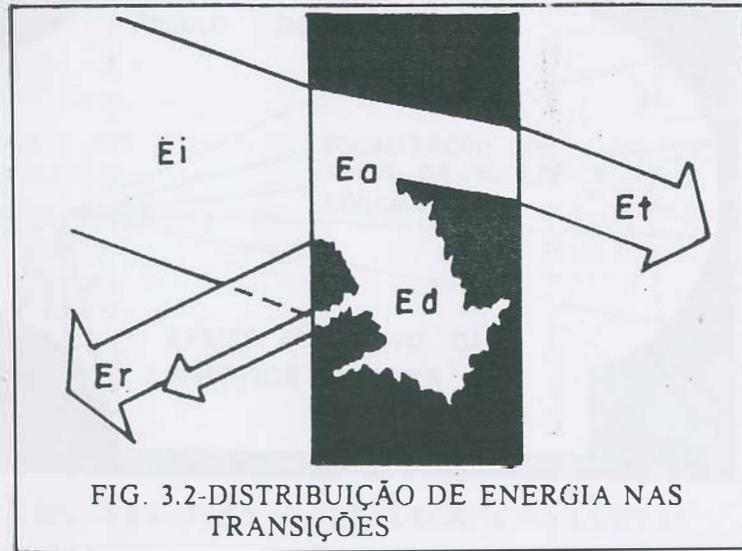
FIG. 3.1 — DECRÉSCIMO DO NÍVEL SONORO COM A DISTÂNCIA

Quer dizer que, para cada duplicação da distância da fonte, a intensidade é dividida por 4; trabalhando com níveis sonoros e fazendo as operações a partir da definição, o novo nível será menor em 6 dB. Exemplo: se a uma distância de 10 m de uma fonte de ruído medimos

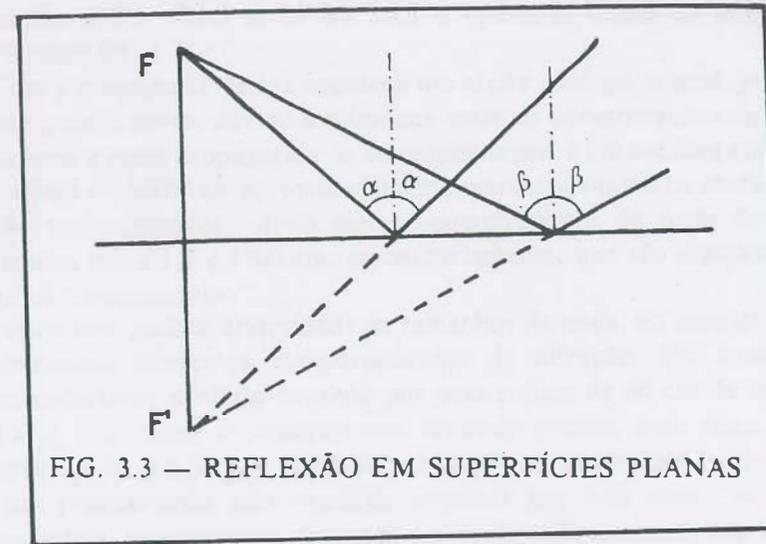
um nível de 80 dB, afastando-nos mais 10 m o nível descerá a 74 dB. Uma nova duplicação da distância, 20 m, ocasionará uma nova diminuição de 6 dB e assim sucessivamente; para obter maiores diminuições, o afastamento terá que ser cada vez maior (fig. 3.1).

3.2 — Transições por meios diferentes

Quando a onda de pressões sonoras encontra um obstáculo — por exemplo, uma parede —, o choque que se segue ao nível molecular faz com que parte de sua energia volte em forma de uma onda de pressões refletida e que o resto produza uma vibração das moléculas do novo meio, o que, visto de fora, é como se a parede "absorvesse" parte do som incidente. Parte dessa energia de vibração das moléculas da



parede será dissipada sob a forma de calor, devido a atritos que as moléculas enfrentam no seu movimento ondulatório; outra parte voltará ao primeiro meio, somando-se com a onda refletida, e o resto da energia contida na vibração da própria parede produzirá a vibração do ar do lado oposto, funcionando a parede como uma nova fonte sonora que criará uma onda sonora no terceiro meio (fig. 3.2). Escrevendo este processo em função das intensidades, teremos:



$$I_{\text{incidente}} = I_{\text{refletido}} + I_{\text{absorvido}}$$

$$I_{\text{absorvido}} = I_{\text{dissipado}} + I_{\text{transmitido}}$$

ou, em forma condensada,

$$I_i = I_r + I_d + I_t$$

Dividindo esta equação por I_i , teremos uma soma de três termos que chamaremos de:

$$\frac{I_r}{I_i} = r \quad (\text{coeficiente de reflexão}) \quad \frac{I_d}{I_i} = d \quad (\text{coeficiente de dissipação})$$

$$\frac{I_t}{I_i} = t \quad (\text{coeficiente de transmissão}) \quad \frac{I_a}{I_i} = a \quad (\text{coeficiente de absorção})$$

Sendo que $r + a = 1$ e $r + d + t = 1$

3.2.1. — Reflexão

Pode-se demonstrar geometricamente que a onda refletida determina com a superfície refletora um ângulo igual ao determinado pela onda incidente. A partir disso podemos dizer que, se a onda incidente for

plana (ou quase plana, se a fonte estiver a uma distância finita), uma superfície refletora plana determinará uma frente de onda refletida também plana. E daí se deduz um mecanismo prático para obter o raio refletido: qualquer que este seja, passará pelo simétrico da fonte ("imagem" virtual desta) em relação ao plano refletor (fig. 3.3).

No caso de superfícies não planas, o problema se complica razoavelmente. Por enquanto diremos que, quando uma superfície convexa difunde o som, dispersando as suas reflexões, uma superfície côncava concentra aquele em forma não-homogênea, criando zonas focais de alta concentração e outras surdas, que não recebem nenhuma reflexão. (fig. 3.4)

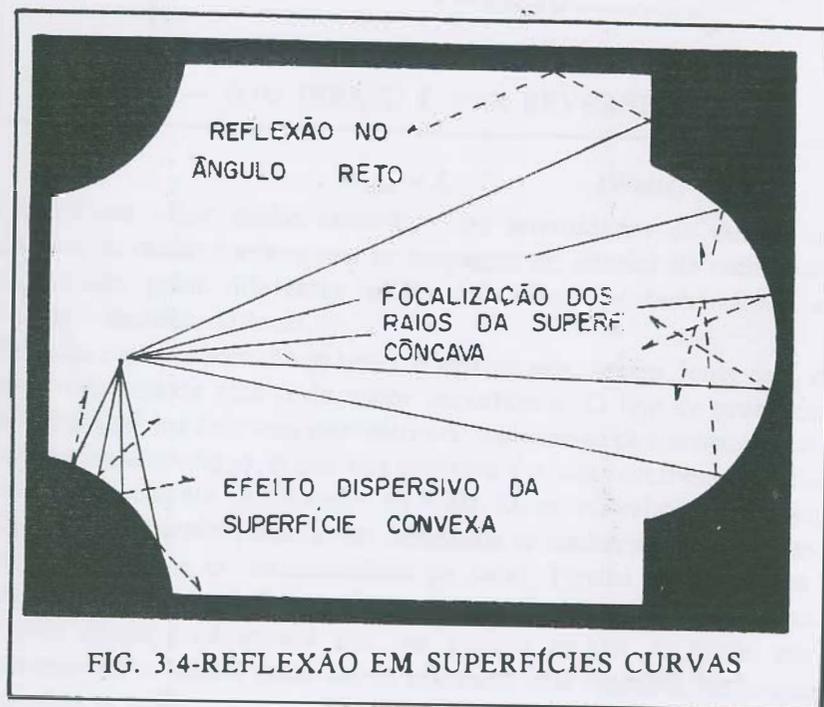


FIG. 3.4-REFLEXÃO EM SUPERFÍCIES CURVAS

3.2.2. — Difração

A experiência indica que os obstáculos não projetam uma sombra acústica completa no caminho do som. Isto é devido à difração, fenômeno que faz com que o som "vire as esquinas". Uma explicação

simples deste efeito se obtém com a aplicação direta da teoria de Huygens (cf. 1.2).

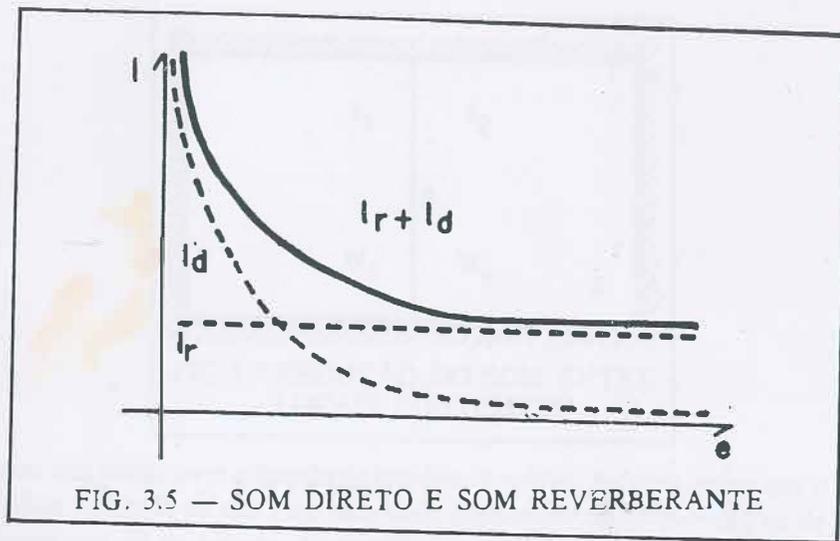
Com a propagação da luz acontece um efeito análogo, o qual, porém, não parece óbvio, devido à diferença entre os comprimentos de onda de uma e outra propagação: os correspondentes à luz oscilam entre os 0,00003 e 0,00006 cm aproximadamente, perante os quais os obstáculos são muito grandes, sendo que os comprimentos de onda do som oscilam entre 1,7 e 1700 cm, aproximadamente, que são grandezas de nível "arquitetônico".

Ainda esta grande diversidade de tamanhos de onda, no caso do som, determina diferentes comportamentos de difração. Por exemplo, consideremos o efeito causado por uma coluna de 40 cm de largura numa sala. Sons de comprimento de onda grande, quer dizer, bem maiores do que 40 cm, serão difratados em torno da coluna, de modo que praticamente não existirão sombras por trás dela. Se, pelo contrário, tivermos sons de comprimento de onda menor do que 40 cm, esses não serão difratados e a coluna originará uma sombra sonora tal, que pouca coisa do som será ouvida por detrás dela. Essas circunstâncias também influenciam a forma em que as ondas são refletidas, sendo que os comprimentos de onda menores comportar-se-ão de forma bastante análoga às ondas de luz e os comprimentos maiores divergirão bastante deste comportamento.

3.3 — Intensidade de som reverberante

Suponhamos uma fonte de som constante — de potência constante — que radie continuamente som no interior de um recinto fechado. A energia sonora cresce no recinto, enquanto parte dessa energia é absorvida pelos fechamentos e objetos contidos no seu interior. No recinto, a energia crescerá até igualar à que sai por absorção.

A partir desse momento, estabelece-se um equilíbrio energético dinâmico: para toda nova energia que entrar, uma quantidade igual de energia sairá do recinto (W_{abs}). E isso vai acontecer, qualquer que seja a potência da fonte. Se chamarmos de A , absorção, medida em *sabines*, a uma área equivalente à quantidade de m^2 de absorção total, ou seja, uma superfície hipotética de coeficiente $a = 1$, definiremos I_r (intensidade reverberada ou intensidade de som difuso) a partir da equação:

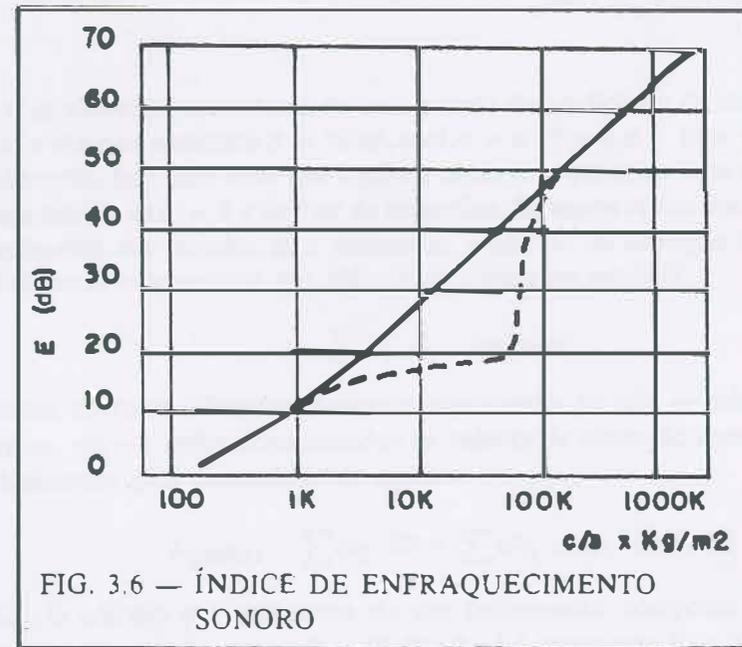


$$W_{\text{abs}} = I_r \cdot A \quad (\text{Watts})$$

I_r será um valor médio estatístico das intensidades do complexo sistema de ondas sonoras que se propagam no interior do recinto — constituído pelas diferentes ondas refletidas nos fechamentos e objetos contidos no local.

Perto da fonte, o som direto será o predominante; porém, longe dela, o som reverberante será o de maior importância. O tipo de problema definirá qual dos dois sons nos interessa; tratando-se de transmissão de som ao local contíguo, o que nos interessa é o som reverberante, pois este será incidente nas paredes do local. Os níveis relativos do som direto e reverberado poderão ser calculados se conhecermos suficientemente a fonte e as características do local. Poucas vezes, porém, estamos nessas condições: então, como regra prática, aceitaremos que o som direto predominará por uns poucos metros da fonte, por exemplo, em relação a quem estiver operando uma máquina (tanto uma máquina de fábrica, como um martelo pneumático, ou de escritório, como uma máquina de escrever).

Obviamente, nenhum tratamento aplicado ao local afetará o som direto. Por exemplo: se um som numa fábrica for tal que ameace surdez permanente, supondo ser impossível agir na máquina para reduzir o seu ruído, o operário deverá usar protetor de orelha. Se não existir o perigo de surdez permanente, será duvidosa a necessidade de se preocupar com o som direto. Muita gente não liga para o ruído que ela mesmo faz



e para muitas operações industriais é uma vantagem positiva para o operário ouvir claramente o som de sua máquina.

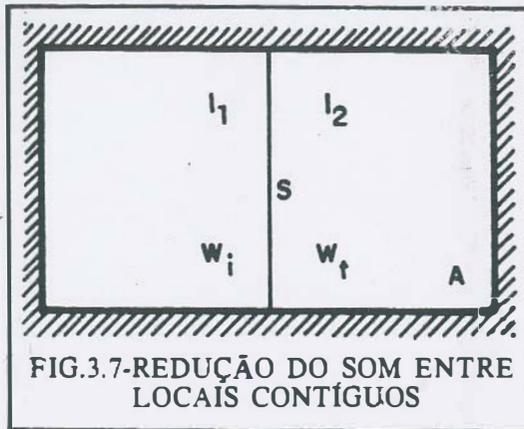
3.4 — Transmissão e isolamento

Se medirmos o $NSI_2 = 80$ dB de um lado de um fechamento, quando do outro lado dele existir um NSI_1 , reverberante, de 110 dB, diremos que o fechamento terá um índice de enfraquecimento E de 30 dB. O valor de E é facilmente calculado em função do coeficiente t de transmissão, com a equação:

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

(em livros ingleses, o E chama-se TL , "transmission loss").

O valor de E , para fechamentos de construção homogênea, depende principalmente do produto da massa superficial (kg/m^2) do fechamento pela frequência do som. Na fig. 3.6 se exprime a curva teórica para o



som que incide com o ângulo de incidência médio. A curva indica que o índice aumenta de uns 5 dB para cada duplicação de frequência, ou de massa por m² da parede. A experiência estabelece, porém, um considerável afastamento da situação teórica (curva pontilhada na figura), devido ao problema de coincidência com certas formas normais de vibração natural da parede. Um cálculo mais apurado do fenômeno de transmissão deverá levar em conta não só o isolamento do fechamento, mas também a absorção média do local receptor. Definiremos como *R*, índice de redução de som:

$$R = NSI_1 - NSI_2 \quad (\text{dB})$$

Para seu cálculo, suponhamos, na fig. 3.7, que I_1 , intensidade reverberante no local 1, só possa sair do recinto através da parede S.

$$W_i = I_1 \cdot S \quad W_t = t \cdot W_i = t \cdot I_1 \cdot S$$

W_i e W_t sendo respectivamente as potências incidentes e transmitidas pela parede S. Suponhamos ainda que, no recinto 2, o som só penetre através da parede S, que atua como fonte sonora de potência W_t .

Então, $I_2 = \frac{W_t}{A}$ e, calculando *R*,

$$R = 10 \log \frac{I_1}{I_0} - 10 \log \frac{I_2}{I_0} = 10 \log \frac{I_1}{I_2} = 10 \log \frac{W_t \cdot A}{W_t \cdot S \cdot t}$$

$$R = 10 \log \frac{1}{t} \cdot \frac{A}{S} = E + 10 \log \frac{A}{S} \quad (\text{dB})$$

3.5.1. A absorção equivalente de uma parede de coeficiente de absorção $a = 0,6$ e de superfície $S = 10 \text{ m}^2$, será $A = a \cdot S = 0,6 \times 10 = 6 \text{ m}^2$ de absorção. Isso quer dizer que a parede absorve o que absorveria uma parede teórica de $a = 1$ e de 6 m^2 de superfície. Se temos vários tipos de revestimento nas paredes, de a diferentes, o cálculo da absorção total se faz como a somatória das diferentes absorções parciais:

$$A = \sum a_i \cdot S_i \quad (\text{sabines})$$

Se ainda tivermos diferentes elementos absorventes na sala — móveis, pessoas, etc —, serão acrescentados os valores de absorção unitária, multiplicados pela quantidade de objetos.

$$A_{\text{global}} = \sum (a_i \cdot S) + \sum (A_j \cdot n_j) \quad (\text{sabines})$$

3.5.2. O cálculo do isolamento de um fechamento composto (por exemplo, 15 m² de muro com $E = 50 \text{ dB}$ e 2 m² de porta com $E = 20 \text{ dB}$) se faz a partir do cálculo da média ponderada em superfície do coeficiente de transmissão:

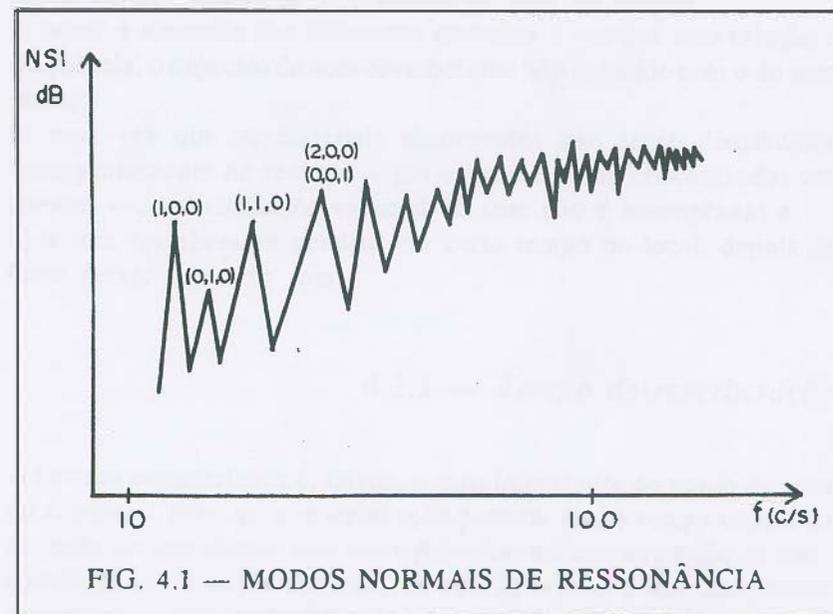
$$t_{\text{médio}} = \frac{\sum t_i S_i}{\sum S_i} = 0,00118 S;$$

$$E = 10 \log \frac{1}{0,00118} = 29 \text{ dB.}$$

4.1 — Modos normais de ressonância no recinto

Quando os objetos são atingidos por uma onda sonora, entram em vibração. Às vezes, para algumas frequências, a vibração é tão grande, que o objeto "soa" — caso de vidros, vasos sobre pianos ou alto-falantes, etc. Para todo corpo físico existem, em função de suas formas e dimensões, uma ou várias frequências que, quando excitadas por uma onda sonora que as contenha, provocam a vibração do corpo, resultando um som da mesma frequência, em forma mais ou menos audível. São as chamadas frequências de ressonância.

Um caso especial de ressonância é o que permite a existência de instrumentos de som definido. A altura de uma nota no violino, por exemplo, não depende de como o instrumento é tocado — com arco, ponteadado ou percutido —, mas sim das frequências de ressonância das cordas, que entram em vibração com qualquer tipo de agente que as



coloque em movimento. O mesmo fenômeno se observa com os instrumentos de sopro: a coluna de ar contida no tubo do instrumento é posta em vibração com o ar injetado pelo sopro. A altura dependerá do comprimento do tubo.

Suponhamos, teoricamente, um recinto com o espaço dividido numa quantidade de "tubos" paralelos a uma certa direção: quando um som é produzido nesse recinto, o ar dos "tubos" entra em vibração, com frequência correspondente ao seu comprimento e a seus múltiplos sucessivos. Na realidade, o fenômeno é muito mais complexo, tendo em conta que num recinto existem diferentes formas de acomodar esses "tubos", com comprimentos todos diferentes. A resposta acústica do recinto se manifesta como uma deformação do som, com algumas frequências sendo realçadas, em detrimento de outras.

Se medimos o nível sonoro num canto de uma sala de forma prismática, ao variarmos a altura de um som de intensidade fixa num outro canto daquela sala, obteremos o diagrama da fig. 4.1, em vez de uma esperada linha horizontal.

Cada pico corresponde a uma frequência "preferencial", calculável a partir da equação:

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{p}{C}\right)^2 + \left(\frac{q}{L}\right)^2 + \left(\frac{r}{A}\right)^2} \quad (\text{c/s})$$

C , L e A são as dimensões do recinto, c a velocidade do som e p , q e r quaisquer números inteiros positivos (que servirão para identificar os diferentes modos).

Assim, a *terna* de números inteiros (1; 0; 0), aplicada aos parâmetros p , q , r , resulta na frequência do som, cujo comprimento de onda coincide com o dobro do comprimento do recinto, correspondendo ao primeiro pico da fig. 4.1.

$$f(1,0,0) = \frac{c}{2C} \quad (\text{c/s})$$

É fácil ver que existe uma grande quantidade de modos normais de ressonância para cada recinto, sendo que muitos destes coincidem numa mesma frequência.

Para as frequências agudas, o problema não é crítico, pois a grande quantidade de modos normais aproxima consideravelmente os picos. Pelo contrário, para as frequências graves, o problema é muito

importante, pois a separação entre um e outro modo normal estabelece consideráveis distorções do som no recinto.

No caso do local ser grande — com dimensões maiores que os comprimentos de onda correspondentes às frequências audíveis mais graves —, diminui o perigo. Em locais pequenos, pelo contrário, os modos se separam bastante.

Casos especialmente críticos acontecerão se duas ou mais dimensões do local coincidirem, ou estiverem relacionadas por valores simples (2:1; 3:1), pois então os modos se acumularão em poucas frequências, piorando os desníveis da resposta do local. Nestes casos, convém diversificar os comprimentos daqueles "tubos" elementares, ou seja, procurar uma maior irregularidade entre as dimensões do recinto.

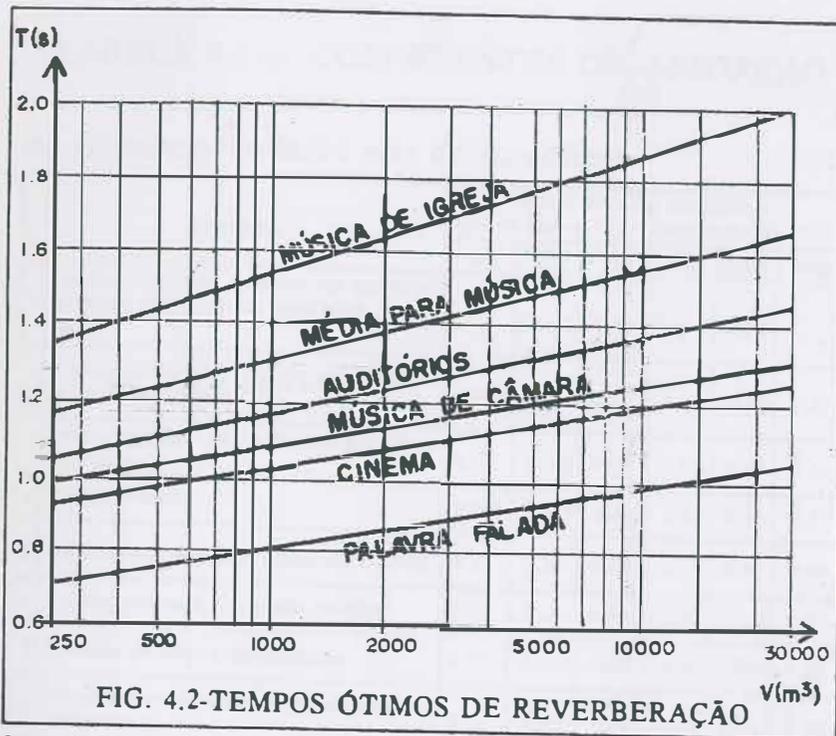
4.2 — Reverberação do som

A simples existência de fechamentos num recinto dá origem aos sons refletidos e implica no surgimento da "intensidade reverberante I_r ", definida na unidade anterior. O fenômeno chama-se *reverberação* e incide de três modos na distribuição do som no recinto:

- como a absorção dos diferentes materiais é seletiva com relação à frequência, o espectro do som reverberante não coincide com o do som direto;
- uma vez que os materiais absorventes não serão distribuídos homogeneamente no recinto — por exemplo, estão concentrados nas paredes —, a distribuição espacial do som não é homogênea; e
- o som reverberante persiste um certo tempo no local, depois da fonte deixar de emitir som.

4.2.1 — Tempo de reverberação

A terceira característica é, talvez, a mais importante do ponto de vista do arquiteto, pois, se a reverberação persiste muito tempo depois da extinção do som direto, isso virá a perturbar a clara percepção do som, a inteligibilidade de um discurso. Se, pelo contrário, o som desaparecer imediatamente, além de dificultar a audição em pontos afastados da



fonte (a I_r será muito pequena), prejudicará a percepção de alguns tipos especiais de fonte sonora (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 milionésima parte — ou descer em 60 dB o seu nível — a partir do momento em que cessa a fonte sonora.

Como a absorção dos materiais depende da frequência do som, a quantidade de som reverberante e o tempo de reverberação também dependerão dela. Na prática costuma-se estudar o problema para três ou mais frequências. Para se obter um estudo bastante aproximado, usam-se as frequências de 125, 250, 500, 1000, 2000 e 4000 c/s.

Tempos ótimos de reverberação foram determinados experimentalmente em função do volume do local e do seu uso. Seus valores estão representados nas curvas da fig. 4.2.

Sabine obteve experimentalmente — e depois foi demonstrado em forma teórica — a relação que liga o tempo de reverberação com as características do local:

$$t_{60} = \frac{0,161 V}{A} \quad (s)$$

onde V é o volume do recinto em m^3 e A a absorção total em sabines. (A constante 0,161 corresponde aos valores em unidades MKS; em unidades inglesas o valor é 0,049.) A equação é válida para regime difuso e para locais com uma absorção média baixa, sendo de notar a sua independência da forma do local.

Outras fórmulas foram desenvolvidas para o cálculo do tempo de reverberação, sendo especialmente conhecidas as de:

$$\text{Norris-Eyring} : t_{60} = \frac{0,161 \cdot V}{-2,3 \cdot S \cdot \log_{10} (1-\bar{a})} \quad (s)$$

onde \bar{a} é o coeficiente de absorção médio ponderado em superfície e S a superfície total absorvente.

$$\text{Millington} \quad t_{60} = \frac{0,161 \cdot V}{-2,3 \sum S_i \cdot \log_{10} (1-a_i)} \quad (s)$$

sendo S_i e a_i superfície e coeficiente de absorção de cada material.

4.3 — Absorção do som

A absorção do som num local pode ser expressa pela fórmula:

$$A = \sum S_i \cdot a_i + \sum n_i \cdot A_i + xV \quad (\text{sabines})$$

S_i — superfície aparente de cada material (m^2)

a_i — coeficiente de absorção de cada material

n_i — quantidade de objetos de absorção A_i

A_i — absorção global de cada objeto (Sabine)

x — coeficiente de absorção do ar (Sabine/ m^3)

V — volume do local

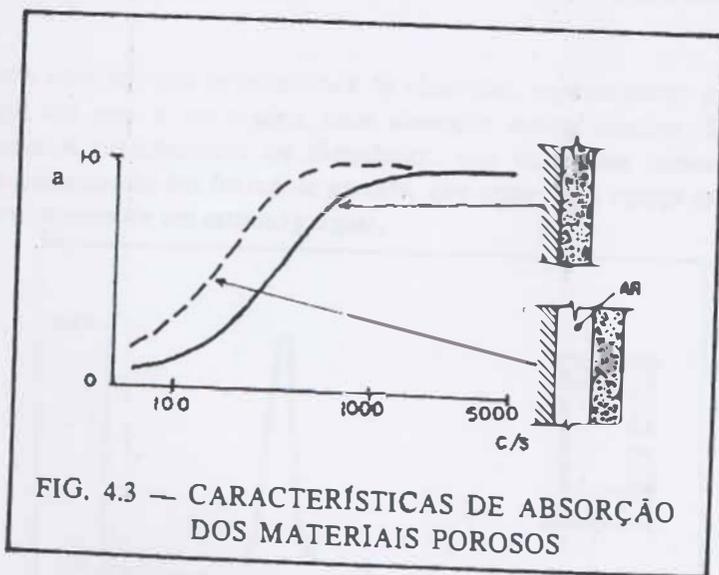
Dissemos que a absorção depende da frequência e, como é preciso conhecer os 'diferentes materiais que podem ser utilizados para o desenho, ou correção' do tempo de reverberação de uma sala, estudaremos um pouco mais detidamente como se processa essa absorção nos materiais.

4.3.1 — Materiais porosos

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 desta maneira. Existe, porém, 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.

A absorção do material pode ser melhorada separando-o da parede, como se observa na curva pontilhada (fig 4.3). Se os poros não estão comunicados — caso do isopor, concreto celular, etc. —, o material não poderá ter uma grande absorção. A mesma coisa acontece quando os poros são fechados, por exemplo, com uma película de tinta. Mas nestes casos, o problema se resolve com furos introduzidos na superfície do material: devido ao processo de difração, um painel pintado e com furos absorve sensivelmente a mesma quantidade de energia sonora, como se o painel estivesse inteiramente exposto.



Alertamos contra os materiais que se encontram na praça com o adjetivo indiscriminado de "acústico". Separada do contexto, esta palavra não indica nada; além de que todos os materiais são "acústicos" (quer dizer que absorvem, refletem, transmitem e dissipam a energia sonora que chega a eles), não seria suficiente dizer que ele é "bom absorvente", sem saber quanto (coeficiente de absorção) e para

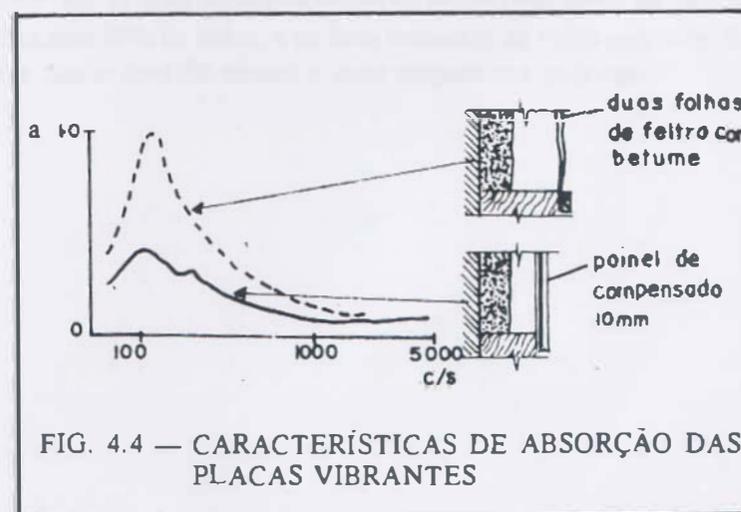
que sons (para quais frequências). Na tabela 4.1 se dão esses valores estimativos, para vários materiais de construção usuais, sendo que, não existindo ainda no Brasil nenhuma medição sistemática sobre materiais brasileiros, devemos nos reduzir a colocar valores aproximados, tirados de diferentes publicações estrangeiras.

Em forma geral, os materiais porosos podem ser classificados da seguinte forma:

- a) peças de material poroso diretamente exposto: "colchões" de lã, de vidro ou de rocha, feltro, poliuretano, etc;
- b) material poroso coberto por uma placa furada: os anteriores, sob lâmina de metal, compensado de madeira, papelão, tela asfáltica, etc;
- c) preparado para aplicar com pistola diretamente sobre a parede ou o teto: geralmente de amianto ou lã de vidro, conglomerado com resinas elásticas (o maior problema deste sistema é que se estraga com facilidade, devido à sua pouca resistência mecânica);
- d) chapas pré-fabricadas, com furos ou não: de fibra de madeira, ou de amianto conglomerado com gesso, ou de cortiça, etc.

4.3.2 — Placas vibrantes

Geralmente, o condicionamento do tempo de reverberação numa sala não se resolve somente com a absorção das frequências agudas. Pode



ser preciso absorver os graves, sendo que, para empregar material poroso, seriam necessárias espessuras compatíveis com os comprimentos de onda (vários metros). Torna-se, então, necessário pensar num outro sistema de absorção. Membranas fixadas no seu perímetro, estimuladas a vibrar pela energia da onda sonora, transformarão parte desta em calor. Se o painel for rígido e pesado, a quantidade de energia absorvida será mínima, mas se for leve e flexível, a absorção será muito maior, especialmente nas frequências baixas (fig. 4.4)

Geralmente são empregados painéis de compensado de madeira ou de papelão abetuminado, apoiados em bastidores, ficando a uma certa distância da parede. O maior problema que apresenta este 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.

4.3.3 — Ressonadores

Existe uma terceira possibilidade de absorção, especialmente para os casos em que é necessária uma absorção muito seletiva. São os chamados ressonadores de Helmholtz, que consistem basicamente num receptáculo em forma de garrafa, que separa um espaço de ar do resto, através de um estreito gargalo.

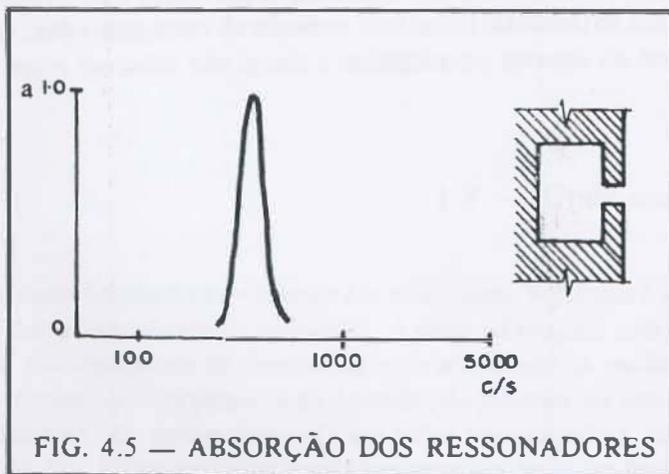


FIG. 4.5 — ABSORÇÃO DOS RESSONADORES

Convenientemente projetado, a inércia do espaço de ar fechado opõe uma resistência à onda de pressões que o atinge, processo que pode ser

ainda intensificado colocando-se uma resistência extra, por atrito, no gargalo da garrafa (material poroso).

Pode-se demonstrar teoricamente que a frequência de ressonância do sistema depende de V (volume de ar encerrado), v (volume de ar no gargalo) e S (superfície corrigida do gargalo), através da equação:

$$f = 85000 \frac{S}{\sqrt{v \cdot V}}$$

4.3.4 — Construções especiais

Engenheiros e fabricantes têm idealizado uma grande quantidade de sistemas especiais, sempre na base dos três tipos de absorção acima detalhados, o que pode ser consultado na bibliografia especializada.

4.4 — Operações

Calcular, aplicando os valores da tabela anexa, a absorção total, para as frequências de 125, 500 e 2000 c/s, de um recinto de aula escolar de 10 x 7 x 3m, cujo chão é de parquê sobre sarrafos, o forro de estucado sobre tela, as duas maiores paredes de reboco liso sobre alvenaria, uma delas com 40% de vidro, e as duas restantes de tijolo aparente. Supõe-se a classe com 50 alunos e suas respectivas cadeiras.

TABELA 4.1 — COEFICIENTES DE ABSORÇÃO

(Dados recolhidos de diversas fontes)

A) Elementos isolados não de superfícies

Elementos	Absorção total em Sabines (m ² de abs = 1) p/ frequências de (c/s)					
	125	250	500	1000	2000	4000
1 Público misturado, sentado em poltronas de teatro simplesmente estofadas no encosto.		0,325	0,38	0,455	0,39	
2 Público misturado, sentado em poltronas de estofado grosso.	0,19	0,40	0,47	0,47	0,51	0,47
3 Pessoa sentada, média de uma por metro quadrado.	0,17	0,361	0,47	0,52	0,53	0,46
4 Adulto em pé.	0,185	0,325	0,43	0,42	0,46	0,37
5 Adolescente, sentado, incluindo cadeira.	0,2	0,28	0,32	0,37	0,41	0,44
6 Escolar, sentado, incluindo cadeira.	0,17	0,21	0,26	0,30	0,325	0,37
7 Poltrona de teatro, de madeira.	0,01	0,014	0,022	0,03	0,047	0,06
8 Poltrona com assento móvel de madeira compensada.	0,02	0,02	0,02	0,04	0,04	0,03
9 Poltrona com assento móvel cercada de couro.	0,09	0,13	0,15	0,15	0,11	0,07
10 Poltrona com assento e encosto de molas, forrada de veludo com assento levantado.		0,29	0,28	0,31	0,32	
11 Cadeira de palhinha.	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	
12 Cadeira com assento móvel de madeira compensada (box spring), forrada com napa, assento levantado.		0,13	0,15	0,12	0,066	
13 Músico de orquestra com instrumento.	0,38	0,79	1,07	1,30	1,21	1,12

B) Materiais de superfícies, não especiais

Material	Espes-sura. (cm)	a: coeficiente de absorção para frequências de (c/s)					
		125	250	500	1000	2000	4000
14 Lã de rocha	10	0,42	0,66	0,73	0,74	0,76	0,79
15 Lã de vidro solta	10	0,29	0,55	0,64	0,75	0,80	0,85
16 Feltro, leve	1,2	0,02	0,04	0,10	0,21	0,57	0,92

Material	Espes-sura. (cm)	a: coeficiente de absorção (idem)					
		125	250	500	1000	2000	4000
17 Piso de tábuas de madeira, sobre vigas, encerado normal.		0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07
18 Piso de madeira com espaço livre por baixo.		0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
19 Parquê sobre areia.		0,20	0,15	0,13	0,12	0,09	0,06
20 Parquê sobre sarrafos de madeira.		0,16	0,14	0,12	0,11	0,09	0,07
21 Parquê de madeira dura sobre asfalto.	2	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
22 Linóleo (pano-couro) sobre concreto.	0,6	0,01	0,01	0,15	0,02	0,03	0,03
23 Placas de cortiça sobre concreto.		0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04
24 Carpete simples, forrado.		0,10		0,25		0,40	
25 Tapete de lã, forrado.	1,5	0,20	0,25	0,35	0,40	0,50	0,75
26 Carpete de juta.		0,02	0,02	0,04	0,08	0,16	0,27
27 Concreto aparente não pintado.		0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
28 Mármore.		0,01		0,01		0,02	
29 Parede de alvenaria, não pintada.		0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07
30 Parede de alvenaria pintada.		0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
31 Reboco liso sobre alvenaria.	1,5	0,03		0,04		0,04	
32 Reboco de gesso sobre alvenaria, pintado ou não.		0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04
33 Reboco caiado sobre tela (estruque).	2	0,04	0,05	0,06	0,08	0,04	0,06
34 Reboco fibroso.	5	0,35	0,30	0,20	0,55	0,10	0,04
35 Reboco de vermiculite acústico.	3	0,23	0,30	0,37	0,42	0,48	0,46
36 Reboco de vermiculite não acústico.	3	0,12	0,10	0,07	0,09	0,07	0,07
37 Tábuas de pinho.	2,5		0,16	0,13	0,10	0,06	0,06
38 Chapa metálica sobre sarrafos de 4 cm.	0,16	0,18	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07
39 Compensado de madeira sobre 10 cm de lã de vidro.	0,6	0,30	0,11	0,06	0,05	0,02	0,02

Material	Espes- sura. (cm)	a: coeficiente de absorção (idem)					
		125	250	500	1000	2000	4000
40 Compensado de madeira sobre sarrafos de 5 cm.	0,3	0,20	0,28	0,26	0,1	0,12	0,11
41 Madeira maciça envernizada.	5	0,1		0,05		0,04	0,04
42 Tábua de fibras de madeira polida.	1,8	0,08	0,13	0,16	0,30	0,35	0,35
43 Vidro simples		0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
44 Vidro com grandes superfícies.		0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
45 Cortina de algodão esticada (0,5 Kg/m ²).		0,04		0,13		0,32	
46 Idem com dobras aos 75% de sua área.		0,04	0,23	0,40	0,57	0,53	0,40
47 Idem, com dobras aos 50%.		0,07	0,31	0,49	0,81	0,66	0,54
48 Cortina de veludo (0,6Kg/m ²), esticada, junto à parede.		0,05		0,35		0,38	
49 Idem, esticada, a 10 cm da parede.		0,06	0,27	0,44	0,50	0,40	0,35
50 Idem com dobras aos 50% de sua área.		0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65
51 Água (piscina).		0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
52 Superfície de abertura livre sob um balcão, com a relação profundidade/ altura do balcão igual a 2,5.		0,30		0,50		0,60	
53 idem. c/ a relação igual a 3.		0,40		0,65		0,75	
54 Ar (por m ³)					0,003	0,007	0,02
55 Abertura de palco.		0,028		0,037		0,046	

5 — O ruído

5.1 — Definição do ruído

Têm-se tentado muitas definições para o ruído, desde as puramente físicas, às da teoria da comunicação. Cada uma serve para o seu próprio âmbito de trabalho. No curso chamaremos de ruído a todo som que não seja desejado pelo receptor. Em Arquitetura, o ruído será importante na medida em que afetar as pessoas que trabalham ou vivem em edifícios. O ruído pode afetar em várias formas: pode ser tão forte que cause dano imediato ao ouvido; pode ser forte para causar dano permanente ao ouvido, se a pessoa estiver exposta a ele por muito tempo; pode ser suficientemente forte para interferir na audição de música, ou de um texto lido ou, simplesmente, pode ser perturbador.

5.2 — Medição do ruído

A fig. 2.5 estabelecia a relação entre as medidas físicas e as fisiológicas do som. Para definir a perturbação causada por um ruído determinado, será necessário então medi-lo em várias frequências e corrigir a curva resultante, conforme as curvas fisiológicas. Os especialistas de acústi-

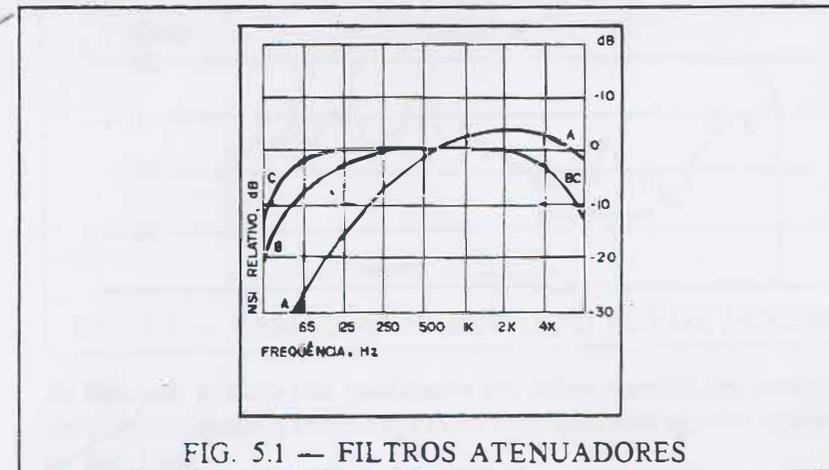


FIG. 5.1 — FILTROS ATENUADORES

ca têm inventado uma série de unidades e formas de cálculo para corrigir os valores da leitura física. Neste texto vamos nos reduzir a explicar uma das formas de aproximação ao problema.

Baseia-se esta na possibilidade de inserir filtros corretores no interior do próprio aparelho de medida do som (decibelímetro), de forma a obter valores únicos para ruídos complexos, em vez de uma série de valores dependendo das frequências.

Os filtros funcionam como atenuadores, usando curvas pré-fixadas. As curvas A, B, C foram criadas para reproduzir a resposta do ouvido perante os sons de aproximadamente 40, 70 e 100 fones, respectivamente. Atualmente se usa quase com exclusividade a curva A, independente do tipo de ruído ao qual é aplicado o instrumento medidor e independente do seu nível sonoro.

5.3 — Fontes de ruídos

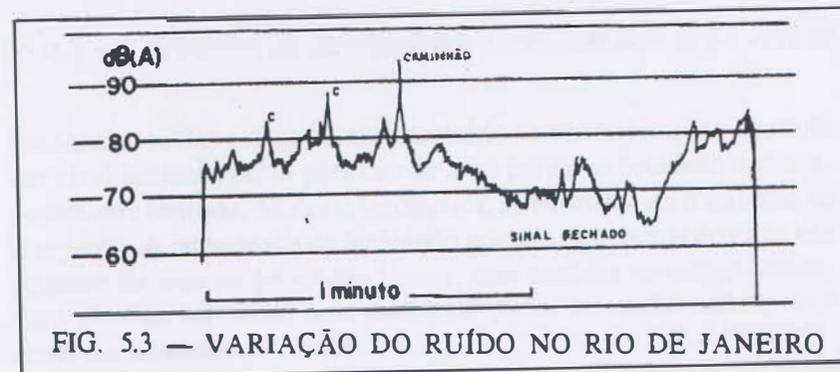
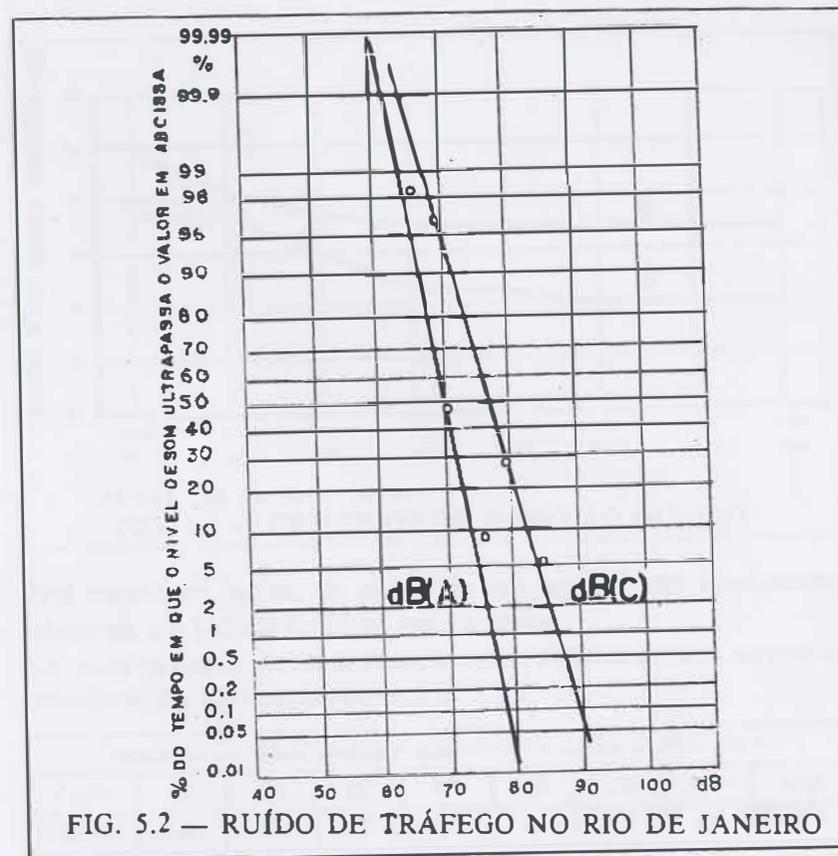
As fontes de ruídos que incidem num local podem ser classificadas para seu estudo em exteriores e interiores.

5.3.1 — Fontes de ruídos exteriores

Dentro desta categoria, sem dúvida os ruídos mais intensos na nossa civilização são produzidos pelos aviões (100 kilowatts de potência contra 1/100 watt para um automóvel), especialmente os a jato. Com curvas experimentais é possível prever o nível do som produzido no solo, conhecida a trajetória do avião. A partir de tais curvas o acústico urbanista poderá definir zoneamentos em torno de aeroportos.

Embora não tão forte como o do avião, 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. *Hime* tem realizado medições do tráfego numa avenida movimentada do Rio de Janeiro (figs. 5.2 e 5.3).

As máquinas usadas na construção civil são outra fonte importante de ruído, especialmente quando empregadas fora do horário normal de trabalho (tabela 5.1).



As fábricas, quando não confinadas em zonas específicas, perturbam consideravelmente a vizinhança (vide repetidas queixas dos habitantes de São Paulo).

TABELA 5.1	
Fontes de ruídos na construção	Nível dB (A)
Trator-scrapec (rodas com pneus)	93
Martelo pneumático	85
Idem com saia amortecedora e barreira leve	65
Compressor (motor diesel)	79
Betoneira (motor diesel)	75
Idem (motor elétrico)	61

5.3.2 — Fontes de ruídos interiores

Os ruídos que maior influência têm nos prédios de habitação são os provenientes de rádio e televisão e os produzidos por impactos contra os pisos. Na bibliografia se encontram tabelas com valores para diferentes tipos de ruídos e os seus espectros.

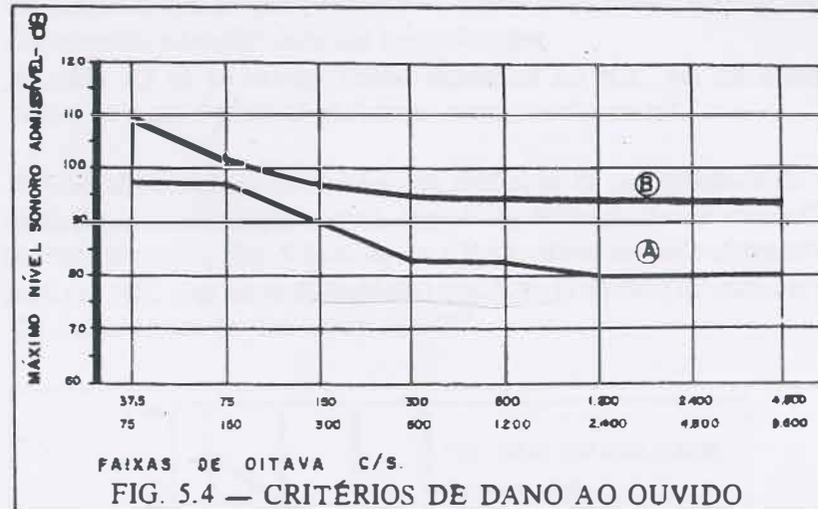
5.4 — Critérios de ruído

Como a reação das diferentes pessoas ao ruído é altamente individual, costuma-se trabalhar estatisticamente, criando-se curvas-critério, que definem probabilidades razoáveis, seja de perda de acuidade auditiva, seja de ocasional protesto por parte dos usuários.

5.4.1 — Critério de dano ao ouvido

A fig. 5.4 mostra os critérios — confeccionados a partir de estatísticas diferentes — aplicáveis a ruídos em locais industriais. Para Burns, a curva A determina valores de níveis de som que não devem ser ultrapassados, sob risco de dano permanente à audição. Para Bera-neck, a curva B indica limites de tolerância: se em qualquer das faixas os níveis ultrapassarem os 5 dB, existe a probabilidade de que alguma pessoa sofra perda auditiva, devido à exposição prolongada ao ruído (um ou mais anos).

As medições foram feitas sob as seguintes condições: ruído estacionário, com espectro de faixa larga; exposição prolongada: jornada de trabalho de 8 horas, 5 dias na semana.



Para exposições curtas, da ordem de um minuto, são considerados toleráveis até 140 dB de nível sonoro global.

No caso dos ruídos serem de sons puros, ou de faixa estreita, devem-se considerar os valores da tabela 5.2.

f (c/s)	50	100	200	400	800	1600	3200	6400
NSI (dB)	110	95	88	85	84	83	82	81

5.4.2 — Critérios de interferência com comunicação verbal

Embora os ruídos reinantes nos escritórios e nas habitações sejam de um nível bastante baixo para causar uma perda de acuidade auditiva, podem ser, contudo, bastante incômodos, se perturbarem o trabalho ou o repouso. A intensidade do incômodo por eles provocada depende não somente de suas propriedades físicas, mas também de outros fatores. Para pessoas nervosas, este incômodo pode, em certos casos, ser a causa de alteração na saúde.

Os problemas que ocasiona o mascaramento de um som na presença de outro adquirem particular importância nos casos em que é necessário estabelecer comunicação verbal. Com efeito, a interferência do ruído de fundo na conversação produz, em princípio, um

problema de mascaramento, na medida em que, elevando o limiar de audibilidade devido ao ruído de fundo, diminuirá a inteligibilidade. Embora o espectro da voz humana se estenda desde frequências de valor inferior a 100 c/s até frequências superiores a 10000 c/s, consegue-se boa inteligibilidade com uma gama espectral muito mais reduzida. Ensaio realizados por diversos investigadores demonstraram que quase toda a informação necessária à comunicação verbal está compreendida entre as frequências de 200 c/s e 6000 c/s. Foi igualmente verificado que, dividindo a gama de frequência (200 c/s, 6000 c/s) em faixas com igual conteúdo informativo para a comunicação verbal, a inteligibilidade correspondente à totalidade da gama considerada é igual à média dos valores das inteligibilidades que corresponderiam a cada uma das faixas.

Quando se trata de avaliar reduções de inteligibilidades provocadas por ruídos, pode-se simplificar, considerando-se unicamente as três oitavas (600, 1200), (1200, 2400), e (2400, 4800).

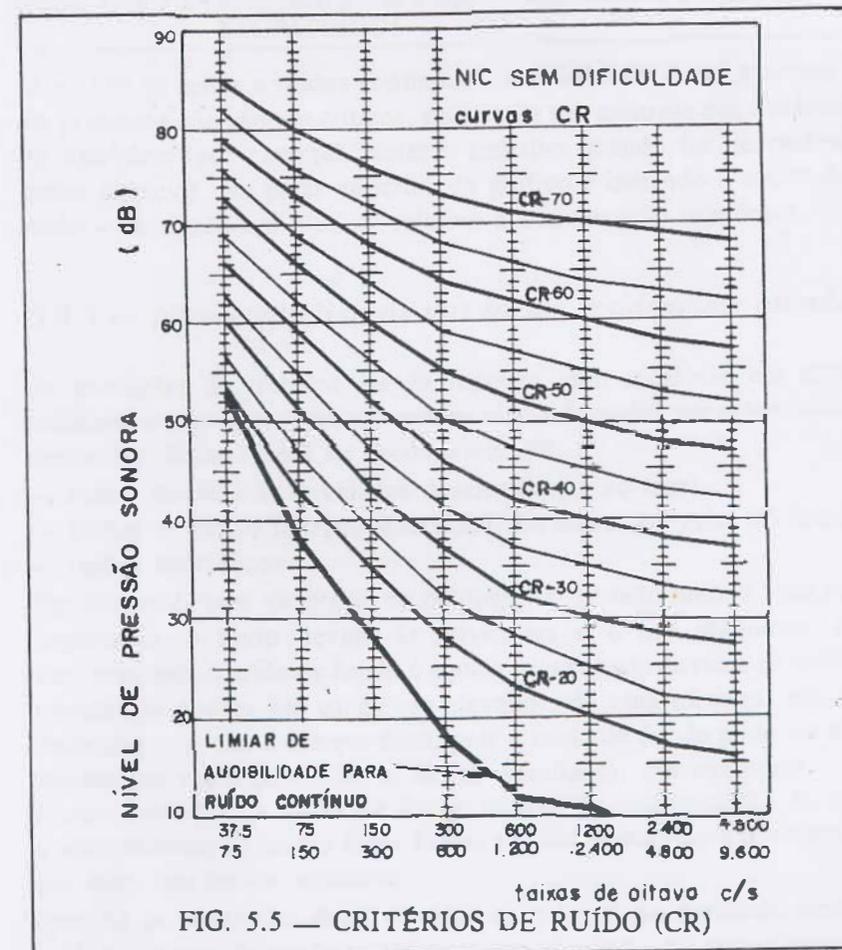
Designa-se por *Nível de Interferência na Conversação, NIC (Speech Interference Level, SIL)* a média aritmética dos níveis sonoros de intensidade do estímulo perturbador nas três faixas indicadas. O NIC, determinado no interior de um recinto, pode ser utilizado como índice para avaliar a possibilidade de se estabelecer comunicação verbal, de se utilizar o telefone e, ainda, como elemento para determinar qual a redu-

TABELA 5.3 — Valores de NIC				
distância m	NÍVEL DE CONVERSAÇÃO			
	normal	elevado	muito elevado	extrem. elevado
0.15	71	77	83	89
0.30	65	71	77	83
0.60	59	65	71	77
0.90	55	61	67	73
1.20	53	59	65	71
1.50	51	57	63	69
1.80	49	55	61	67
3.60	43	49	55	61
7.20	37	43	49	55

ção do nível que se torna necessária, objetivando tornar possível uma determinada inteligibilidade nas comunicações.

A tabela 5.3 dá os valores limites superiores do NIC, em dB/oitava, dentre os quais é possível estabelecer comunicação verbal.

Beranek desenvolveu um critério de avaliação da possibilidade de se estabelecer comunicação verbal, através da definição de um índice CR (critério de ruído) (fig. 5.5) ou de um CRA (critério de ruído alternativo para um NIC com certa dificuldade) (fig. 5.6). O número de cada curva CR corresponde ao seu valor de NIC.



essencialmente ligado ao nível de ruído devido a estas atividades. A escolha do local, das máquinas, etc. deve então ser tal, que o nível de ruído não ultrapasse certos limites.

No caso dos ruídos produzidos no local serem fracos ou inexistentes (ateliê de desenho, quarto de dormir, etc.) o conforto acústico está essencialmente ligado ao nível de ruído de fundo e aos ruídos específicos.

5.4.3.1 — Limites superiores do nível de ruído de fundo ou do ruído ambiente

Os valores referem-se a ruídos intrusos vindos do exterior, de caráter contínuo e ininteligíveis (trânsito, ventilação). O valor CR especificado não deve ser excedido em nenhuma faixa.

As curvas alternativas CRA devem ser consideradas como uma solução de máximo compromisso. Com este critério, a presença de sons graves de alto nível provocará desajustes nervosos.

Tabela 5.4 — Limites superiores do nível de ruído de fundo ou do ruído ambiente

LOCAL	CR	dB(A)
-Salas para concertos	CR 20	25
-Estúdios de rádio	CR 20	25
-Teatros de ópera	CR 20	25
-Teatros com mais de 500 pessoas	CR 20	25
-Teatros com menos de 500 pessoas	CR 25	30
-Salas de música (escolas, etc.)	CR 25	30
-Salas de aulas e conferências (50 pessoas)	CR 25	30
-Estúdios de televisão	CR 25	30
-Salas de assembleia (com amplificação)	CR 25-30	35
-Habitação e hotéis (área de dormir)	CR 25-30	35
-Cinemas	CR 30	35
-Igrejas	CR 30	35
-Salas de aulas e conferências (20 pessoas)	CR 30	35
-Hospitais	CR 30	35
-Bibliotecas	CR 30	40
-Restaurantes	CR 45	50
-Ateliê, ginásios (com amplificação)	CR 50	55

5.4.3.2 — Limites superiores do nível de ruídos particulares

Para os ruídos particulares, é praticamente impossível dar limites numéricos, pois basta um certo ruído ser apenas percebido no meio do ruído de fundo para que ele seja intolerável, ao passo que um outro ruído de várias dezenas de decibels maior que o ruído de fundo poderá não causar incômodo. É provável que, quanto mais um ruído particular for duradouro, ou se repetir muitas vezes, mais sua emergência deverá ser pequena, em relação ao ruído de fundo, para que ele produza efeitos incômodos equivalentes.

Assim, num quarto de dormir pode-se admitir que o nível de ruído suba a 60 ou 65 dB (A) durante a passagem de um avião, caso não houver mais que uma ou duas passagens durante a noite, enquanto que não se poderá admitir que o nível de ruído devido a uma bomba de circulação do aquecimento ultrapasse a 30 dB (A), se o ruído durar toda a noite.

Se o ruído específico for constituído de música ou palavra, só será aceitável numa habitação quando toda informação contida na origem desaparecer. Vimos que, no caso da palavra, isto se traduz por uma faixa de inteligibilidade nula.

No caso da música, não existe critério particular de inteligibilidade. Assinalamos que a informação contida na música é bastante persistente: a percepção de algumas frequências é suficiente para reconstituir uma melodia conhecida.

5.5 — Operações

5.5.1. Verificar que o ruído produzido por uma máquina com o seguinte espectro tem um nível corrigido de aproximadamente 90 dB(A).

f (c/s)	65	125	250	500	1k	2k	4k	8k
NSI (dB)	95	105	96	81	80	82	76	68

5.5.2. Determinar em que faixas de frequências deve ser tratado o ruído produzido pela mesma máquina, para se ajustar aos critérios de Burns e de Beranek, para locais industriais (aplicando fig. 5.4).

5.5.3. Verificar que, se não forem tomadas medidas de isolamento, uma conversação perto da máquina só poderá ser mantida falando-se muito forte e a não mais de 0,5 m do interlocutor.

5.5.4. Verificar que, se se aplicar à máquina um sistema isolante com o seguinte espectro de enfraquecimento:

f (c/s)	65	125	250	500	1k	2k	4k	8k
enfraquecimento (dB)	12	17	20	22	23	28	33	38

já será possível conversar em voz normal à distância de 1,8 m e que o ruído corresponderá a um critério de ruído CRA 70.

5.5.5. O ruído numa fábrica chega aos seguintes níveis:

f (c/s)	65	125	250	500	1 k	2 k	4 k	8 k
ruído (dB)	90	92	92	90	84	78	71	60

No escritório, contíguo a essa fábrica, é necessário poder manter uma conversa à distância não maior que 0,60 m, em nível normal. Nesse caso, será tolerável um máximo de 59 dB NIC (tabela 5.3)

Admitindo uma certa dificuldade na comunicação, podemos aplicar as curvas CRA (fig. 5.6). A curva CRA-59 dá os seguintes valores:

nível admissível (dB)	90	80	71	65	62	59	57	56
-----------------------	----	----	----	----	----	----	----	----

A diferença entre o ruído e o nível admissível dá o isolamento necessário em cada faixa de frequências:

isolamento necessário (dB)	0	12	21	25	22	19	14	4
----------------------------	---	----	----	----	----	----	----	---

Deverá ser agora procurado um fechamento que forneça como mínimo tal isolamento. No caso, qualquer material sólido e homogêneo, de uns 15 kg/m², resolve. Não importa que o isolamento seja exagerado nos agudos; um isolamento sob medida é praticamente impossível de se achar (fig. 5.9).

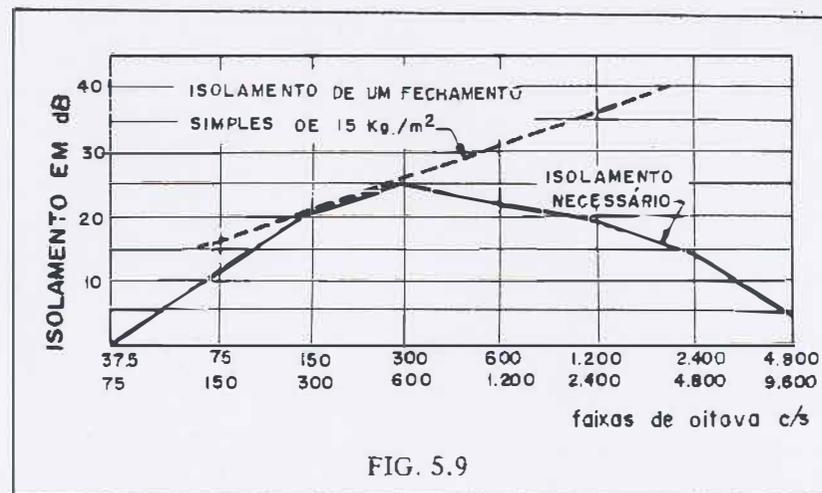


FIG. 5.9

El aislamiento acústico de un edificio se consigue mediante la aplicación de materiales que impidan la transmisión del sonido desde un espacio a otro. Este aislamiento puede ser de tipo estructural, cuando se trata de muros, techos y suelos, o de tipo ambiental, cuando se trata de estancias cerradas. El aislamiento estructural se consigue mediante la aplicación de materiales que impidan la transmisión del sonido desde un espacio a otro. Este aislamiento puede ser de tipo estructural, cuando se trata de muros, techos y suelos, o de tipo ambiental, cuando se trata de estancias cerradas. El aislamiento ambiental se consigue mediante la aplicación de materiales que impidan la transmisión del sonido desde un espacio a otro. Este aislamiento puede ser de tipo estructural, cuando se trata de muros, techos y suelos, o de tipo ambiental, cuando se trata de estancias cerradas.

6 — Isolamento sonoro — Aspectos técnicos

El aislamiento acústico de un edificio se consigue mediante la aplicación de materiales que impidan la transmisión del sonido desde un espacio a otro. Este aislamiento puede ser de tipo estructural, cuando se trata de muros, techos y suelos, o de tipo ambiental, cuando se trata de estancias cerradas. El aislamiento ambiental se consigue mediante la aplicación de materiales que impidan la transmisión del sonido desde un espacio a otro. Este aislamiento puede ser de tipo estructural, cuando se trata de muros, techos y suelos, o de tipo ambiental, cuando se trata de estancias cerradas.

6.1 — Princípios do isolamento sonoro

Nesta seção ampliaremos os conhecimentos que foram levantados no item 3.4, no terceiro capítulo.

Em primeiro lugar lembraremos que uma absorção extra, no local do ruído, reduzirá a intensidade do som reverberante, ajudando assim o isolamento; porém, é bom dizer, desde o início, que tal redução é geralmente muito pequena em relação à redução obtida por isolamento. Quer dizer: absorção extra não é substitutivo de adequado isolamento. Assim, por exemplo, se o local tiver originalmente paredes altamente refletoras — uma oficina —, um forro acústico poderá reduzir o som no interior em até 10 dB, mas isso deve ser comparado com os 50 dB que isola uma parede de tijolo maciço. Esse 10 dB são, porém, importantes, em combinação com o sistema isolante, pois para elevar em 10 dB o isolamento, seria necessário quadruplicar o peso do fechamento. Se, pelo contrário, o local já tiver uma quantidade razoável de absorção — por exemplo, uma sala mobiliada —, um forro acústico diminuiria o nível interior ao máximo em 3 dB.

Dois tipos de isolamento devem ser considerados separadamente: isolamento contra ruído aéreo e isolamento contra ruído de impacto. O primeiro se refere a ruídos que se originam no ar: por exemplo, rádios, etc.; o segundo se refere a impactos: passos, batidas nos fechamentos, etc.

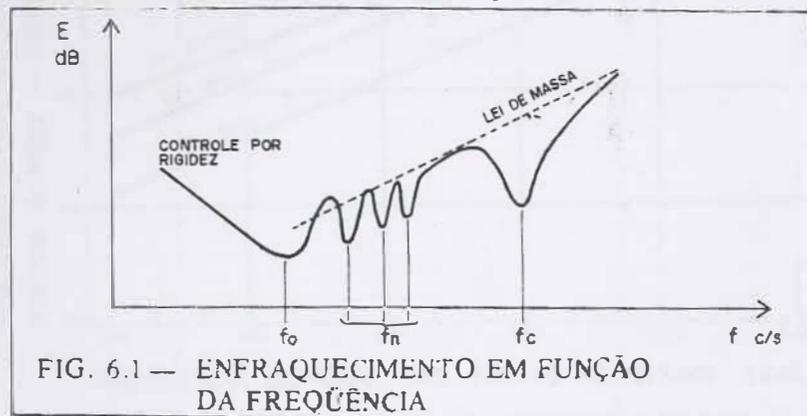
6.1.1 — Isolamento contra ruído aéreo

As ondas sonoras que incidem num fechamento produzem uma vibração no mesmo — obviamente em quantidade muito pequena, impossível de ver, ou, geralmente, de sentir — e este, vibrando, irradia energia para o outro lado.

A quantidade de isolamento que o fechamento produz depende da frequência do som incidente e das características construtivas da

parede. A lei de massa (já enunciada no item 3.4) indica que o isolamento aumenta em aproximadamente 6 dB para cada duplicação de massa. Este aumento deve ser observado juntamente com o aumento do isolamento, em função da frequência, também de aproximadamente 6 dB por oitava.

Lamentavelmente, essa simples lei de massa não se aplica para qualquer frequência, sendo que o fechamento, considerado como uma membrana vibrante, sofre certas deformações na sua forma de vibrar.



Assim, existirão algumas frequências de ressonância da membrana, para as quais esta tenderá a vibrar fortemente (ou não, segundo o seu amortecimento). A experiência mostra que, para frequências baixas, inferiores às de ressonância, o isolamento não segue a lei de massa e depende das características de rigidez do fechamento. Para as frequências superiores às de ressonância (a partir do dobro da 1ª frequência de ressonância), o isolamento é controlado pela lei de massa até uma certa frequência, onde se produz uma nova diminuição do isolamento. Isto é devido à coincidência da frequência do som incidente com a frequência de uma vibração parasita, natural do fechamento, que se produz na direção de sua superfície por ondas de som que nela incidem obliquamente. Depois dessa tal frequência de coincidência ou frequência crítica, a rigidez do fechamento adquire importância por um certo período, depois do qual novamente o isolamento será controlado pela lei de massa. O comportamento do fechamento pode ser então separado em três regiões, com características próprias. Estudos feitos por Beranek determinaram valores aproximados para os diferentes materiais.

A lei de massa indica que, se for preciso um grande isolamento, será necessário aumentar consideravelmente o peso do fechamento. Obviamente, isto tem limites, fazendo-se necessário procurar outros sistemas. O mais usual é a chamada parede dupla. O isolamento produzido por estas é entre 5 e 10 dB superior ao produzido por uma parede simples do mesmo peso.

Um aspecto importante, que muitas vezes se esquece, é que o isolamento de um sistema construtivo se define pelo seu lado mais fraco. Vários pontos podem ser levantados: 1) não adiantará separar com uma parede muito isolante duas salas contíguas, se o ruído puder se transmitir por outros caminhos (pela estrutura, por exemplo, ou saindo e entrando por janelas abertas); 2) materiais com muitos poros (concreto celular, tijolos vazados) transmitem muito mais do que um material maciço, do mesmo peso; 3) uma porta ou uma janela com diferente índice de enfraquecimento do resto da parede abaxam sensivelmente o isolamento global (item 3.5.2, na unidade 3); 4) forros falsos, leves, apoiados em paredes que não continuam até o teto ocasionam canais apropriados para a condução dos ruídos indesejados.

6.1.2 — Isolamento contra ruído de impacto

O caso mais importante é o impacto no piso — por exemplo, passos. A sonoridade que tais impactos ocasionam no local contíguo dependerá da construção do piso e, especialmente, de sua superfície. O melhor é agir diretamente nessa superfície; usar superfícies macias que possam absorver o impacto: tapetes, placas de borracha ou cortiça. Como tais acabamentos não são sempre possíveis ou suficientes, às vezes é necessário tratar a própria construção do piso. No caso, a teoria indica uma separação estrita e hermética entre as superfícies do piso e do teto imediatamente inferior, seja através de estruturas independentes ou, o que é mais comum, com o chamado piso flutuante. Este consiste em uma laje de concreto (ou um piso de tábuas de madeira) apoiada numa capa de material flexível — lã de vidro, isopor, borracha, etc. — que por sua vez se apóia na laje estrutural. O importante é que em nenhum ponto se estabeleça uma comunicação direta entre o piso e o forro inferior; inclusive na junção com a parede, o piso estará separado desta pelo material flexível por baixo do rodapé.

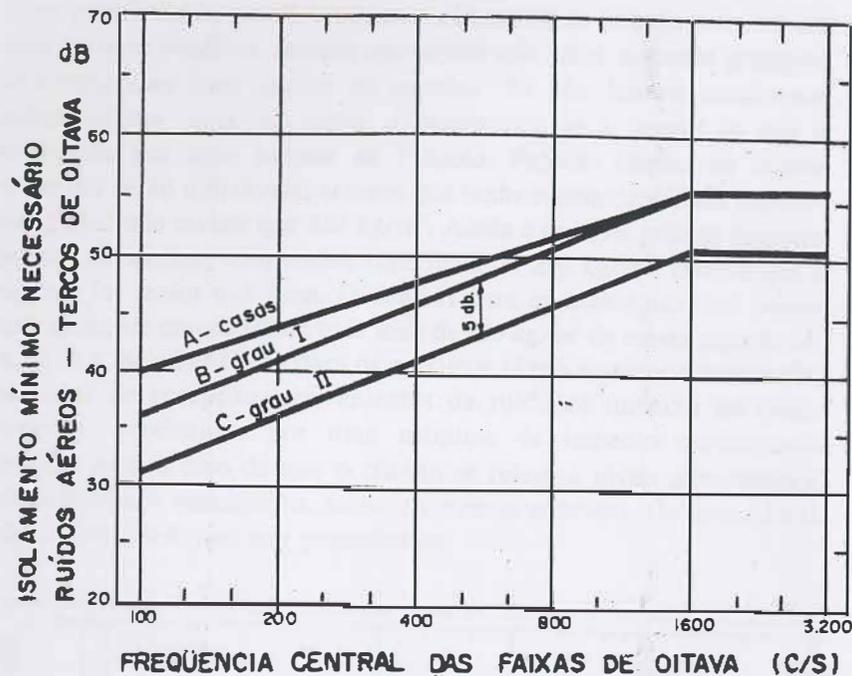


FIG. 6.2 — ISOLAMENTO PARA RUÍDOS AÉREOS

6.2 — Critérios de isolamento entre habitações

À falta de um trabalho nacional mais desenvolvido sobre utilização com isolantes dos materiais de construção, referir-nos-emos às pesquisas desenvolvidas pelo Building Research Station da Grã-Bretanha. Na fig. 6.2, as curvas indicam valores mínimos de isolamento, corrigidos para um tempo de reverberação de 0,5 s no local receptor. Os desvios médios destes valores, em terços de oitava para todo o espectro, não devem ultrapassar 1 dB.

A curva A é para paredes de separação entre casas geminadas. As curvas B e C determinam isolamentos para fechamentos internos, em dois graus de conforto:

Grau I (curva B), o ruído intruso terá importância secundária;

Grau II (curva C), o ruído intruso será importante, mas não perturbará seriamente à maioria dos usuários.

Estes critérios supõem todas as janelas fechadas. No caso de uma ou mais ficarem abertas, obviamente o isolamento será menor que o especificado. Todavia, os estudos estatísticos confirmam que os ruídos que vêm através de paredes ou de pisos produzem maior incomodidade do que aqueles que entram pelas janelas abertas.

Na tabela 6.1 se detalham alguns materiais típicos, que respondem aproximadamente aos critérios que estamos considerando. Assim, para a curva A, podem ser usados os itens de número 1, 2, 3, e 4; para a curva B, além dos anteriores, o nº 8; e para a curva C, ainda os nºs. 6, 7 e 9.

No caso das casas estarem separadas, o isolamento dependerá do projeto e da distância que as separam. Como indicação aproximada, pode-se dizer que, para duas casas separadas por poucos metros, com

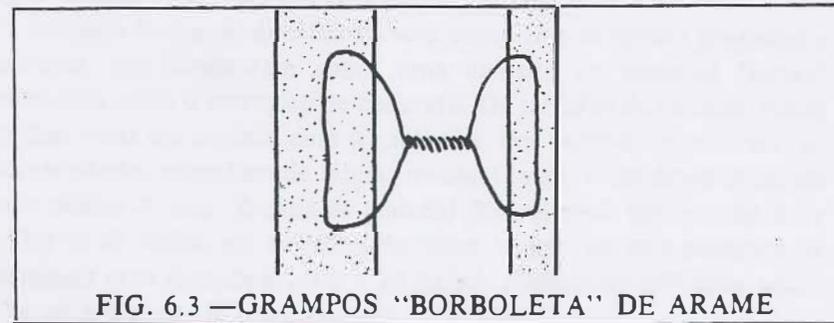


FIG. 6.3 — GRAMPOS "BORBOLETA" DE ARAME

janelas que não se enfrentem diretamente e fechadas, o isolamento será da ordem de 60 a 70 dB. Isto é muito mais do que se pode obter quando as casas são geminadas.

Em construções onde os vedos não sejam de alvenaria (por exemplo, placas pré-fabricadas), as juntas devem ser herméticas e rígidas, seladas com argamassa.

Uma parede de separação pode ser feita com outros materiais além dos listados na tabela e servirá no Grau I para apartamentos se, no caso, sua massa superficial for pelo menos de 450 kg/m² e não deixando frestas de ar. Sendo o material poroso (o que se aplica também para concreto de agregado graúdo e celular), é essencial que as fendas de ar do material estejam seladas, o que se obtém rebocando cuidadosamente a parede.

Uma parede dupla de 1/2 tijolo com câmara de ar de pelo menos 5 cm será também possível, sempre que sejam utilizados somente grampos borboleta para ligar ambas as paredes. Se não fossem totalmente independentes uma da outra, o isolamento seria menor do que o produzido por uma parede de 1 tijolo. Paredes duplas de outros materiais serão utilizáveis, sempre que tenham uma densidade superficial global não menor que 450 kg/m^2 . Ainda é possível utilizar concreto poroso ou similar, com massa superficial de 250 kg/m^2 , sempre que a câmara for maior que 7 cm. O Grau II para apartamentos será obtido com qualquer parede sólida com mais de 250 kg/m^2 de massa superficial. A fig. 6.4 indica critérios para os máximos níveis sonoros admissíveis, no local de recepção, provenientes de ruído de impacto no andar superior, produzidos por uma máquina de impacto normalizada (atentar para o fato de que o critério se refere a níveis admissíveis e não a isolantes necessários, como no critério anterior). Os Graus I e II são correspondentes aos precedentes.

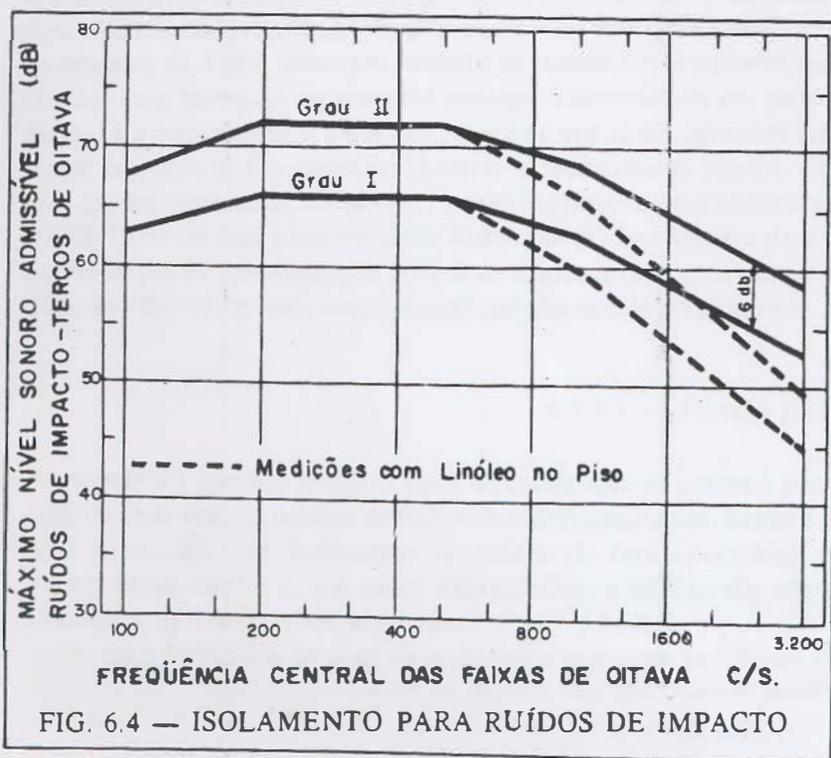


FIG. 6.4 — ISOLAMENTO PARA RUÍDOS DE IMPACTO

Da tabela 6.1, extraem-se os seguintes entrepisos que respondem a este critério:

Grau I: itens 31,32,33, e 34 com acabamento macio; 35.

Grau II: além dos anteriores, os itens 36 com acabamentos macio ou médio; 37;38;39;40 e 41.

6.3 — Detalhes construtivos

Detalharemos alguns dos procedimentos listados acima:

Por entrepiso de concreto se entende uma laje de concreto reforçado, ou composta de blocos de concreto vazado, ou ainda painéis pré-moldados de concreto vazado, com massa superficial não inferior a 200 kg/m^2 e com espessura de pelo menos 10 cm.

O assoalho flutuante de madeira será composto de tábuas pregadas a sarrafos que descansam sobre uma camada de material flexível estendida sobre o entrepiso de concreto. Os sarrafos de nenhum modo podem estar em contato com o entrepiso. Por motivos estruturais, se forem usados assoalhos de tábuas macho-fêmea, estes deverão ser de pelo menos 20 mm. A capa de material flexível pode ser feita de lã de vidro ou de rocha, em colchões de fibras longas, de uma polegada de espessura com densidade de 5 a 10 kg/m^2 . Podem ser utilizadas ainda chapas de isopor (20 mm), ou cortiça (10 mm).

Uma laje flutuante de concreto deve ter pelo menos 40 mm de espessura e apoiar-se sobre uma capa de material flexível, que inclusive contornará os bordos da laje, a fim de preservar o isolamento do sistema estrutural. Uma boa mistura para o concreto é 1:2:4, cimento, areia, brita, sendo esta de não mais de 1 cm de diâmetro. As lajes flutuantes de concreto não podem ser utilizadas em locais de mais de 15 m^2 , ou de comprimento de mais de 5 m, devido às possíveis deformações na secagem do material.

Obviamente não poderão ser construídas paredes apoiadas nas lajes flutuantes, pois, sobrecarregando estas, apertar-se-ia demais o material flexível, perdendo-se as suas propriedades isolantes.

O forro suspenso pode aumentar consideravelmente o isolamento de um piso com respeito aos ruídos aéreos, porém, geralmente, não acrescenta isolamento aos ruídos de impacto. Todavia, deverá cumprir

certas condições: ter mais do que 25 kg/m², não ser exageradamente rígido, ser totalmente hermético com respeito ao ar e os elementos de suspensão devem ser tão poucos e flexíveis quanto possível. Os entrespos de madeira indicados deverão ser feitos de sarrafos de madeira dura, ou metal, e levarão um assoalho de tábuas macho-fêmea, se não houver outra indicação.

6.3.1 — Fechamentos móveis

Muitas das teorias de arquitetura contemporânea exigem a construção de grandes espaços com separações móveis para criarem diferentes sub-espacos.

Desde o ponto de vista acústico, nunca será possível obter bom resultado no isolamento com painéis móveis, pois eles deverão ser leves para serem transportáveis e ainda será muito difícil obter um bom selamento das juntas.

Um isolamento análogo ao correspondente a uma porta — uns 20 dB — será obtido com um sistema de painéis de duas folhas de compensado de madeira de 3 mm sobre um bastidor de madeira com as juntas bem seladas com borracha ou material análogo. Aumentando um pouco a massa, é possível chegar a um isolamento de uns 25 dB, mas para obter maior isolamento é necessário recorrer a fechamentos duplos. Com dois destes, separados uns 20 cm, é possível chegar a um isolamento de 40 dB. Também será possível obter 40 dB com um fechamento simples, porém de maior tamanho, que poderá ser içado ou deslizado a um lado. Para isso deverá ter uma massa superficial não menor a 120 kg/m².

6.3.1.1 — Portas e janelas

Na tabela 6.1 aparecem alguns tipos de construção de portas e janelas com os seus valores médios de índice de enfraquecimento. Sempre que seja necessário um isolamento considerável, será necessário usar fechamentos duplos e, em casos excepcionais, a bibliografia oferece exemplos de construções especiais.

A tabela 6.2 dá idéia do grau de isolamento que pode ser obtido num fechamento composto, com base na relação de superfícies de janelas e paredes.

TABELA 6.2 — ISOLAMENTOS MÁXIMOS EM FECHAMENTOS COM JANELAS

TIPO DE JANELA	Percentual de área: janela fechada/parede (%)						
	100	75	50	33,3	25	10	desprezível
Simple (E - 20dB)	20	21	23	25	26	30	50
Dupla (E - 40 dB)	40	41	43	44	45	47	50

O vidro considerado foi de 3 mm e a janela dupla com uma câmara de ar de 5 cm. No caso de se aumentar essa câmara até uns 30 cm, o isolamento, já a partir dos 100% de janela, poderá ser de 50 dB.

A tabela 6.3 indica aproximadamente a variação de enfraquecimento de um fechamento composto, com uma relação superficial fixa de porta/parede de 7%. A variável será o índice *E* da parede, e o resultado é o índice global de enfraquecimento do fechamento.

TABELA 6.3 — ISOLAMENTO GLOBAL EM FECHAMENTO COM PORTAS

TIPO DE PORTA	ISOLAMENTO DO FECHAMENTO (dB)					
	25	30	35	40	45	50
leve - junta simples	23	25	27	27	27	27
leve - junta selada	24	28	30	32	32	32
pesada - junta selada	25	29	33	35	37	37

TABELA 6.1 — Isolamento médio em transmissão aérea. (Parkin)

Esta tabela indica os valores médios do isolamento, na faixa de 100 a 3200 c/s, de materiais ou sistemas usuais de construção: entrespos, paredes, janelas e portas. Supõe-se que não existam nem vazios nem frestas nestas construções, exceto quando especificamente mencionados.

Estes valores numéricos só podem ser levados em consideração como guia, pois a efetividade do isolamento depende de sua variação com a frequência e ainda porque as diferenças nas construções afetam esses valores.

Deve ser ainda lembrado que o isolamento obtido na prática depende não só do isolamento da vedação em particular, mas também de sua área em relação à absorção nos locais e da transmissão indireta. Nenhuma previsão específica pode ser feita para a transmissão indireta, exceto dizer que será desprezível para vedações que isolem menos que 40 dB. Nas tabelas seguintes, os valores acima dos 40 dB

permitted que a transmissão indireta não esteja presente, quando as estruturas forem usadas de modo mais ou menos tradicional. Com relação a sua área, os valores dados têm sido escolhidos para representar tão aproximado quanto o possível o isolamento obtido entre duas salas normalmente mobiliadas de dimensões médias, quando toda a área da parede ou do piso é da construção específica. As considerações que precedem levaram à adoção dos degraus de 5 dB na apresentação dos valores. Continuar com divisões mais finas poderia levar a uma idéia errada da aproximação esperada. Estimativas para outros sólidos, paredes seladas, construções de pisos que não aparecem nestas tabelas, podem ser feitas a partir da curva da "lei de massa".

Paredes

Cerca de 55 dB

- 1) 45 cm de tijolo maciço ou pedra

Cerca de 50 dB

- 2) 23 cm de tijolo maciço (ou 30 cm de tijolo vazado) rebocado.
- 3) 18 cm de concreto agregado miúdo ($d = 2,5 \text{ t/m}^3$) rebocado.
- 4) 30 cm de concreto com agregado graúdo ($d = 1,6 \text{ t/m}^3$) rebocado.
- 5) Duas placas de concreto celular de 8 cm, rebocado, com câmara de ar não menor de 8 cm, com grampos "borboleta" ou sem grampo algum.

Cerca de 45 dB

- 6) 12 cm de tijolo maciço, rebocado.
- 7) 10 cm de concreto com agregado miúdo.
- 8) 20 cm de concreto com agregado graúdo, rebocado.
- 9) Duas placas de concreto celular de 5 cm, rebocado com câmara de ar não inferior a 3 cm, grampos borboleta.

Cerca de 40 dB

- 10) 8 cm de concreto celular, rebocado dos dois lados.
- 11) 5 cm de concreto com agregado miúdo.

Cerca de 35 dB

- 12) 5 cm de concreto celular, rebocado dos dois lados.
- 13) 6 cm de tijolo vazado, rebocado dos dois lados.
- 14) Estuque (3 camadas) aos dois lados de sarrafos de 10 cm.

Cerca de 30 dB

- 15) Pannel de duas placas de compensado de madeira ou fibra prensada, de 6 mm, sobre sarrafos de 6 cm, com 5 cm de lã de vidro nas cavidades.

- 16) Estucado de gesso sobre malha, 1 cm, dos dois lados dos sarrafos de 10 cm.

Cerca de 25 dB

- 17) Estucado de gesso sobre malha, 1 cm, sobre sarrafos.

Cerca de 20 dB

- 18) Placa de polpa de madeira aglomerada de 1/2", dos dois lados de um marco de madeira.

Janelas e portas

Cerca de 45 dB

- 19) Duas portas de 5 cm de madeira maciça, com todas as frestas adequadamente seladas, criando uma câmara de ar entre elas.
- 20) Janela dupla de vidros de 3 mm, separados de 20 cm, bem seladas, com absorvente no bastidor interior entre os vidros. Melhor isolamento nos graves se obtém usando placas de vidro de 6 mm.

Cerca de 35 dB

- 21) O mesmo que 20, vidros separados por 10 cm.
- 22) Janelas duplas móveis com vidros de 3 mm, com 20 cm de separação, em bastidores de madeira ou metal, fechadas, mas não seladas, com absorvente no marco interior entre os vidros.
- 23) Duas portas compostas (ocas. com compensado de madeira ou fibra prensada de 3 mm de cada lado) com frestas seladas e câmara de ar.

Cerca de 30 dB

- 24) Janela de placas de vidro de 6 mm, todas as bordas seladas.
- 25) Porta maciça de 5 cm, todas as bordas seladas.

Cerca de 25 dB

- 26) Janela de placas de vidro de 3 mm, todas as bordas seladas.
- 27) Porta maciça de 5 cm, com frestas normais nos cantos.

Cerca de 20 dB

- 28) Janela simples de vidro de 3 mm sobre bastidores de madeira ou metal, normalmente fechada, porém não selada.
- 29) Porta composta (idem 23) com frestas seladas.

Cerca de 15 dB

- 30) O mesmo que 29 com frestas normais nos cantos.

Nota: estes valores estimativos referem-se a isolamento de paredes entre habitações. Para o isolamento entre uma habitação e um ruído do ar livre, o isolamento geral deve ser reduzido em 5 dB.

Entrepisos

Cerca de 50 dB

- 31) Laje flutuante de concreto de 18 cm, rebocada no teto, com qualquer acabamento do piso.
- 32) Entrepiso de concreto, rebocado no teto, com piso flutuante de madeira ou de material afim.
- 33) Entrepiso de concreto, com forro pesado livremente suspenso e qualquer acabamento no piso.
- 34) Entrepiso de concreto, rebocado no teto com 5 cm de argamassa leve por cima.
- 35) Entrepiso de vigas de madeira, com assoalho flutuante, forro estucado e 5 cm (15 kg/m²) de argamassa de cal e areia diretamente sobre o forro, apoiada em paredes grossas.

Cerca de 45 dB

- 36) Entrepiso de concreto rebocado no teto com qualquer acabamento de piso.
- 37) Entrepiso de vigas de madeira, piso de tábuas macho-fêmea, com forro estucado e 5 cm de argamassa de cal e areia diretamente acima deste.
- 38) Entrepiso de viga de madeira, assoalho flutuante, forro estucado e 8 cm de lâ de rocha (ou similar) diretamente sobre o forro (paredes grossas).

Cerca de 40 dB

- 39) Entrepiso de vigas de madeira, piso de tábuas macho-fêmea, forro de gesso de 1 cm sobre malha e 8 cm de lâ de rocha (ou similar) diretamente sobre o forro.
- 40) Entrepiso de vigas de madeira, piso de tábuas macho-fêmea e forro estucado.
- 41) Entrepiso de vigas de madeira com assoalho flutuante e 1 cm de forro de gesso sobre malha.

Cerca de 35 dB

- 42) Entrepiso de vigas de madeira, assoalho de tábuas macho-fêmea e forro de gesso de 1 cm sobre malha.

Cerca de 30 dB

- 43) Entrepiso de vigas de madeira com assoalho de tábuas macho-fêmea e forro de gesso de 1 cm sobre malha, juntas preenchidas e coladas com papel.

Cerca de 25 dB

- 44) Entrepiso de vigas com assoalho simples e forro de gesso de 1 cm sobre malha, juntas preenchidas e coladas com papel.

Cerca de 20 dB

- 45) Entrepiso de vigas de madeira com assoalho de tábuas macho-fêmea sem forro.

Tabela de Isolamento de Impacto Relativo em Pavimentos

O isolamento contra impactos em pavimentos depende principalmente da natureza do acabamento do assoalho, e até certo ponto da rigidez da ligação entre o assoalho e o resto do pavimento. A mais importante melhora no isolamento de impactos é obtida com o uso de piso muito mole, com carpete grosso sobre feltro, mas há muitos casos nos quais esse acabamento é impraticável. Então devem ser empregadas as soluções de pisos duplos já mencionados, exemplificados nos pavimentos flutuantes.

A seguinte tabela dá uma classificação dos 15 diferentes tipos de pavimentos definidos na tabela anterior, com três diferentes graus de maciez no acabamento. Estes graus são:

- a) *acabamento macio*: tapete grosso com ou sem feltro; borracha ou linóleo com base de espuma de borracha; capa plástica ou linóleo sobre feltro de pêlo; capa pesada de linóleo sobre fibra de madeira de 12 mm; ladrilhos de cortiça (não menor que 1 cm).
- b) *acabamento médio*: tapete fino, ladrilhos de cortiça (espessura menor que 1 cm); linóleo grosso; tábuas de madeira, ladrilhos e capa plástica ou borracha.
- c) *acabamento duro*: marmorite, ladrilhos de concreto ou cerâmica, mármore ou pedra; asfalto; linóleo fino; tacos de madeira.

ACABAMENTO DO ASSOALHO			AVALIAÇÃO DO ISOLAMENTO DE IMPACTO
MACIO	MÉDIO	DURO	
31 a 41, inclusive	32-35		Muito bom
42 - 43 - 44	36 - 37 - 38	32	Bom
45	31 - 33 - 34 - 41		Pobre
	39-40-42-43-44-45	31-33-34-36	Muito pobre

7 — Projeto de isolamento acústico

O primeiro passo num projeto de isolamento acústico e controle de ruído é o planejamento. Isto quer dizer a série completa de operações preparatórias, desde a escolha do lugar, seguida pelo projeto do edifício, vizinhança e ruas, até a definição da posição em planta e alçado de uma tubulação.

É pena que o som não seja representado nos desenhos. Por exemplo, um pequeno retângulo com a indicação "gerador diesel" parece tão inocente que, aparentemente, não existe razão para não projetar um dormitório a poucos metros dele. Se, pelo contrário, a representação gráfica da máquina trouxesse automaticamente uma grande mancha preta, de uns 45 m ou mais de diâmetro, mostrando o ruído produzido por ela, talvez esse importante aspecto não fosse descuidado. Não é bastante insistir sobre a necessidade de realizar um estudo completo para evitar ter que projetar sistemas altamente isolantes quando a construção estiver já começada ou, ainda, pior, quando estiver acabada, tendo então que ser resolvidas como "remendos".

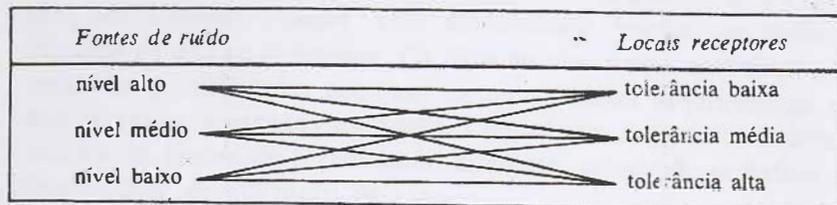
Parkin propõe as seguintes regras:

- a) Separar com a maior distância possível as fontes de ruído das áreas que precisem de silêncio.
- b) Planejar edifícios ou locais que não sejam particularmente suscetíveis ao ruído, para funcionarem como espaço intermediário entre fontes sonoras e áreas que precisem de silêncio.
- c) Situar as dependências que possam ser fontes de ruído em partes do edifício onde já existam outras fontes de ruído (inclusive exteriores). Inversamente, situar dependências que precisem de silêncio em partes tranquilas do edifício.
- d) Situar máquinas e fontes que transmitam seus ruídos através da estrutura, se possível, diretamente acima das fundações. A estrutura ali é geralmente mais pesada e por isso mais isolante. Ainda mais: as vibrações poderão ser absorvidas diretamente pela terra.
- e) Atenção para os pontos fracos: uma janela aberta, ou uma porta

leve, numa parede pesada e muito isolante, levará o isolamento global a níveis muito baixos, apesar das melhores intenções do construtor.

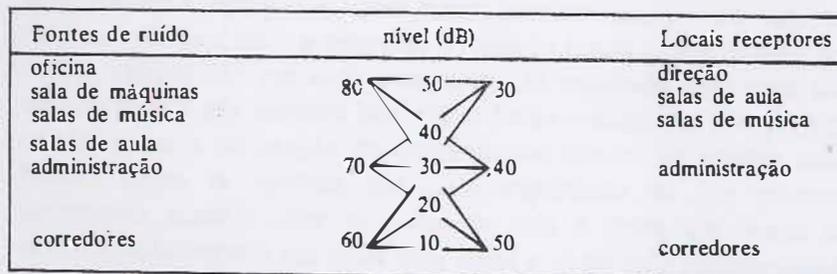
O processo de trabalho seria o seguinte:

1. Num projeto, classificar todas as dependências em ordem decrescente em relação ao nível sonoro que produzem ou possam produzir. Classificar também as dependências em ordem crescente com relação à sua tolerância ao ruído (em função dos critérios de ruídos).
2. Formar um nomograma com as duas classificações:



A relação em decibels entre dois pontos de diferentes colunas, no nomograma, definirá o isolamento requerido.

Por exemplo, a classificação de áreas numa escola pode ser:



3. Procurar-se-á separar ao máximo as áreas que produzem mais ruído daquelas mais necessitadas de silêncio, a fim de poupar: isolamento.
 4. Serão determinados (ou verificados) os fechamentos com respeito ao isolamento requerido.
 5. Portas e janelas, assim como casos especiais — dutos, sistemas de ar condicionado, máquinas, etc. —, serão estudados cuidadosamente, a fim de não se reduzir o isolamento.
- Pode-se acrescentar um axioma que se tornará evidente com a experiência: quanto maior o isolamento sonoro, mais cara a construção.

Definido o isolamento necessário entre dois ambientes, calcular-se-á o índice de enfraquecimento do(s) fechamento(s), a partir da equação já estudada na unidade 4, do índice de redução:

$$R = E + 10 \log (A/S) \quad (\text{dB})$$

R é o índice de redução entre os dois ambientes, determinado pela necessidade do projeto. E é o índice de enfraquecimento global do fechamento, tirado da tabela 6.1, ou calculado a partir da equação:

$$E = 10 \log (1/t) \quad (\text{dB})$$

S é a superfície do fechamento e A a absorção total no local receptor. No caso especial de moradias, pode-se aproximar este valor de A a partir da experiência que indica que numa sala mobiliada normalmente, independente do volume, o tempo de reverberação é de 0,5 s:

$$A = \frac{0,161 \times V}{0,5} \quad (\text{sabines})$$

7.2 — Casos particulares

7.2.1 — Moradia

Podem-se adotar os critérios britânicos, definidos no capítulo anterior nos graus I e II, que deverão ser usados em casos de diferente incidência externa. Assim, uma vila suburbana exigirá critérios mais estritos do que os usados, por exemplo, num prédio de apartamentos de uma rua movimentada, no qual os moradores, estando mais acostumados a um fundo de barulho contínuo, serão menos exigentes do que os moradores da vila. Parkin sugere os seguintes critérios para isolamento entre duas moradias:

local	local contíguo ou embaixo	grau de isolamento
sala ou dormitório	sala ou dormitório	I
cozinha banheiro copa	outros locais além de sala ou dormitório	II ou menos

No interior de uma moradia, isolamentos muito menores podem ser tolerados. Porém, tais isolamentos não deveriam ser inferiores a uns

30 dB. Qualquer entrepiso produzirá tal isolamento, mas no que se refere a fechamentos verticais, eles deverão ter pelo menos 25 kg/m².

7.2.2 — Escolas

Um exemplo de classificação de áreas e de seu zoneamento foi discutido no item 7.1 com respeito a ruídos aéreos. Com respeito a ruídos de impacto, todos os entrespisos deverão ter pelo menos um grau II de isolamento. Recentes estudos da acústica de escolas, desenvolvidos nos Estados Unidos, vêm modificando, porém, os critérios clássicos de que se utilizavam. Os ditos estudos foram realizados para testar as possibilidades acústicas de novas idéias arquitetônicas no que se refere a espaços escolares. Com efeito, hoje se considera a técnica do ensino de forma muito diferente, colocando-se ênfase na flexibilidade de utilização do espaço.

Usa-se construir grandes espaços nos quais se distribuirão sub-espaços, de acordo com as conveniências das suas diferentes utilizações.

Os estudos deram como resultado que, nas salas de aula de condições equivalentes e agrupadas, quer dizer, considerando à parte salas de música, oficinas, etc., geralmente o ruído de fundo é uma mistura dos ruídos produzidos em cada uma delas. O resultado para uma sala determinada é que nenhum dos ruídos ficam inteligíveis, não prejudicando assim a percepção da comunicação sonora na própria aula. Nestes casos se verifica que mais importante do que procurar isolamento sonoro entre as salas de aula é obter um tempo de reverberação correto em cada uma delas e obter uma inteligibilidade muito baixa dos ruídos de fora.

7.2.3 — Hospitais

Algumas recomendações gerais podem ser adicionadas às regras básicas acima estudadas. A cozinha principal deve ser separada ao máximo das enfermarias, se possível em construção à parte. Se isso não for possível, será situada por baixo daquelas.

A importância da redução do som na fonte não pode ser esquecida. Muitos dos ruídos resultam e são enfatizados pelas superfícies duras e higiênicas que tais edifícios requerem. Cada elemento do hospital deve ser estudado para determinar se um material mais absorvente não pode ser usado. Todas as portas devem ser equipadas com juntas amovíveis.

O isolamento das paredes entre as diferentes salas deve ser de pelo menos 40 dB, com exceção dos casos onde seja necessário um isolamento extra. Entrespisos entre enfermarias deverão ter um isolamento de 45 ou 50 dB.

7.2.4 — Teatros e Auditórios

O problema básico é reduzir todos os ruídos (exteriores e interiores) a níveis muito baixos no auditório. A quantidade de isolamento depende da intensidade das fontes.

Todo auditório grande, ao ser projetado numa área urbana, deve ter um setor de locais insensíveis ao ruído (dependências, por exemplo) entre o exterior e o auditório, ou então, um sistema de duas paredes de isolamento. A mesma idéia deverá ser utilizada no teto, se o nível médio de ruído externo for alto. Isto é especialmente importante em relação a ruídos de aviões, que podem prejudicar muito uma apresentação que esteja se realizando no auditório.

De forma geral, as janelas devem ser evitadas, pois uma construção apropriada para estas seria pouco prática, ou cara. Quando as janelas são indispensáveis, devem ser tão pequenas quanto possível, de um ou dois vidros (vide tabela 6.3).

As portas devem ser pesadas e, quando separam o auditório das áreas ruidosas ("foyer", vestibulos), devem poder ser hermeticamente fechadas, ou melhor, serem duplas com espaços intermediários.

Todos os espaços de circulação terão forros absorventes e todos os pisos que rodeiam o auditório terão acabamentos macios. Salas de ensaio, se usadas simultaneamente com o auditório, deverão situar-se o mais longe possível deste e, no caso em que sejam contíguas, deverá providenciar um isolamento de pelo menos 70 dB, o que só se pode obter a partir de uma construção especial.

7.2.5 — Estúdios de gravação, rádio e TV

Tratando-se de casos muito especiais, que precisem de estudos detalhados, recorrer-se-á à literatura especializada para a sua completa resolução. Aqui só indicaremos algumas bases gerais.

Um estúdio de gravações de rádio ou de televisão apresenta geralmente altos níveis de som junto a uma tolerância muito baixa de ruídos intrusos, tanto externos como produzidos no mesmo edifício. Por exemplo, um estúdio de música, contíguo a um de palavra, precisa de um altíssimo índice de redução (da ordem dos 75 dB, em média). O isolamento entre estúdio e cabine de controle não pode ser de menos de 45 dB, em média, inclusive nas janelas, que serão compostas de 2 ou 3 vidros e nas portas, que serão cuidadosamente projetadas.

7.2.6 — Escritórios

Em prédios de escritórios os principais problemas são os de proteção contra ruídos externos e de adequado isolamento entre as diversas salas.

local fonte	isolamento (dB)	características do local receptor	
		tipo de local	ruído de fundo
ruidoso médio tranquilo	45	tranquilo	tranquilo
	40	tranquilo	ruidoso
	30	médio	tranquilo
	20	médio	ruidoso
		ruidoso	

As regras básicas, em geral, devem ser seguidas, mas onde for preciso assegurar níveis especialmente baixos de som, como em salas de conferências ou salas de conselhos, serão necessárias janelas de vidros duplos ou de vidros simples selados para se obter um isolamento mínimo de 30 dB com respeito a ruas ruidosas. O nomograma acima sugere um guia para determinar o isolamento.

Para a sua utilização serão observadas as seguintes definições:

“Tranquilo”, como condição de ruído de fundo, será usado para áreas rurais, suburbanas, ou ainda urbanas, mas afastadas do tráfego ou quando forem utilizadas janelas de vidros duplos.

“Ruidoso” será considerado o caso onde os escritórios derem para ruas ruidosas. Um escritório tranquilo é aquele para executivos ou chefes administrativos, onde seja necessário um alto grau de privacidade. Um escritório médio é aquele com muitas máquinas de escrever ou equipado com ruidosas máquinas de escritório. Sempre deverá ser utilizado um forro absorvente, neste último caso.

Para obter 30 dB ou mais de isolamento, poderão ser utilizadas técnicas normais, porém pode-se chegar a um máximo de 30dB com um sistema de divisórias, bem projetado. Todavia, a maioria dos sistemas deste tipo oferece um isolamento de 5 dB abaixo do valor da lei de massa, provavelmente devido à falta de atenção no selamento das juntas (os fabricantes de tais vedações fazem geralmente exageradas promessas com respeito ao isolamento produzido pelo seu produto).

Se as divisórias deixarem um espaço aberto entre elas e o teto, não poderão ser seriamente consideradas como isolantes acústicos, pois o isolamento que elas proporcionarão será desprezível. Deve ser dada também especial atenção à possibilidade de existirem “curtos-circuitos” acústicos nos lados ou por cima das divisórias. Um exemplo muito usual é quando tais partições chegam até o forro suspenso e leve, onde o som passa tranquilamente sobre o teto e o forro.

Quando os escritórios se encontram em fábricas ou outros edifícios industriais, é necessário protegê-los do ruído. Um método de determinar o grau de isolamento requerido foi definido na unidade 6.

7.3 — Distâncias aproximadas para o uso de janelas

Entendendo-se que especialmente em países quentes o elemento mais fraco no isolamento de um edifício é a janela, parece conveniente definir um critério de uso deste e seu resultado em função das distâncias das fontes externas de ruído.

A tabela 7.1 dá uma idéia aproximada da distância, medida sobre a terra (ignorar-se-ão as distâncias oblíquas da rua à janela ou a andares superiores), que pode ser permitida entre ruas e locais usados para palavra. As condições supostas são:

- o local não tem janelas que abram para a rua;
- a rua tem tráfego intenso: quer dizer que muitos veículos circulam ao mesmo tempo;

- c) não existem obstáculos entre a rua e o local;
 d) em caso de janelas simples, estas serão de vidro de 3 mm, e fechadas sem deixar frestas;
 e) em caso de janelas duplas, estas serão de dois vidros de 3 mm, com câmara de ar estanque de 10 cm, e material absorvente na moldura;
 f) supõe-se que ninguém esteja no local perto das janelas (isto é especialmente importante para locais de reunião e teatros).

TABELA 7.1 — DISTÂNCIAS MÍNIMAS ENTRE LOCAIS E FONTES DE RUÍDOS EXTERNAS

Sala	Tipo de janela	Critério	Distância (m)
Sala de aula	aberta (7,5 m ²)	ideal aceitável	mais de 600 60
	simples (11 m ²)	ideal aceitável	45 8
	dupla (11 m ²)	ideal aceitável	sem restrições
Sala de reuniões ou teatro de 500 lugares	aberta (9 m ²)	aceitável	150
	simples (90 m ²)	aceitável	30
	dupla (90 m ²)	—	sem restrições
Sala de reuniões para 50 pessoas	aberta (2 m ²)	ideal aceitável	300 100
	simples (40 m ²)	ideal aceitável	60 15
	dupla (40 m ²)	ideal aceitável	15 sem restrições
Sala de reuniões para 20 pessoas	aberta (9 m ²)	ideal aceitável	230 100
	simples (14 m ²)	ideal aceitável	40 15
	duplas (14 m ²)	ideal aceitável	10 sem restrições
Pequeno escritório privado	aberta (3 m ²)	ideal aceitável	230 45
	simples (9 m ²)	ideal aceitável	15 5
	dupla (9 m ²)	ideal aceitável	sem restrições

Se a sala não tiver janelas dirigidas para a rua, mas se elas estiverem na parede lateral, as distâncias podem ser diminuídas à metade.

Para cada tipo de janela definem-se dois critérios: "ideal" indica que o som intruso torna-se desprezível; "aceitável" indica que a comunicação oral é possível, porém com certa dificuldade; qualquer distância menor produzirá considerável interferência no uso da sala.

Quando as distâncias são muito pequenas, deve ainda ser lembrado que existe a possibilidade de transmissão indireta pelo chão.

7.4 — Casos especiais

Finalmente, uma rápida visão de outros problemas que aparecem no momento em que se planeja um isolamento acústico.

As instalações mecânicas de ventilação costumam trazer problemas de ruído. Esses são de dois tipos; o primeiro é que o próprio ruído (e vibração) da instalação não vire um problema no prédio e, o outro, que a instalação não ocasione uma perda de isolamento entre as salas ou entre o prédio e o exterior (permitindo a comunicação direta através dos dutos). Num tal sistema, a principal fonte de ruído é o ventilador. O próprio motor dificilmente dará altas intensidades de som, se bem que possa causar ruído através da estrutura do prédio, pela vibração produzida por amortecimento fraco ou por desequilíbrio no rotor. Os tipos de motor conhecidos na indústria como "silenciosos" ou "super-silenciosos" foram especialmente tratados para reduzir tais defeitos, mas devemos lembrar que tais termos são simplesmente os de um catálogo e devem ser conferidos.

O ruído causado pela vibração pode ser muito insidioso, especialmente se o motor estiver instalado num entrepiso e não em contato com a terra. Ainda nesses casos, o ruído pode ser prevenido montando-se o motor sobre base especialmente desenhada.

Outro exemplo é quando banheiros interiores estão ventilados por dutos comuns. Estes permitirão que o ruído passe facilmente de um para outro banheiro, se não se tomar a precaução de usar um duto bastante longo entre os dois, recobrando-o de material absorvente (não menor que 3 m).

Quando se trata de auditoria, a primeira coisa que se deve fazer é definir o objetivo da auditoria. Isso pode ser feito de várias maneiras, dependendo do tipo de auditoria que se deseja realizar. Por exemplo, se se trata de uma auditoria financeira, o objetivo pode ser verificar a veracidade das informações financeiras da empresa. Se se trata de uma auditoria operacional, o objetivo pode ser verificar a eficiência das operações da empresa. Em qualquer caso, é importante definir claramente o objetivo da auditoria antes de começar a trabalhar.

8 — Projeto de auditorio — caso geral

Um projeto de auditorio é um documento que descreve o plano de trabalho para a realização de uma auditoria. Ele deve conter informações sobre o objetivo da auditoria, o escopo da auditoria, o cronograma da auditoria, o pessoal envolvido na auditoria, e os recursos necessários para a realização da auditoria. Um bom projeto de auditorio é essencial para o sucesso de uma auditoria, pois ajuda a garantir que todos os aspectos da auditoria sejam cobertos e que a auditoria seja realizada de maneira eficiente e eficaz.

O projeto de auditórios — já o dissemos no início do texto — é um dos mais complexos dentro da acústica arquitetônica. O projetista acústico de teatros, seja de palavra ou de música, conta com uma série de elementos de medida, de cálculo e de critérios para seu trabalho; porém o mais importante será procurar um equilíbrio entre esses instrumentos teóricos e o bom senso, tirado da experiência, o qual o ensinará a ponderar o efeito da variação de um ou outro parâmetro. Sem dúvida é muito ingrato o trabalho do projetista acústico: se o auditório resulta de boa qualidade e escuta-se bem nele, ninguém pensa mais em quem o calculou; se, pelo contrário, o auditório não funciona corretamente, as queixas se multiplicam. Porém, tem-se demonstrado que o julgamento público é, de certa forma, subjetivo, e pode mudar completamente depois de um período de condicionamento. O edifício da Filarmônica de Berlim, por exemplo, obra de Hans Scharoun e com o cálculo acústico de Lothar Cremer (o mesmo que fez o cálculo acústico original, ainda que não respeitado após, da Sala Villa-Lobos, do Teatro Nacional de Brasília), inaugurado em 1964, foi cuidadosamente pensado e testado, tomando como base um tempo de reverberação médio de 2 segundos. A primeira reação do público berlinês foi negativa, pois na sua memória auditiva tinha-se fixado como ideal um tempo muito maior (mais de 3 segundos), o da velha Sala da Filarmônica. Foi necessário um período de adaptação de alguns meses para o público aceitar a nova sala, cuidadosamente calculada, e que se considera hoje entre as de acústica mais equilibrada do mundo.

8.2 — Processo de trabalho

V. Knudsen propõe uma sistemática cronológica no estudo de auditórios:

- 1) Seleção do emplazamento no lugar mais tranquilo, consistentemente com outros requerimentos.
- 2) Levantamento do nível de ruído médio externo para determinar quanto isolamento deve ser dado ao edifício para se obterem as necessárias condições de silêncio.
- 3) Distribuição (acusticamente correta) das dependências no edifício.
- 4) Determinação das construções isolantes corretas.
- 5) Controle do ruído no edifício, incluindo tanto ruído aéreo como ruído de impacto.
- 6) Projeto de forma e tamanho de cada dependência, de modo a assegurar o melhor fluxo de som difuso para todos os auditores, para realçar as qualidades estéticas da palavra e da música.
- 7) Seleção e distribuição de materiais e construções absorventes e refletores que proporcionem as condições ótimas de ataque, queda e corpo do som em cada sala.
- 8) Supervisão da instalação dos materiais cuja absorção seja dependente da colocação.
- 9) Instalação de equipamento de amplificação, sob a supervisão de engenheiro competente, no caso que tal equipamento seja necessário.
- 10) Inspeção do edifício concluído, incluindo testes para determinar se o isolamento requerido, a absorção e outras propriedades acústicas foram satisfatoriamente cumpridas.
- 11) Instruções de manutenção, por escrito, para deixar com o gerente do auditório, indicando: (a) como devem ser limpos ou pintados os materiais acústicos; (b) quais móveis devem ser mantidos no edifício para conservar as condições acústicas; (c) como deve ser mantida a umidade em grandes auditórios, para evitar excessiva absorção do som em altas frequências; e (d) como deve ser mantido o sistema de amplificação.

8.3 — Isolamento contra ruídos

No capítulo anterior foram estudadas as condições de controle de ruído nos auditórios. Dever-se-á ter especial cuidado nos acessos, incorporando espaços intermediários, de modo que, ao entrar no auditório, seja necessário atravessá-los, fechando sucessivamente a comunicação com o hall e com o auditório.

Na estrutura se terão em conta as possíveis vibrações de tráfego ou do metrô. Igualmente se terão em conta os ruídos que costumam causar as instalações de ar condicionado.

8.4 — Problemas de forma

No momento de definir a forma de um auditório, deve-se em primeiro lugar ter em conta os possíveis defeitos, especialmente a existência de superfícies refletoras capazes de produzir ecos, seja no palco, ou nas primeiras filas da platéia. Isto geralmente acontece com as paredes posteriores do auditório, segundo os ângulos que formam com o som direto e com as características de absorção de seu revestimento. Deve-se lembrar ainda que todo par de paredes paralelas produzirá eco palpante, com maior intensidade, quanto maior for a quantidade de superfície enfrentada.

As superfícies côncavas produzem sempre focalizações. Por isso, e em princípio, é melhor evitá-las e, quando necessárias, devem ser tais que os raios refletidos não se cruzem ao nível dos ouvintes.

No estudo da forma não devem ser esquecidos os modos normais de ressonância, especialmente quando a forma é simples — cuidar das relações dimensionais —, lembrando que uma maior complexidade nas plantas sempre distribuirá melhor os modos de ressonância entre diferentes frequências.

O quociente $\frac{\text{som reverberado}}{\text{som direto}}$, chamado *coeficiente de vivacidade*,

define esta condição num auditório. O seu valor é maior quanto mais afastada está a fonte do ouvinte, o que acontece quando a sala é exageradamente comprida.

Para obter uma razoável homogeneidade na distribuição do som, é preciso criar possibilidades de difusão, com descontinuidades em paredes e teto — inclusive colunas ou placas penduradas — e na distribuição do material de revestimento absorvente. Porém, é conveniente, especialmente quando a sala é grande, apoiar a quantidade de som direto, aproveitando ao máximo a energia de emissão do som, colocando superfícies refletoras perto das fontes: como regra geral, os primeiros painéis do forro da platéia serão refletores e estarão dirigidos para refletir o som para os pontos mais afastados.

No estudo geométrico do auditório, desenhar-se-ão em planta e alçado os raios de som direto e as diferentes reflexões, modificando os ângulos dos elementos, até definir a melhor distribuição. Será ainda considerada a possibilidade de músicos ou atores se ouvirem, reservando uma certa quantidade de reflexão para o próprio palco.

8.5 — Cálculo da reverberação

O texto falado geralmente precisa um pouco menos de reverberação do que a música, a fim de ser melhor compreendido. Para medir a compreensão da palavra, foi idealizado um teste de inteligibilidade, na base de fonemas usados na língua. O teste dá uma idéia da compreensão de um texto — que não pode ser menor do que 75%, para assegurar uma boa inteligibilidade — ao tempo que permite observar a existência de pontos surdos no auditório. Para uma determinada função do auditório, define-se um tempo de reverberação ótimo em função do volume. Na fig. 4.2 os valores se referem ao t_{60} aos 500 c/s. Para obter os valores referentes a outras frequências, aplicar-se-á o fator de correção da fig. 8.1. Definidos nestes gráficos os tempos ótimos de reverberação, calculam-se os valores (ótimos) de absorção total a

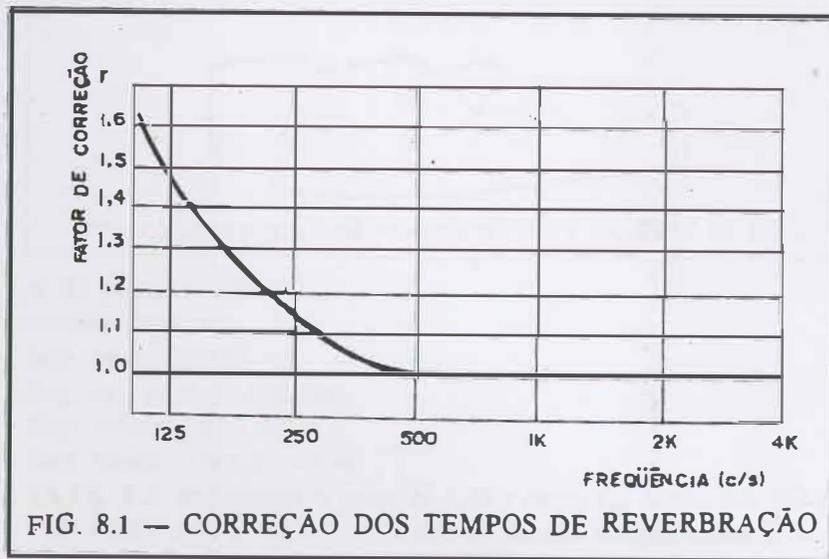


FIG. 8.1 — CORREÇÃO DOS TEMPOS DE REVERBRAÇÃO

partir da equação de Sabine (ou, no caso de se tratar de um coeficiente de absorção médio, maior que 0,5, a equação de Norris-Eyring). Com uma adequada escolha de materiais absorventes e refletores, tenta-se aproximar aos valores de absorção calculados. Para considerar a sala corretamente calculada, não se admitirá uma diferença maior do que 0,2s entre os tempos de reverberação da sala cheia de público e a sala vazia.

8.6 — Estudo em modelos

A fim de apurar o projeto acústico, especialmente no que se refere à forma e à distribuição do material especial, têm-se desenvolvido alguns métodos de estudo em modelos.

O modelo mais exato é o puramente acústico, no qual também o processo acústico será reduzido junto com o modelo geométrico: os comprimentos de onda usados serão correspondentes à escala usada, sendo que será preciso trabalhar com ultra-sons; os materiais de revestimento do modelo deverão comportar-se, com respeito ao ultra-som, de igual maneira que os materiais no protótipo se comportarão com respeito ao som real. O processo é bastante complexo e requer um instrumental muito preciso para a sua realização.

No outro extremo, existem modelos primitivos na base de bacias com a forma da planta ou do alçado do auditório cheias de água, na qual ondas, produzidas na superfície da água no lugar correspondente à fonte sonora, dão uma idéia da propagação das ondas sonoras. Como somente é possível trabalhar em superfícies planas, o método dá pouca informação sobre o total do espaço do auditório.

Um método intermediário, que tem demonstrado apresentar bons resultados, é baseado numa analogia entre raio sonoro e raio luminoso.

O modelo do auditório é pintado de preto fosco — absorvente de luz — nos lugares onde deve-se ter absorção de som no protótipo; de branco fosco — difusor de luz — ou de papel metálico — refletor de luz — nos lugares onde se supõe, respectivamente, difusão ou reflexão de som. Uma fonte luminosa pontual representará a fonte sonora e uma foto-resistência fará a parte de um ouvido artificial que, movimentando-se na platéia, determinará variações relativas de distribuição de luz (som).

permitindo uma rápida correção de forma ou de distribuição de material.

8.7 — Operações

Cálculo para definir os materiais de revestimento numa sala de concertos com as seguintes características:

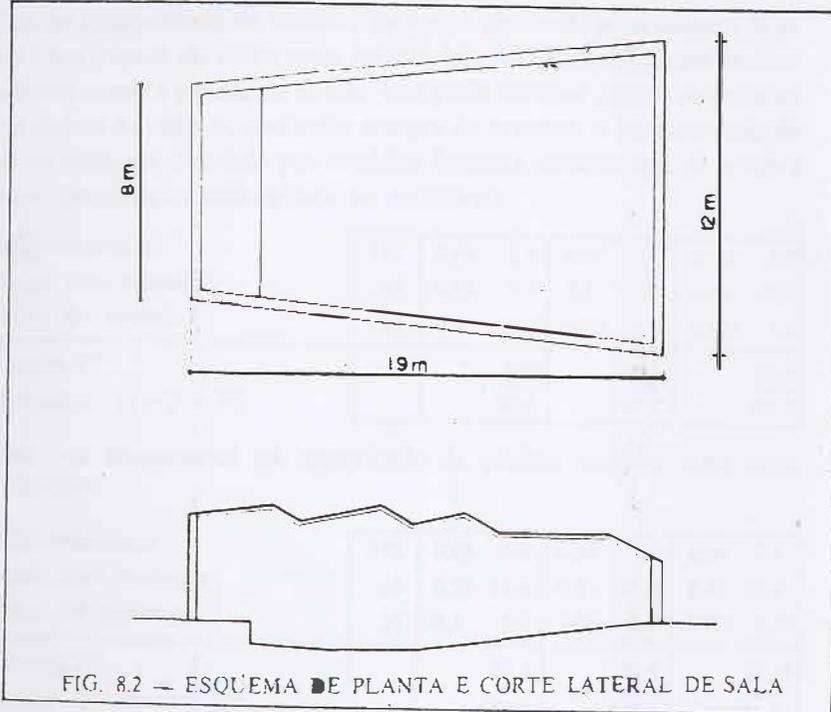


FIG. 8.2 — ESQUEMA DE PLANTA E CORTE LATERAL DE SALA

nº de pessoas: 180

volume: 1000 m³

Sup. base: 200 m²

Sup. lat.: 2x20x5 = 200 m²

Sup. frente: 8x5 = 40 m²

Sup. fundo: 12x3,5 = 42 m²

Da fig. 4.2, deduzimos o valor de 1,35 s como t_{60} ótimo aos 500 c/s.

Corrigindo com a fig. 8.1 obtemos os outros tempos ótimos.

Será feito o estudo em três frequências:

frequência	c/s	125	500	2000
tempo ótimo	s	2,03	1,35	1,35

Como o auditório não deve ser exageradamente absorvente, utilizar-se-á a equação de Sabine para obter as absorções globais ótimas em cada frequência:

$$A = \frac{0,161 \times V}{t_{60}} \quad (\text{sabines})$$

Absorção global ótima	sabines	79,5	119	119
-----------------------	---------	------	-----	-----

Para atingir tais valores, calcular-se-ão as absorções parciais produzidas por cada revestimento, tirados seus coeficientes de absorção da Tabela 4.1.

	125		500		2000	
m ²	a_i	$a_i \cdot S_i$	a_i	$a_i \cdot S_i$	a_i	$a_i \cdot S_i$
piso de tábuas de madeira sobre vigas.	160	0,15 24	0,10 16	0,06 9,6		
carpete de juta	40	0,02 0,8	0,04 1,6	0,16 6,4		
forro de estuque	165	0,04 6,6	0,06 9,9	0,04 6,6		
subtotal 1		31,4	27,5	22,6		
paredes laterais e do palco de tijolo aparente.	240	0,02 4,8	0,03 7,2	0,05 12,0		
parede de fundo de placas tipo eucatex.	42	0,19 8,0	0,30 12,6	0,43 18,1		
subtotal 2		12,8	19,8	30,1		
pessoas sentadas em poltronas simples	135	0,15 20,3	0,38 51,3	0,39 52,7		
poltronas de madeira restantes, vazias.	45	0,02 0,9	0,02 0,9	0,04 1,8		
subtotal 3		21,2	52,2	54,5		
subtotal 4 (1 + 2 + 3)		65,4	99,5	107,2		

A absorção ainda não alcança os valores ótimos; a primeira providência possível é mudar as poltronas por outras mais absorventes (e mais confortáveis!) que ao mesmo tempo diminuirão a diferença do tempo de reverberação entre sala cheia e sala vazia.

pessoa sentada em poltrona simples.

135	0,15	20,3	0,38	51,3	0,39	52,7	
poltronas de couro	45	0,09	4,1	0,15	6,8	0,11	4,9
subtotal 3'			24,4	58,1		57,6	
subtotal 4' (1 + 2 + 3')			68,6	105,4		110,3	

Observa-se que ainda é necessária uma certa quantidade de absorção, especialmente nas frequências graves e médias. Pode-se tentar modificar as paredes laterais, rebocando a parede e colocando um lambri de placa de compensado de madeira de 6 mm, deixando uma câmara de ar de 10 cm com lã de vidro solta no interior. A colocação desse lambri — assim como a parede de fundo, que pode alternar placas de eucatex com faixas de reboco, cuidando sempre de prevenir a possibilidade de eco — pode ser decidida por critérios formais, sempre que se resolva numa distribuição homogênea no auditório.

tijolo rebocado	192	0,03	5,8	0,04	7,7	0,04	7,7
placas tipo eucatex	30	0,19	5,7	0,3	9,0	0,43	12,9
placas de madeira	60	0,3	18,0	0,06	3,6	0,025	1,5
subtotal 2'			29,5	20,3		22,0	
subtotal 4'' (1 + 2' + 3')			85,3	105,9		102,3	

Desta vez exageramos na quantidade de placas; tenta-se uma nova proporção:

tijolo rebocado	192	0,03	5,8	0,04	7,7	0,04	7,7
placas tipo eucatex	60	0,19	11,4	0,3	18,0	0,43	25,8
placas de madeira	30	0,3	6,0	0,06	1,8	0,025	0,75
subtotal 2''			23,2	27,5		34,25	
subtotal 4''' (1 + 2'' + 3')			79,0	113,1		114,5	
f_{60} calculado			2,04	1,42		1,41	

Sendo que, quando todos os tempos se aproximam dos respectivos ótimos a menos de 0,1 s, o cálculo pode ser considerado aceitável.

9 — Projeto de auditório — casos particulares

Os requerimentos de um auditório para voz falada diferem consideravelmente dos de uma sala de concertos. Convém, então, considerar por separado as duas metodologias de trabalho.

9.1 — Auditórios para voz

Dentro desta categoria devem ser considerados todos os auditórios nos quais o conteúdo semântico da voz falada é a parte mais importante da comunicação a ser realizada. Compreende teatros, salas de audiências, anfiteatros, grandes salas de conferência, etc.

9.1.1 — *Características da voz falada*

A voz falada compõe-se de duas famílias de sons bastante diferenciados: as *vogais*, que mostram no seu aspecto rasgos distintivos chamados formantes, próprios da pessoa que fala e da língua do discurso; e as *consoantes*, que funcionam geralmente como nexo de ligação entre as vogais. É precisamente no reconhecimento das consoantes que se baseia a inteligibilidade da palavra num auditório. Como a energia da voz humana é limitada, sendo necessária uma quantidade razoável em cada ponto do auditório para se poder ouvir corretamente, torna-se indispensável utilizar ao máximo e corretamente aquela energia, aproveitando uma certa quantidade de som reverberado para aumentar o nível sonoro nas fileiras mais afastadas da fonte sonora.

Deve-se lembrar ainda que uma quantidade exagerada de som reverberado impediria a correta percepção do texto, no momento em que os

diversos fonemas se misturam, por permanecerem por tempo exagerado no auditório.

9.1.2 — Especificações de forma

Todas as condições gerais com respeito à forma que foram levantadas na unidade 8 são válidas no caso.

Quanto maior for o volume do auditório e maior o seu tempo de reverberação, menor será a taxa de inteligibilidade. Nesses casos é especialmente importante que boa parte do som que chega a cada ouvinte venha direto da fonte ou quase direto, quer dizer, refletido uma só vez. Essas primeiras reflexões, geralmente produzidas pelas superfícies mais próximas da fonte originam uma onda refletida, cujo caminho não resultará muito maior do que o caminho do som direto. Os raios refletidos, cujos caminhos tenham mais de 17 m que o correspondente aos raios diretos, devem ser evitados, pois podem ser fontes de ecos e, além disso, sempre prejudicarão a inteligibilidade. A fim de que não seja absorvida muita energia sonora pela própria platéia, é conveniente — e em casos de auditórios grandes é indispensável — que haja certa inclinação. Uma regra prática dá um ângulo mínimo de 8° de elevação nos auditórios, aumentando a 15°, ou mais, nos anfiteatros.

No caso de existir balcão, será necessário estudar a distribuição por cima e por baixo, usando a superfície inferior do balcão como refletora. Para proporcionar uma quantidade apreciável de som a essa parte inferior, a altura do balcão não deve ser menor do que a metade da profundidade da área inferior ocupada por cadeiras.

Sendo o tempo de reverberação de um auditório diretamente proporcional ao seu volume e inversamente à absorção, pode-se definir certo volume por pessoa — cubagem — o para qual a absorção da própria pessoa se aproxime à necessária distância para um tempo de reverberação ótimo. Numa sala para palavra, esse volume por pessoa é de 3 m³. No caso do volume ser maior, será necessário acrescentar certa quantidade de algum absorvente forte para compensar o aumento de volume. De qualquer modo, tal volume não deverá exceder os 5 m³ por pessoa.

Existe também certo limite máximo para o volume de um auditório que, sempre dependendo de muitas variáveis — forma, quantidade de ruído externo, etc. — aproxima-se dos 8 000 m³. Para volumes maiores, faz-se necessário contar com amplificação eletrônica.

As técnicas mais avançadas de teatro mudaram completamente a forma do teatro tradicional, no qual a área de atuação e a do público estão bem delimitadas e separadas uma da outra. Hoje, o arquiteto deve prever maior flexibilidade para um teatro; a possibilidade de mudar completamente a disposição interior, de considerar, enfim, que qualquer ponto do espaço pode ser considerado de atuação. Acusticamente, isto exige uma concepção totalmente diferente, uma distribuição tal que permita que o som de cada ponto seja perfeitamente percebido em qualquer outro da sala.

O problema é análogo ao que se coloca no caso de uma sala de assembléia, ou de um congresso. Não existindo pontos-fortes específicos, dever-se-á procurar obter uma distribuição homogênea, sem direções privilegiadas, e diminuir ainda mais todo tipo de ruído vindo do exterior. No caso de existirem lugares próprios para público — galerias — estes serão tratados de modo a ter a maior absorção possível.

9.1.3 — Especificações de materiais de revestimento

No capítulo anterior foi visto exaustivamente o cálculo do tempo de reverberação de um auditório e a determinação dos materiais absorventes necessários para obter a absorção ótima para a função da sala. Depois de definir quais são os materiais de revestimento que serão utilizados e em que quantidade, é ainda importante discutir onde serão colocados. Em primeiro lugar serão completados os lugares que poderiam produzir ecos — parede posterior, partes da parede lateral e, depois, como princípio geral, esse material deverá ser distribuído do lado da audiência e da forma mais aleatória possível, intercalando superfícies refletoras e absorventes, criando arestas que ajudarão a difundir o som. Dever-se-á ter cuidado com os materiais acústicos que possam ser danificados facilmente — lãs minerais ou vegetais projetadas, placas de fibra de papel, etc. —, usando-os somente em lugares que permaneçam fora do alcance do público.

9.2 — Auditórios para música

Sempre existiu uma interação mútua entre a música e o lugar onde deveria ser ouvida. As grandes catedrais góticas, de superfícies altamente refletoras e, por isso, com longos tempos de reverberação — que chegam até a 15 s — propiciaram o lento canto gregoriano e a música de órgão, que souberam tirar partido desse “estar em suspenso no ar”. A sala do velho teatro italiano, pelo contrário, barroca e extremamente ornamentada de cortinas e tapetes grossos, todos eles outorgando características de alta absorção, permitiram a existência da ópera, cujo texto, cantado rapidamente, deve ser sempre compreensível. A música de câmara exige uma intimidade que nunca poderá ser atingida em salas para várias centenas de pessoas e nem se fale da música eletrônica que, além de um equipamento especial, precisa de uma perfeita e homogênea distribuição em toda sala, e além do mais, não precisa de palco...

9.2.1 — Características dos diferentes tipos de música

Dada a quantidade de formas musicais diferentes, parece natural estudar as suas características em separado.

9.2.1.1 — Orquestra sinfônica

De um século para cá, a grande maioria de concertos musicais gira em torno da orquestra sinfônica e é previsível que continue assim por algumas décadas ainda. Fonte sonora complexa, composta por sua vez de fontes de características totalmente diversas, a orquestra apresenta algumas características acústicas próprias. É importante que os diferentes grupos orquestrais estejam balanceados, que nenhum deles se sobreponha aos outros; é também necessário um certo nível de definição, para reconhecer as características específicas de cada instrumento, se bem que tal característica seja na música orquestral menos importante do que, por exemplo, na música de câmara. Existe

mais uma característica de difícil definição, nomeada de diferentes maneiras pelos músicos: corpo sonoro, riqueza, sonoridade, ressonância, calor, etc., que chamaremos aqui de *plenitude do som* e que se refere às características todas que diferenciam uma apresentação ao ar livre de uma outra, numa sala de concertos bem projetada, com seus atributos específicos.

9.2.1.2 — Conjunto de câmara

Pensada para uma quantidade variável de músicos, porém sempre menor do que numa orquestra, a música de câmara exige uma alta definição entre os diferentes instrumentos, assim como a clara diferenciação entre as notas que conformam o estímulo musical. Isto exige salas de pequena capacidade, de curto tempo de reverberação e uma atmosfera íntima.

9.2.1.3 — Teatro de ópera

Talvez o caso mais complexo, pois reúne características de teatro falado e de música, a ópera pede um termo médio de tempo de reverberação. Como o palco deve servir para complexas cenografias e movimentos, não pode ser utilizado para refletir o som para a sala; dever-se-á, então, utilizar para esses fins forro e paredes da sala. Será especialmente útil a parte do forro por cima do proscênio, por ser responsável pelas primeiras reflexões. O fosso da orquestra deve funcionar como uma “caixa de música” sem defeitos e distribuir homogêneamente e sem ressonâncias parciais seu som para a sala e, não deve ser esquecido, para o palco. Com efeito, os cantores devem ouvir perfeitamente a música — o que, se bem que óbvio, não é o que geralmente acontece — e também devem ouvir-se a si mesmos, reservando-se para isto uma parte da reflexão do forro. Como em qualquer outro auditório, devem ser evitados defeitos — ecos, pontos mortos — que aparecem geralmente num projeto complicado como um teatro de ópera.

Stockhausen, importante compositor de música eletrônica, definiu uma vez a sala ideal para ouvir música eletrônica como sendo de forma esférica, com o ouvinte no meio e rodeado por uma enorme quantidade de alto-falantes. Sem chegar a esse ponto, a sala ideal para as propostas, complexas e muito diferenciadas, da música contemporânea deve ser de flexibilidade total, tanto na colocação do público quanto na das fontes sonoras; a acústica, por conseguinte, deve acompanhar a proposta, criando um espaço sonoro homogêneo, sem pontos prejudicados.

9.2.2 — *Especificações gerais*

Os critérios de definição e de plenitude são de certa forma opostos; para se obter uma boa definição, é necessário que o som direto seja considerável e que o tempo de reverberação seja curto. Assim, tanto o reconhecimento da procedência do som, quanto a sua inteligibilidade serão consideráveis. Pelo contrário, se se procura plenitude do som será necessário uma boa quantidade de som difuso e sustentado no tempo. Para manter som direto, inclusive nas últimas fileiras, deve-se evitar que o som passe roçando nas cabeças do auditório, pois este o absorveria, “sugando” parte considerável do som que se destinava às últimas fileiras. Uma inclinação da platéia, ou melhor, um estudo cuidadoso da curva ideal, em função da altura da fonte sonora, é imprescindível. Além do som direto, é conveniente usar as chamadas “primeiras reflexões”, aquelas que chegarão ao ouvido dentro dos 35 milissegundos depois do som direto, confundindo-se na percepção com ele e aumentando a intensidade da sensação. Essas primeiras reflexões devem ter um caminho só um pouco maior do que o caminho do som direto. Para obtê-las, utiliza-se o forro, ou um sistema de “nuvens” acústicas suspensas do teto (placas de material refletor), cuidadosamente projetadas. A chamada plenitude depende em boa parte da escolha do tempo de reverberação, sendo que um maior tempo dará a sensação de maior plenitude, se bem que em detrimento de uma maior definição.

9.2.3 — *Especificações de forma*

Existem três formas básicas de auditório que, obviamente, admitem todo tipo de variações: retangular, leque e ferradura. Todas as três têm vantagens e desvantagens, e poderão ser utilizadas de acordo com a função e o tamanho do auditório projetado. A forma de ferradura, consagrada pelo teatro de ópera italiano, presta-se para uma grande audiência, toda ela colocada perto da fonte e com uma cubagem relativamente baixa. Já vimos que essa cubagem reduzida, junto a uma quantidade bastante alta de absorção — não esquecer que devem ser drasticamente reduzidas as reflexões das superfícies côncavas próprias dessa forma — perfazem um tempo de reverberação baixo, conveniente para teatro e ópera, mas não para orquestra sinfônica. A forma de leque, que permite a melhor visibilidade, proporcionalmente, a maior quantidade de pessoas para uma distância máxima da fonte, o que é positivo para utilizar ao máximo o som direto e quase-direto, tem como desvantagens as curvas côncavas da parede posterior, balcão e fileiras de poltronas, que ameaçam originar ecos e focalizações nocivas. A forma retangular cria um sistema de reflexões cruzadas que acentua o caráter de plenitude da resposta acústica da sala, mas pode produzir ecos e ecos palpitantes, além de originar modos normais de ressonância consideráveis. Os defeitos, se bem que importantes neste último caso, podem ser contornados, quebrando-se o paralelismo das paredes laterais, o que pode ser feito já com um ângulo de 5° de uma com relação à outra. O projetista levará em conta vantagens e desvantagens na determinação da forma de seu auditório.

9.3 — *Auditórios de uso múltiplo*

Muitas vezes o projeto exige que a função do auditório seja tanto para música como para palavra. Como acabamos de ver, as condições para uma boa sala para uma ou outra função são bastante diferentes: é por isso ilusão procurar um auditório que convenha perfeitamente para ambas. Como princípio básico, procurar-se-á ter uma boa inteligibilidade, pois de outro modo seria impossível uma comunicação verbal. O

tempo de reverberação deverá ser um pouco mais longo do que o correspondente a uma sala de palavra. Se é prevista uma equipe de amplificação eletrônica de alta qualidade, pode-se projetar como auditório para música, pois a amplificação se encarregará de corrigir a excessiva reverberação, aumentando a quantidade de som direto sobre os ouvintes.

9.4 — Cinemas

As condições gerais que foram feitas para o auditório de palavra são aplicáveis ao cinema, com a diferença de que, neste último, o nível do som na fonte é relativamente maior do que no teatro (uns 15 dB a mais). Isto permite preocupação menor com a chegada do som até o fundo da sala, mas deve-se prestar atenção aos possíveis defeitos — eco, eco palpitante, ressonâncias, focalizações. Deve-se ter em conta que, em cinemas muito compridos, o som tarda a chegar até o fundo, produzindo uma defasagem com a imagem visual, que se pode tornar muito incômoda: 1/7 de segundo que demore já é perceptível, e se produz a uma distância de 50 m da fonte.

Especial cuidado deve ter-se com a possível intromissão de ruídos externos, como os da cabine de projeção. Esta é uma fonte de ruído apreciável, e deve estar revestida de material absorvente, e o isolamento da sala não pode ser inferior a 45 dB, inclusive nas janelas de projeção, que serão especialmente projetadas e equipadas com vidros duplos.

10 — Auditórios ao ar livre

Nos projetos de auditórios fechados foram estudados a boa distribuição de som, o tempo ótimo de reverberação, uma adequada difusão e outras variáveis: todas elas dependentes das reflexões que o som sofre nas paredes e na cobertura. No projeto de um auditório ao ar livre, não contamos com tais reflexões, e nosso maior problema será obter, assim mesmo, as qualidades citadas.

10.1 — Exemplos históricos

Muito se tem falado das propriedades "mágicas" dos teatros gregos. As lendas persistem só enquanto rodeadas de mistério. Uma análise séria, porém, destrói as fantasias, deixando ver o que o teatro grego tinha de bom e o que não conseguiu resolver: não era só por "charme" que as máscaras dos atores tinham enormes bocas: estas funcionavam como megafones rudimentares, amplificando a energia sonora de suas vozes.

O teatro grego foi inicialmente um lugar para ver, mais do que para ouvir ("theatron" quer dizer, em grego, precisamente lugar para ver): limitava-se a uma área escolhida na encosta de uma colina. Depois evoluiu, delimitando uma zona de ação circular, chamada orquestra, rodeada, num ângulo de 270°, por fileiras de bancos. Muito depois apareceu o palco, por detrás da orquestra, como lugar para ação dos atores.

O teatro romano mudou levemente a forma de seu antecessor: a platéia tornou-se semicircular, toda ela em frente a um enorme palco, o "logeion". A orquestra diminuiu de tamanho, até chegar a um semicírculo. O logeion elevou-se pouco mais de um metro do chão e foi fechado por paredes posteriores e laterais que, além de servirem como cenário — representavam a fachada de um palácio ou templo —, serviam como refletores de som. Porém, essa reflexão não era

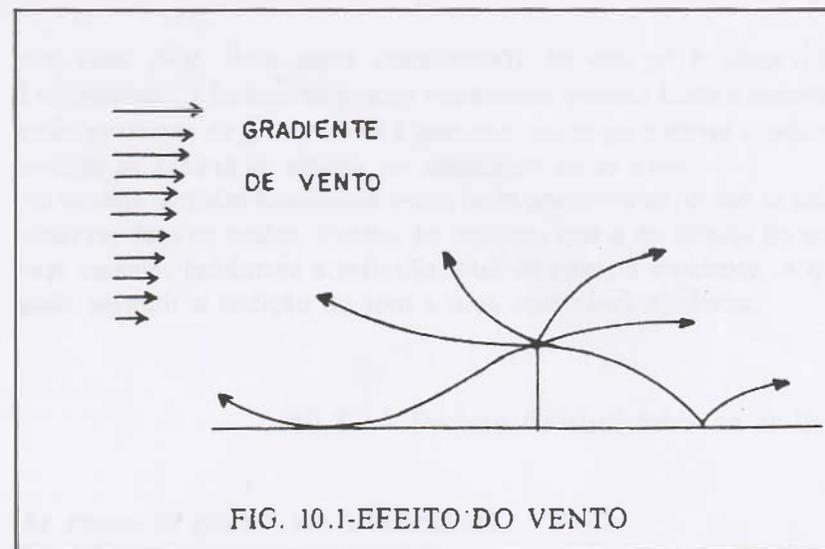
suficiente para distribuir bastante som para as fileiras mais afastadas, sendo necessário o uso das máscaras e a pesquisa de outros artifícios para aumentar o nível sonoro. O mais interessante foi a utilização de ânforas, usadas como ressonadores de Helmholtz. Desta forma se obtinha uma amplificação local do nível sonoro, com um certo atraso com respeito ao som direto, o que funcionava como pseudo-reverberação, se bem que esse atraso só se produzia para algumas frequências isoladas, precisamente as de ressonância do sistema. (Em igrejas medievais escandinavas observou-se a colocação de ressonadores análogos, porém com cinza no interior, funcionando então o sistema como absorvente seletivo). Quase todo o trabalho dos atores gregos se realizava perto do centro do círculo definido pela platéia. As fileiras concêntricas de bancos devolviam, amplificado, o som que recebiam, inclusive se o teatro estivesse lotado, provocando grande atrapalhão aos atores. Além disso, o som voltava tingido de uma ressonância produzida pela defasagem entre as reflexões das fileiras sucessivas (se a separação entre estas fosse de 1,50m, a frequência seria de 225 c/s), produzindo um efeito paramusical que alterava monótona e totalmente o sentido do texto. Do estudo dos teatros gregos e romanos pode-se tirar importantes conclusões de como não incorrer em velhos erros e de como instrumentar com o estudo sério da técnica contemporânea. O primeiro passo é verificar como se comporta o som ao ar livre e quais são as condicionantes atmosféricas que incidem acima dele.

10.2 — Propagação do som ao ar livre

No capítulo 3 foi estudado como o som decresce em função inversa ao quadrado da distância, sendo que, para cada duplicação desta, o nível sonoro decresce de 6 dB. Para esse cálculo se supõe o caso de um meio isotrópico e homogêneo; na realidade, ventos e variações de temperatura, além de descontinuidades ou absorventes especiais, mudam consideravelmente esse comportamento.

10.2.1 — Efeito do vento

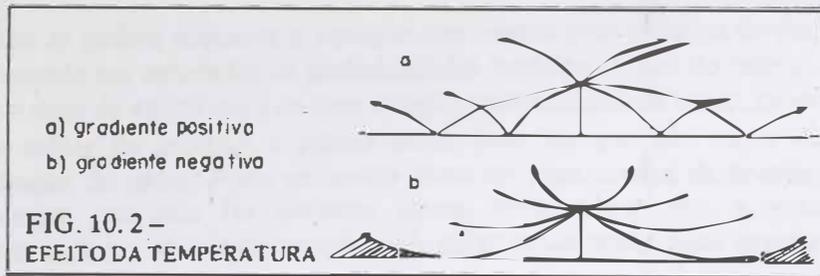
No momento em que as moléculas do ar entram em movimento dirigido pela ação do vento, a sua velocidade se soma à do movimento



produzido pela pressão sonora, resultando uma velocidade maior. no caso de estar o ouvinte a favor do vento, ou menor, se estiver contra ele. Como a velocidade do vento varia, aumentando com a altura — devido a atritos com a superfície da terra — a direção do som também varia seguindo trajetórias como as indicadas na figura. No projeto de um auditório ao ar livre, procurar-se-á fazer com que a direção palco-platéia coincida com a direção do vento, a fim de que o som na platéia seja maior.

10.2.2 — Efeito da variação de temperatura

A velocidade do som no ar é inversamente proporcional à raiz quadrada da densidade do ar, sendo, então, diretamente proporcional à raiz quadrada da temperatura absoluta: $c = k \cdot \sqrt{T}$
Toda vez que se estabelece um gradiente de temperatura no ar, o som terá velocidades também dependentes da altura, curvando as trajetórias. Caso o gradiente seja crescente com a altura (caso de lagos gelados, ou na terra, logo depois do pôr-do-sol), o som consegue se propagar por grandes distâncias sem maior problema. Quando, pelo contrário, o gradiente é negativo, quer dizer, decrescente com a altura (o que é normal), a velocidade embaixo resulta maior



do que no alto e as frentes de ondas se curvarão para cima, dando lugar a zonas totalmente sem som (sombra acústica na Fig. 10.2.b). Obviamente, tal comportamento influi consideravelmente num projeto de auditório, levando à necessidade de inclinar bastante a platéia para utilizar um máximo de energia no caso de gradiente negativo.

10.2.3 — Absorção do som no ar

Quando a energia sonora atravessa o ar, uma série de processos se opõe a esse movimento, a nível molecular: a viscosidade, a agitação térmica, a radiação e a própria absorção molecular.

Esse amortecimento, dependente da frequência do som, o é também da temperatura do ar: para um som de 10000 c/s, passa de desprezível no caso de ar invernal cru, até chegar a uns 16 dB, para cada 30 m, num clima tropical desértico. No amortecimento nas temperaturas normais para um auditório ao ar livre, entre 15° a 25°C, a variação é de aproximadamente 8% para cada aumento de 3°C. Na bibliografia se encontram curvas para calcular o amortecimento em função da umidade relativa do ar.

Estes fenômenos também explicam as flutuações de nível sonoro que se produzem quando o som atravessa longas distâncias, como é o caso na transmissão de ruídos de motores de avião.

10.2.4 — Superfícies absorventes

Um prado coberto densamente por grama funciona acusticamente como um absorvente bastante apurado; quando uma onda sonora se propaga

por cima dele, uma parte considerável de energia é absorvida. Logicamente, o fenômeno é mais importante quando fonte e receptor estão próximos da grama. Essa é uma das razões para elevar o palco e inclinar as fileiras da platéia em auditórios ao ar livre.

As nuvens também funcionam como bons absorventes, como se pode observar com os aviões. Porém, no caso em que a incidência do som seja rasante, produz-se a reflexão total da energia incidente, o que pode permitir a audição do som a uma apreciável distância.

10.3 — Projeto de auditórios ao ar livre

As etapas do projeto são as seguintes:

1. - Elaboração do programa.
2. - Definição e estudo da localização.
3. - Projeto arquitetônico.
4. - Ensaaios e correções.

10.3.1 — Elaboração do programa

Serão definidas as funções a serem cumpridas pelo auditório (palavra, música ou uso múltiplo, o qual só poderá ser resolvido com compromisso entre os dois primeiros) e a sua capacidade. Recomenda-se um limite máximo de 600 pessoas para funcionar sem amplificação eletrônica.

Serão estudados a forma de utilização, temporada do ano e os horários, a fim de serem conhecidas as condições climáticas a que estará sujeito o auditório.

10.3.2 — Definição e estudo da localização

Conhecidas as condições de vento predominantes na região, dever-se-á definir a orientação do teatro, a fim de aproveitar a ajuda do vento.

Não se poderá esquecer a variação dos ventos com as horas do dia, devendo ser estudadas as probabilidades horárias de uso do teatro. No caso de existir mais de uma direção predominante de vento, deve-se cuidar de proteger a platéia deste, toda vez que não venha da direção do palco. Pode ser usado muro ou uma cortina de árvores, sempre que esta for bastante densa, lembrando-se que a parte protegida por detrás da barreira é de aproximadamente cinco vezes a sua altura.

De acordo com o efeito da temperatura, as horas ótimas para utilização do teatro são as primeiras horas da noite (gradiente positivo).

É fundamental o estudo acústico da possível localização e o levantamento dos ruídos existentes: se estes sobrepassam a média dos 40dB, o fato basta para invalidar qualquer outra vantagem e determina por si a necessidade de se procurar outro lugar. Por isso, o teatro deverá estar afastado de vias de trânsito, assim como de zonas industriais e comerciais. Mesmo se a média não ultrapassar os 40 dB, mas houver algumas próximas de 60 ou 70 dB, a localização não pode ser considerada boa...

Deve-se lembrar que uma barreira de árvores usada para amortecer a força do vento não oferece particular defesa contra os ruídos; (para se ter uma idéia: nas frequências graves, um mato denso, com 25 m de visibilidade máxima e 10 m de altura, oferece um isolamento de só 45 dB por km de mato!) e, inclusive, um muro deveria ser muito alto para proteger a superfície da platéia. Como o auditório deverá necessariamente ser inclinado (um mínimo de 12°), é conveniente ter em conta esse dado na escolha da localização.

10.3.3 — Projeto arquitetônico

A forma do auditório se deduz da correspondência entre formas ótimas para se ter boa visibilidade e boa audibilidade. A curvatura das fileiras de bancos, quando necessária, terá seu centro (ou melhor, seus centros: é conveniente que as filas não sejam concêntricas) bem por detrás do palco. Se a platéia for plana, o enfraquecimento do som será de 1 a 2 dB por fila; é preciso incliná-la até pelo menos uns 12°. Ainda assim, será difícil ter uma quantidade razoável de som nas últimas filas. Para aumentar essa quantidade, faz-se mister usar a energia

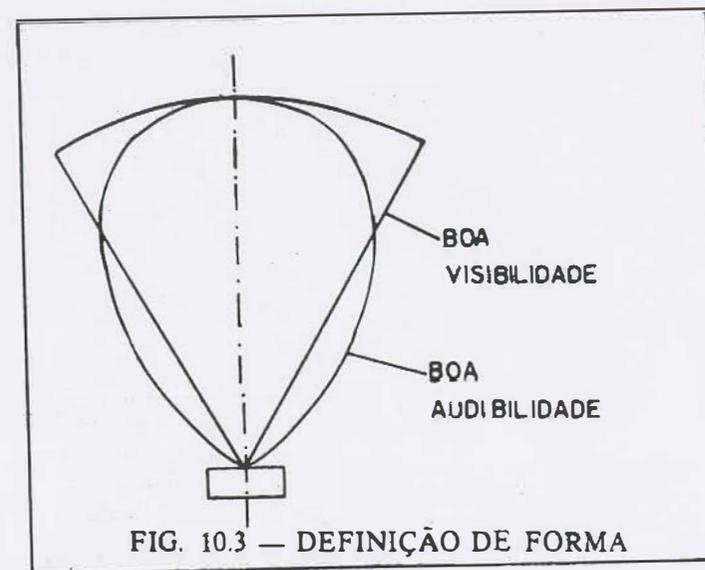


FIG. 10.3 — DEFINIÇÃO DE FORMA

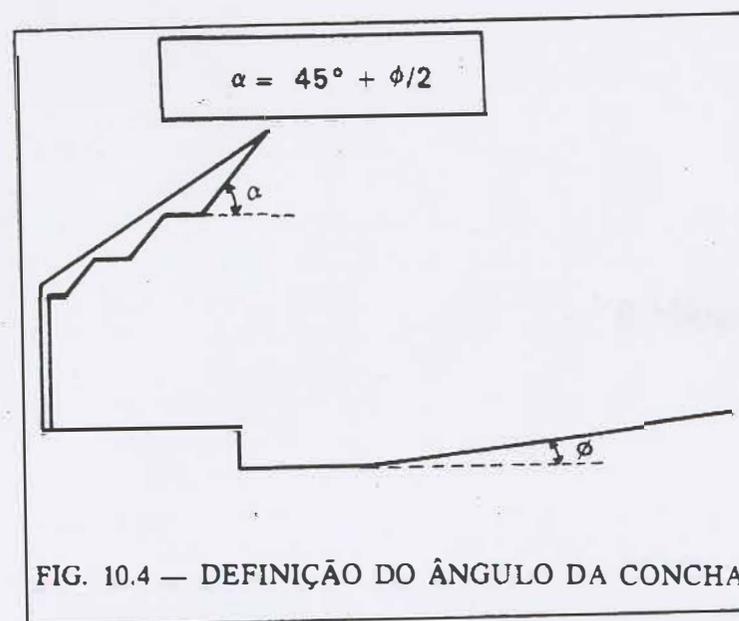


FIG. 10.4 — DEFINIÇÃO DO ÂNGULO DA CONCHA

sonora da fonte com maior rendimento. Com efeito, lembrar-se-á que tanto a voz humana como a maioria dos instrumentos musicais emitem energia sonora não só para a frente, mas nunca numa superfície direcional mais ou menos esférica. Se o palco estiver rodeado de

paredes de fundo, laterais e teto refletores, essa energia poderia ser distribuída na platéia e, com um estudo geométrico apropriado, enviada para as filas de bancos mais necessitadas. Geralmente se costuma projetar a concha acústica de forma que as reflexões que produza sejam paralelas à inclinação da platéia. Para isso o seu ângulo α com a horizontal deverá ter uma relação específica com o ângulo ϕ de inclinação da platéia. No caso desse ângulo ser muito aberto, o que produziria uma altura exagerada do teto, retardando desse modo as reflexões benéficas, pode-se cortar em partes, cada uma com a inclinação calculada.

As paredes laterais do palco não poderão ser paralelas, sob risco de produzirem ecos palpitantes. A parede do fundo é ainda importante para produzir uma necessária reflexão sobre o próprio palco. Deve-se prestar atenção aos problemas que apresentam as superfícies côncavas, quando refletoras. Em geral devem ser evitadas, sendo que, em casos especiais, quando o auditório for extremamente grande e sem amplificação eletrônica, poder-se-á estudar uma solução desse tipo mais diretiva do que a produzida por uma concha de superfícies planas.

Bibliografia

1. D. Bausch, W. Dietsch: *Lärmschutz an Strassen*, Beton-Verlag, Düsseldorf, 1979.
2. L.L. Beranek: *Acústica*, H.A.S., Buenos Aires, 1961 (ou *Acoustics*, McGraw-Hill, New York, 1954).
3. W.A. van Bergeijk et a.: *Waves and the ear*, Anchor, New York, 1958.
4. H. Burris-Meyer, E.C.Cole: *Theatres and auditoriums*, R. Krieger Publishing Co. Inc. Hutington, New York, 1975.
5. L. Conturie: *L'acoustique dans les batiments*, Eyrolles, Paris, 1973.
6. L. Cremer: *Vorlesungen über technische Akustik*, Springer, Berlin, 1975.
7. D. Faggiani, *Lineamenti di acustica applicata*, Tamburini, Milano, 1946.
8. A. Gribenski: *L'audition*. Presses universitaires, Paris, 1951.
9. C.M.Harris et a.: *Handbook of noise control*. McGraw-Hill, New York, 1979.
10. J.R.Hassell, K.Zaveri: *Acoustic noise measurements*. Brüel & Kjoer, Noerum, 1980.
11. H.Helmoltz: *On the sensations of tone*. Dover, New York, 1954 (ou *Die Lehre von den Tonempfindungen*. Longmans, 1872).
12. R. Josse: *Notions d'acoustique*, Eyrolles, Paris, 1973.
13. V. O. Knudsen, C.M.Harris: *Acoustical designing in architecture*. John Wiley & Sons, New York, 1950.
14. A. Lara Saenz, A. Moreno, J. Santiago: *Condicionantes acústicos en la edificación*. Electrónica y física aplicada, Madrid, 1975.
15. G. Lauro: *Teoria delle oscillazioni ed acústica técnica*. Görlich, Milano, 1947.
16. M.Meisser: *Acústica de los edificios*. E.T.A., Barcelona, 1973 (ou *La pratique de l'acoustique dans le batiment* Paris, 1970).

17. J.Pérez Miñana: *Compendio práctico de acústica aplicada*. Labor Barcelona, 1969.
18. A.Moles: *Physique et technique du bruit*. Dunod, Paris, 1952.
19. L.X. Nepomuceno: *Acústica técnica*. Etegil, São Paulo, 1968.
20. M.R.V. Niilus: *Aislación acústica en la vivienda*. Bouwcentrum Argentina, B.Aires, 1965.
21. P.H.Parkin, H.R.Humphreys: *Acoustics, noise and buildings*. Faber, London, 1979.
22. E.G.Richardson: *Technical aspects of sound*. Vol. I. Elsevier, Amsterdam 1953.
23. A.Schoch: *Die physikalischen und technischen Grundlagen der Schalldämmung im Bauwesen*. Hirzel, Leipzig 1937.
24. P. Schulz: *Schallschutz-Wärmeschutz im Innenausbau*. DVA, Stuttgart, 1980.
25. B.J. Smith: *Acoustics*. Longman, London, 1971.
26. R. Trendelenburg: *Einführung in die Akustik*. Springer, Berlin, 1961.
27. K. Wiese: *Acústica de los locales*. G.Gilli, Barcelona, 1956.
28. W. Zeller: *Technique de la défense contre le bruit*. Eyrolles, Paris, 1954 (ou *Technische Lärmabwehr*. A. Kröner, Stuttgart, 1951).
29. Diversos: *Music, room and acoustics*. Royal Swedish Academy, Stockholm, 1977.

Procedência das ilustrações alheias

- P. H. Parkin e H. R. Humphreys (Acoustics, noise and buildings): 1.1;3.4; 4.3;4.4; 4.5; 5.5; 5.6; 5.7; 5.8; 5.9; 6.2 e 6.4.
 C. E. Hime (trabalho não editado): 5.2 e 5.3.
 J. Perez Miñana (Compendio práctico de acústica aplicada): 2.4
 W. Zeller (Technische Lärmabwehr): 2.5
 J. Carbonell (trabalho não editado): 4.2.

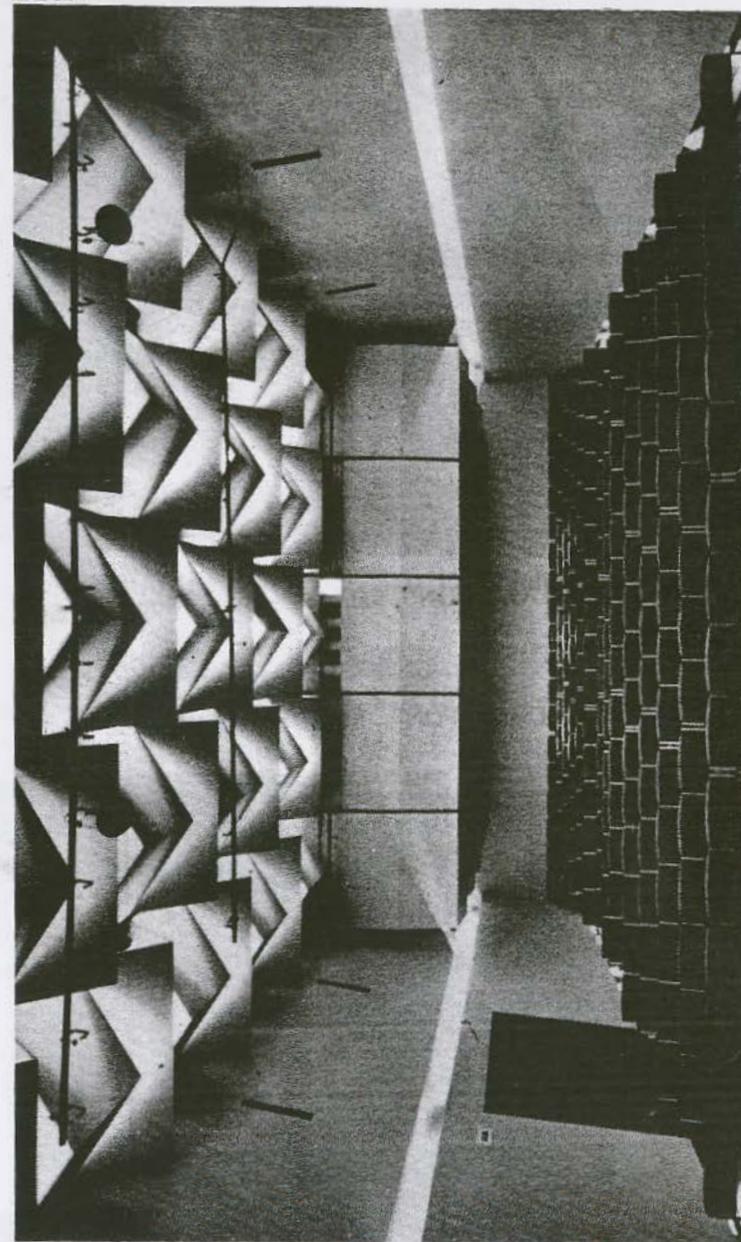


Foto 1 — Teatro da ALIANÇA FRANCESA, Montevideú. Forro difusor e paredes inclinadas para evitar a formação de modos normais de ressonância concentrados.