

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Civil

FÍSICA DAS CONSTRUÇÕES

Acústica Ambiental e de Edifícios

Manuela Almeida
Sandra Silva
Tiago Ferreira

Ano Lectivo 2006/2007

Índice

INTRODUÇÃO	4
CAPÍTULO 1 FUNDAMENTOS DE ACÚSTICA AMBIENTAL E DE EDIFÍCIOS.....	6
1.1 O Som – Caracterização Física e Acústica.....	7
1.1.1 Natureza do Som, Onda Sonora, Pressão Sonora, Som e Ruído	7
1.1.2 Ondas Longitudinais e Transversais, Velocidade de uma Onda Sonora.....	9
1.1.3 Comprimento de Onda, Período, Frequência, Tipos de Sons.....	12
1.1.4 Gama Audível de Frequências, Bandas de Frequências	15
1.1.5 Pressão Sonora Eficaz, Impedância Acústica Específica	18
1.1.6 Intensidade Sonora e Potência Sonora	20
1.1.7 Conceito de Nível.....	22
1.1.8 Combinação de Níveis de Pressão Sonora.....	24
1.1.9 Fenómenos de Absorção, Reflexão, Difusão, Difracção, Refracção	26
1.2 Fontes Sonoras	30
1.2.1 Fontes Pontuais, Lineares e Planas	30
1.2.2 Conceito de Direccionalidade	34
1.2.3 Ruído Branco e Ruído Rosa	36
1.3 Percepção Sonora.....	38
1.3.1 Curvas Isofónicas.....	38
1.3.2 Curvas de Ponderação	40
1.3.3 Equipamentos de Medição	42
1.4 Propagação no Exterior.....	44
1.4.1 Mecanismos de Atenuação.....	44
1.4.2 Principais Parâmetros de Avaliação	46
CAPÍTULO 2 ACÚSTICA INTERIOR DE ESPAÇOS CORRENTES	50
2.1 Introdução	51
2.2 Absorção Sonora	54
2.3 Materiais e Sistemas Absorventes Sonoros	60
2.3.1 Materiais Porosos	60
2.3.2 Membranas	61
2.3.3 Ressonadores.....	63
2.3.4 Aplicação Conjugada dos Diferentes Tipos de Sistema.....	65

2.4	Metodologias de Análise – Teoria Estatística	67
2.4.1	Campo Sonoro Difuso.....	67
2.4.2	Tempo de Reverberação	68
2.5	CrITÉrios de Desempenho Acústico	74
2.6	Potenciais Defeitos Acústicos em Espaços Correntes.....	76
2.6.1	Eco	76
2.6.2	Eco Flutuante	77
2.6.3	Focalização Sonora	78
2.6.4	EstratÉgias de Resolução	79
CAPÍTULO 3 ISOLAMENTO SONORO EM EDIFÍCIOS.....		80
3.1	Introdução	81
3.2	Sons de Condução Aérea.....	86
3.2.1	Situação Ideal – Sem Influência da Transmissão Marginal.....	86
3.2.2	Situação Real – Com Influência da Transmissão Marginal.....	95
3.2.3	Situação Real – Entre o Exterior e um Espaço Interior	100
3.2.4	CrITÉrios de Desempenho Acústico.....	102
3.3	Sons de Condução Sólida (ou de Percussão).....	104
3.3.1	Situação Ideal – Sem Influência da Transmissão Marginal.....	104
3.3.2	Situação Real – Com Influência da Transmissão Marginal.....	110
3.3.3	CrITÉrios de Desempenho Acústico.....	114
ANEXOS		115
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		116

Introdução

Como disciplina teórica a Acústica constitui um ramo de conhecimento da Física no qual se estudam os fenómenos de emissão, propagação e percepção de ondas sonoras, que em função dos variados objectos de estudo (música, medicina, oceanografia, electrónica, edifícios, entre outros), se foi especializando em sub-domínios, entre as quais se destacam a Acústica Ambiental e a Acústica de Edifícios, que possuem uma relação estreita com a Engenharia Civil.

Essa relação advém do facto da intervenção da Engenharia Civil na sociedade visar a melhoria da qualidade do ambiente exterior e das edificações, numa perspectiva integrada da qualidade de vida dos cidadãos. Ora é hoje inquestionável que a qualidade ambiental e dos edifícios é influenciada, por vezes de uma forma decisiva, pelo seu grau de conforto acústico.

Ao nível ambiental a proliferação de diversas fontes de ruído características do espaço urbano, particularmente o incremento da circulação de pessoas e bens (tráfego rodoviário, ferroviário e aéreo), são responsáveis por níveis de ruído progressivamente mais elevados, passíveis de fazer perigar as condições de conforto e inclusive de saúde da população, mediante efeitos físicos (por exemplo diminuição da capacidade auditiva), fisiológicos (por exemplo alteração do ritmo cardíaco e respiratório), e/ou psicológicos (por exemplo diminuição da capacidade de concentração e stress).

Com o estudo da Acústica Ambiental pretende-se salvaguardar a qualidade ambiental da sociedade ao nível da componente ruído, compatibilizando a sua inevitável ocorrência com as exigências de bem-estar da comunidade.

Ao nível dos edifícios pretende-se sobretudo que o conhecimento da acústica contribua para a preservação das condições de sossego necessárias ao usufruto do espaço habitado, com um nível de conforto compatível com o tipo de actividade desenvolvida, mas também, nalguns casos particulares, contribuir para melhorar a qualidade da própria utilização do edifício, como é por exemplo em salas de aula, locais de culto ou salas de concerto (Acústica de Salas).

O estudo da Acústica de Edifícios é actualmente também importante na avaliação e mitigação da exposição dos trabalhadores ao ruído em espaços fechados.

O sucesso de uma intervenção do âmbito da Acústica de Edifícios depende em parte da sua relação com a Acústica Ambiental (por exemplo isolamento sonoro a ruídos provenientes do exterior), pelo que dificilmente as duas vertentes podem ser separadas em aplicações práticas.

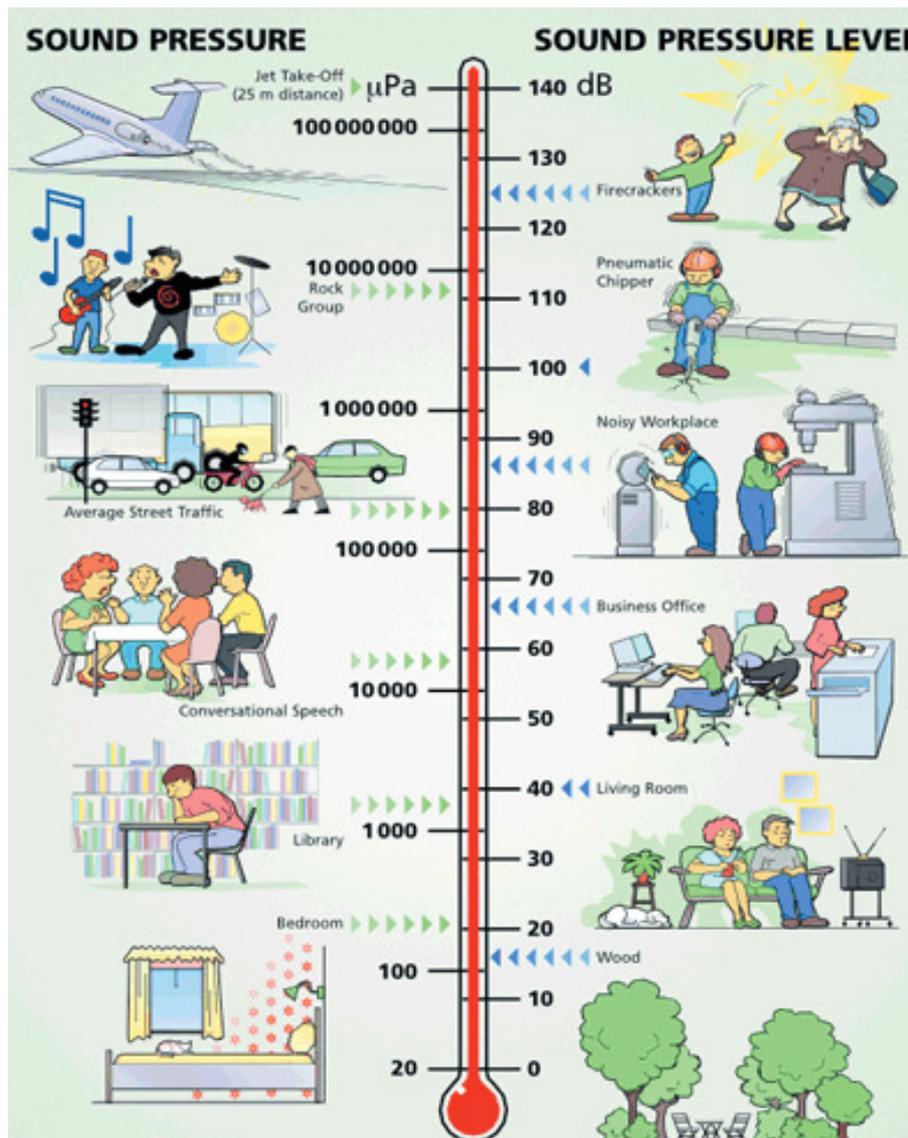
Neste documento são apresentados os fundamentos teóricos necessários à compreensão dos principais fenómenos da Acústica Ambiental e de Edifícios, com um grau de profundidade típico de um curso introdutório ao tema.

Embora se entenda que os vários aspectos versados sejam suficientes para uma análise das aplicações práticas correntes com que o Engenheiro Civil dotado de uma formação geral em Física das Construções se poderá deparar, ressalve-se que o exercício de uma actividade profissional neste domínio exige uma formação mais aprofundada, podendo considerar-se como uma área de especialização no âmbito da Engenharia Civil.

Espera-se que este documento possa também constituir um incentivo para a continuação dos estudos neste domínio do conhecimento.

CAPÍTULO 1

Fundamentos de Acústica Ambiental e de Edifícios



1.1 O Som – Caracterização Física e Acústica

1.1.1 Natureza do Som, Onda Sonora, Pressão Sonora, Som e Ruído

A sensação sonora resulta de uma perturbação (por exemplo a vibração de um diapasão, como mostra a Figura 1.1) num meio fluído em repouso (por exemplo o ar), que se propaga mecanicamente ao longo do meio (trata-se portanto de uma onda, classificando-se a sua propagação como um movimento ondulatório) e irá determinar a vibração do tímpano, que está na origem do complexo mecanismo da audição humana. A propagação da onda sonora ao longo do meio resulta das sucessivas compressões e rarefácções das partículas que o constituem, de tal modo que a vibração de uma partícula provoca a vibração da partícula vizinha e assim sucessivamente.

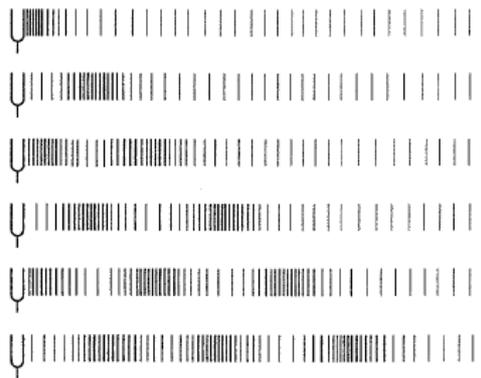


Figura 1.1 – Exemplo de propagação de uma onda mecânica por vibração de um diapasão (Arau 1999)

Durante o movimento ondulatório não se verifica transferência de matéria (por exemplo o fluxo de água num tubo) mas apenas de energia, ou seja, não há um deslocamento permanente das partículas. As partículas movem-se em torno da sua posição de equilíbrio em consequência da compressão/rarefação associada à deslocação da onda (Figura 1.2).

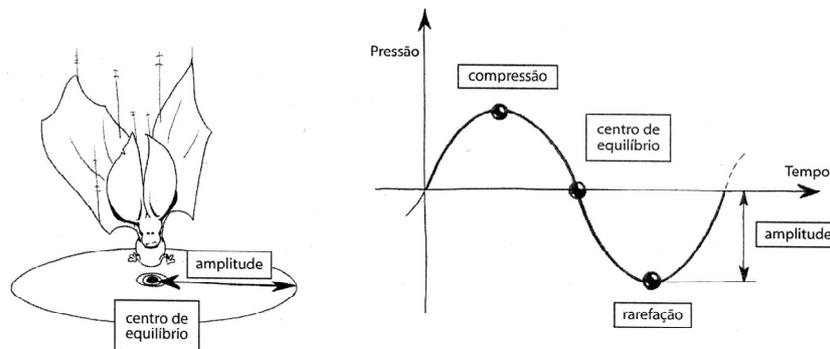


Figura 1.2 – Vibração de uma partícula em torno da sua posição de equilíbrio (Souza et al. 2003)

Enquanto o movimento de uma partícula é periódico em torno de uma posição de equilíbrio, o movimento da frente de onda (superfície que engloba as partículas no mesmo estado de compressão ou rarefacção) é progressivo.

A referida perturbação pode ser caracterizada de variadas formas (variação da temperatura, densidade, velocidade), por exemplo pela variação da pressão no meio de propagação da onda em torno de um valor de referência. No caso corrente do meio de propagação da onda ser o ar o valor de referência corresponde à pressão atmosférica (Figura 1.3) que para a Terra apresenta um valor aproximado de 1×10^5 Pa.

Normalmente adopta-se a pressão como parâmetro básico para a caracterização pelo facto da sua medição ser mais simples (para um fluido).

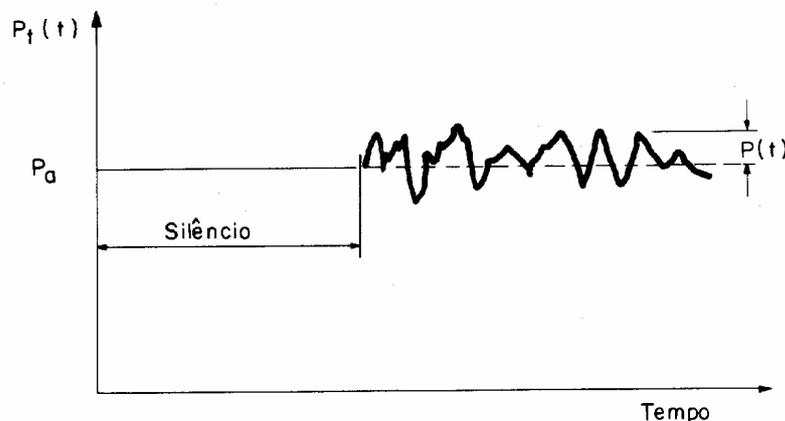


Figura 1.3 – Conceito de pressão sonora (Carvalho 2004)

A pressão sonora corresponde à diferença, para um dado instante do tempo, entre a pressão total e a pressão do meio em equilíbrio (Equação (1.1).)

$$p(t) = P(t) - P_0 \quad (1.1)$$

Onde:

$p(t)$ – pressão sonora (Pa)

$P(t)$ – pressão total (Pa)

P_0 – pressão de equilíbrio (Pa)

O ouvido humano (em condições normais) consegue distinguir variações de pressão a partir de um valor mínimo de $20 \mu\text{Pa}$. O valor a partir do qual se inicia uma sensação de dor corresponde a uma pressão sonora de 60 Pa (Bies e Hansen 2004), embora o valor de 100 Pa seja em regra referido como o limiar da dor.

Definida a natureza do som, importa desde já efectuar a distinção entre som e ruído. No caso da sensação sonora possuir um conteúdo estético ou informativo para o ouvinte, poderá então designar-se por som. Caso contrário deverá ser designada por ruído. Na prática uma mesma situação pode ser considerada som ou ruído em função do ouvinte (Figura 1.4).

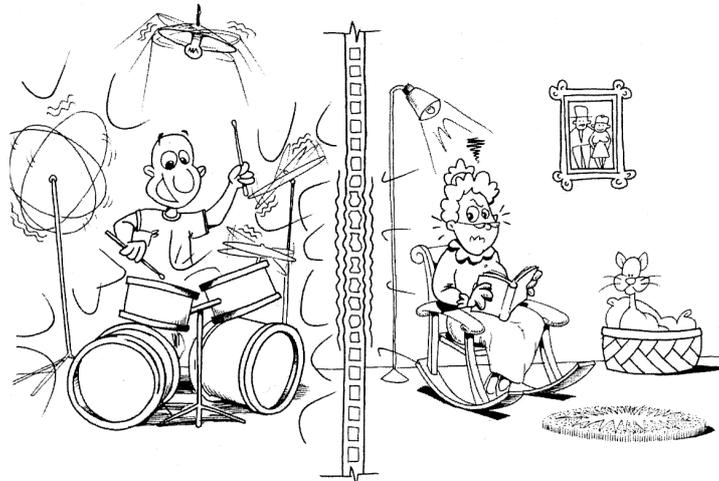


Figura 1.4 – Diferença entre som e ruído (Souza et al. 2003)

1.1.2 Ondas Longitudinais e Transversais, Velocidade de uma Onda Sonora

Como já foi referido o som é conduzido desde uma fonte até ao ouvido através de um movimento ondulatório, isto é, de uma onda (mecânica). As ondas podem ser classificadas tendo em conta a direcção do movimento vibratório das partículas em relação à direcção de propagação da onda propriamente dita, como ondas transversais ou ondas longitudinais¹:

- Ondas transversais, se a direcção da vibração das partículas é perpendicular à direcção de propagação da onda (por exemplo corda de uma guitarra);
- Ondas longitudinais, se a direcção da vibração das partículas é paralela à direcção de propagação da onda (por exemplo mola).

No caso da propagação do som no ar (ou de uma forma mais genérica, num fluído), as ondas sonoras são do tipo longitudinal. Note-se que no caso da propagação do som num sólido as ondas transversais são igualmente importantes.

A velocidade de propagação de uma onda sonora longitudinal (propagando-se quer num sólido quer num fluído) assume em geral a seguinte forma:

$$c = \sqrt{\frac{D}{\rho}} \quad (1.2)$$

Onde:

c – velocidade de propagação de uma onda sonora longitudinal (m/s)

D – parâmetro associado à elasticidade do meio (exemplo módulo de Young num meio sólido (N/m^2))

ρ – massa volúmica (kg/m^3)

¹ No caso dos sólidos é possível também identificar ondas de flexão e de torção.

No caso de um gás, e considerando um processo adiabático², a velocidade de propagação de uma onda sonora longitudinal pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} \quad (1.3)$$

Onde:

c – velocidade de propagação de uma onda sonora longitudinal (m/s)

γ – constante adiabática (-) (para moléculas monoatómicas é igual a 1,67; para moléculas diatómicas é igual a 1,4; e para moléculas triatómicas é igual a 1,33)

P – pressão atmosférica (Pa)

ρ – massa volúmica (kg/m³)

Para as condições normais de pressão e temperatura (*P* = 1,014×10⁵ Pa, *T* = 0 °C), o valor da massa volúmica do ar é igual a 1,293 kg/m³ obtendo-se um valor de velocidade de propagação da onda sonora *c* = 331 m/s.

Considerando a equação dos gases perfeitos (*PV* = *nRT*), e a partir do conceito de massa volúmica do ar, é possível expressar a Equação (1.3) apenas em função da temperatura:

$$c = 331 + 0,6 \times T \quad (1.4)$$

Onde:

c – velocidade de propagação do som no ar (m/s)

T – temperatura do ar (°C)

Assim, para uma temperatura de 20 °C, a velocidade de propagação de uma onda longitudinal no ar é de cerca de 343 m/s.

A velocidade de propagação do som no ar depende igualmente da humidade relativa (aumentando como seu incremento, embora a variação seja reduzida), já que o peso molecular médio do ar diminui com a presença de água (Figura 1.5), diminuindo assim o valor da massa volúmica na Equação (1.3).

² Um processo é considerado adiabático se as trocas térmicas entre pontos com valores de temperatura distintos forem desprezáveis.

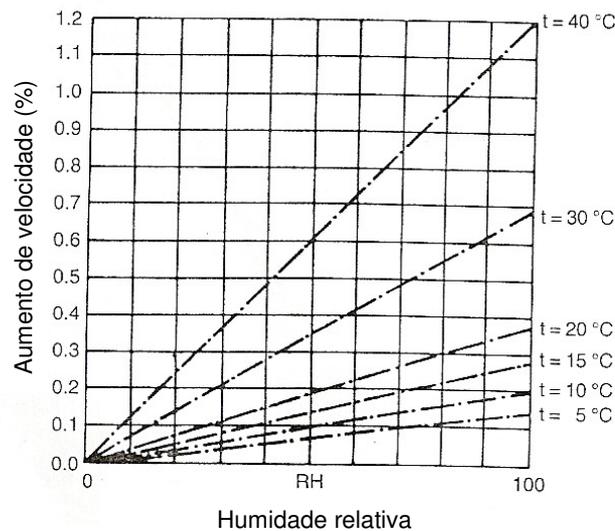


Figura 1.5 – Aumento da velocidade de propagação do som no ar (em %) com a humidade relativa (Arau 1999)

No caso de um líquido ou de um sólido, a velocidade de propagação das ondas longitudinais pode ser obtida mediante a substituição, na Equação (1.2), do termo relativo à elasticidade do meio, ou seja, pelo módulo de compressibilidade volumétrico num líquido (igualmente utilizado no caso de um gás), e pelo módulo de Young num sólido.

Tabela 1.1 – Velocidade de propagação no som em diversos meios sólidos, líquidos e gasosos (adaptado de Henrique 2002)

Meio	Velocidade (m/s)	Meio	Velocidade (m/s)
GASES		SÓLIDOS	
Ar (0°C)	331	Aço	5050
Ar (20°C)	343	Alumínio	5240
Azoto (0°C)	334	Chumbo	1250
Dióxido de Carbono (0°C)	259	Cobre	3580
Hélio	965	Ferro	5170
Hidrogénio (0°C)	1280	Granito	3950
LÍQUIDOS		Latão	3420
Água (17°C)	1430	Madeira (carvalho)	4100
Água do mar (17°C)	1510	Ouro	2030
Álcool etílico (20°C)	1170	Prata	2640
Benzeno (20°C)	1320	Prata alemã	3580
Glicerina	1920	Vidro (quartzo)	5370
Mercúrio (20°C)	1450		

1.1.3 Comprimento de Onda, Período, Frequência, Tipos de Sons

O comprimento de onda (λ) corresponde à mínima distância percorrida pela onda entre dois estados equivalentes de vibração (por exemplo pressão máxima), ou, de forma equivalente, a distância que é percorrida pela onda em cada ciclo completo de vibração (duas frentes de onda consecutivas) (Figura 1.6).

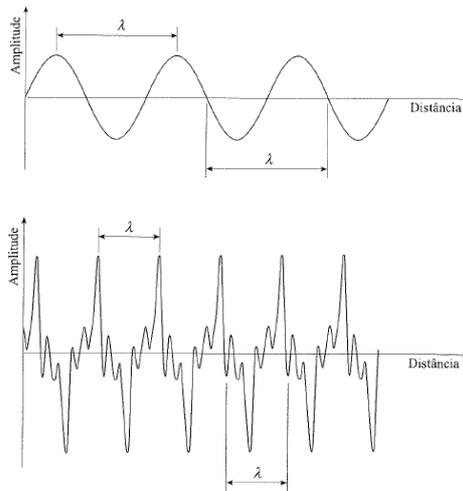


Figura 1.6 – Comprimento de onda de um som puro e de um som complexo (mas em ambos os casos sons periódicos) (Henrique 2002)

Conhecendo o comprimento de onda (λ) e a velocidade de propagação (c), é possível calcular o tempo que a onda demora a percorrer uma distância equivalente ao comprimento de onda, grandeza que se denomina período (T) (Equação (1.5)).

$$T = \frac{\lambda}{c} \quad (1.5)$$

Onde:
 T – período (s)
 λ – comprimento de onda (m)
 v – velocidade de propagação do som no ar (m/s)

O inverso do período, isto é, o número de vezes que um ciclo completo de vibração ocorre por unidade de tempo, é designado por frequência (f) (Equação (1.6)).

$$f = \frac{1}{T} \quad (1.6)$$

Onde:
 f – frequência (Hz ou s^{-1})
 T – período (s)

A unidade utilizada para caracterizar a frequência é o Hertz (Hz), que é equivalente ao número de ciclos por segundo (s^{-1}).

Com base nas equações apresentadas é possível estabelecer uma relação entre a frequência e o comprimento de onda, em função da velocidade de propagação da onda:

$$\lambda f = c \quad (1.7)$$

Onde:

λ – comprimento de onda (m)

f – frequência (Hz)

c – velocidade de propagação do som no ar (m/s)

A relação entre frequência e comprimento de onda é intuitiva – quanto maior é a frequência, menor é o comprimento de onda – pois quanto maior o número de vezes que se completa um ciclo, em determinado intervalo de tempo, menor será a distância existente entre esses ciclos (já que a velocidade da onda sonora é constante). Pode portanto afirmar-se que a frequência e o comprimento de onda são inversamente proporcionais.

Sob um ponto de vista subjectivo a frequência de um som relaciona-se com uma característica designada por altura tonal³. Assim, um som com uma frequência elevada denomina-se de agudo, e com uma frequência reduzida denomina-se de grave (Figura 1.7). Em aplicações correntes é usual distinguir-se três grandes zonas:

- Sons graves: 20 a 355 Hz (baixas frequências);
- Sons médios: 355 a 1410 Hz (médias frequências);
- Sons agudos: 1410 a 20000 Hz (altas frequências).

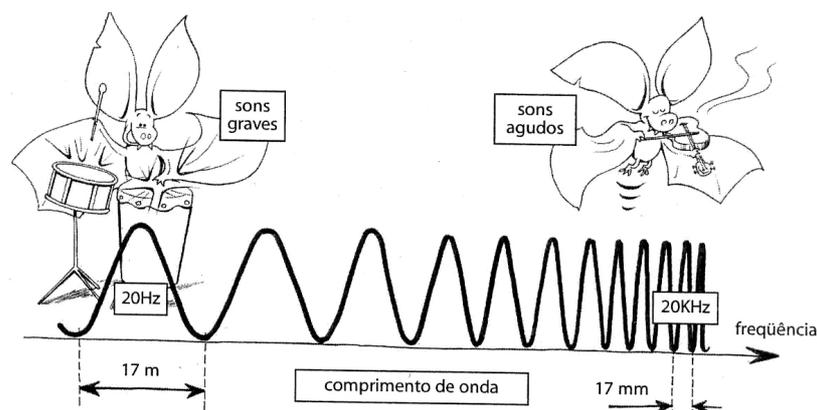


Figura 1.7 – Sons graves e sons agudos (Souza et al. 2003)

³ Uma outra característica subjectiva importante é o timbre, que nos permite distinguir por exemplo um som com a mesma frequência emitido por um piano ou por um violino e que é determinado pelo número e amplitude dos harmónicos do som fundamental (frequência igual a um múltiplo inteiro do seu valor).

O conceito de frequência é ainda útil para classificar um som como puro ou complexo. Um som puro (ou sinusoidal) apresenta uma única frequência enquanto um som complexo é constituído pela sobreposição de dois ou mais sons puros (Figura 1.8) (embora possa continuar a ser periódico, ver exemplo da Figura 1.6).

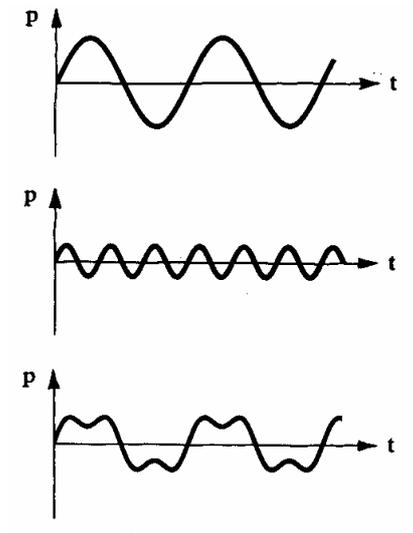


Figura 1.8 – Som puro (1.º e 2.º caso), e som complexo (3.º caso) originado pelo somatório dos dois sons puros (Carvalho 2004)

No caso de um som (ou ruído) corrente, tem-se normalmente um som complexo contendo portanto diversas frequências, sendo caracterizado pelo espectro sonoro, que consiste na representação da variação da amplitude da pressão sonora em função da frequência.

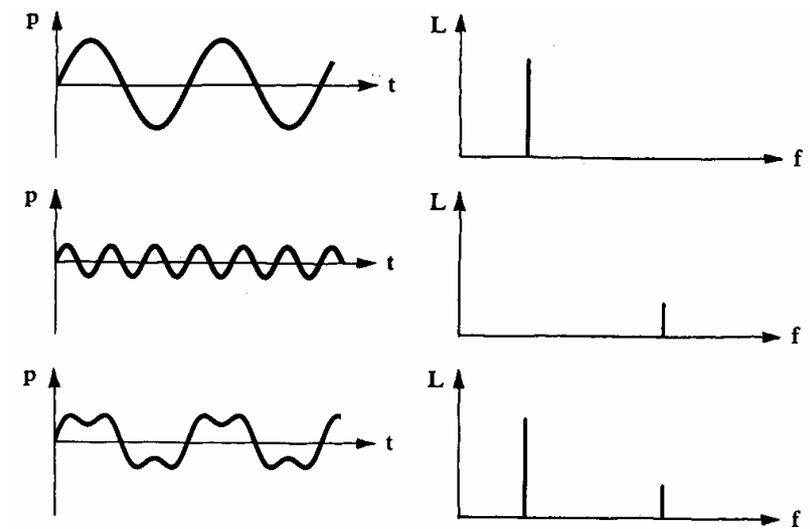


Figura 1.9 – Espectro sonoro de dois sons puros e um som complexo (Carvalho 2004)

Combinando os conceitos de altura e de espectro sonoro, apresentam-se na Figura 1.10 alguns exemplos de fontes sonoras (ou de ruído), verificando-se, por exemplo, que o espectro de emissão de um navio se situa predominantemente na zona dos sons graves, enquanto que no caso de um violino se concentra na zona dos sons médios e agudos.

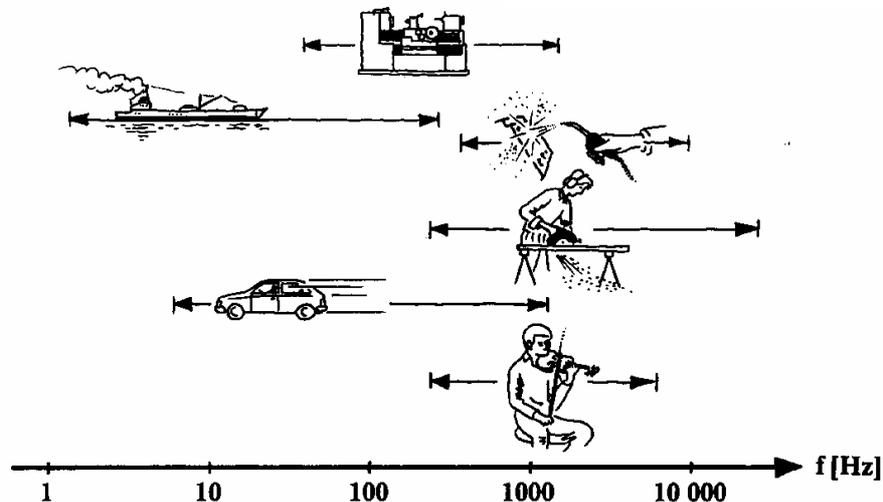


Figura 1.10 – Exemplos de espectros de emissão de fontes sonoras típicas (Carvalho 2004)

1.1.4 Gama Audível de Frequências, Bandas de Frequências

O ouvido humano (em condições normais) consegue distinguir frequências entre os 20 Hz e os 20 kHz, constituindo esta a gama audível de frequências. Abaixo desta gama situam-se os infra-sons e acima os ultra-sons (Figura 1.11). Apesar de normalmente não serem incluídos em análises de problemas de ruído, diversos estudos demonstram que exposições prolongadas a níveis elevados situados nestas gamas de frequências (infra-sons e ultra-sons) podem dar origem a perturbações graves no Homem.

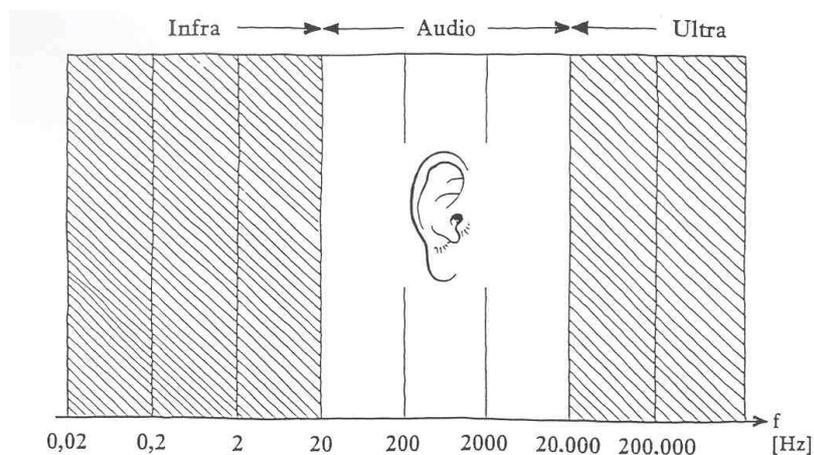


Figura 1.11 – Gama de frequências audível para o indivíduo padrão (Carvalho 2004)

À medida que a frequência de uma onda sonora aumenta, é necessária uma variação cada vez maior para se produzir variação equivalente na sensação auditiva (altura tonal). Assim, e ainda que de uma forma simplista, pode dizer-se que a variação da sensação de altura tonal varia com a frequência de acordo com uma lei logarítmica.

Por outro lado, uma análise de todas as frequências que compõem um dado estímulo sonoro seria pouco prática, interessando, por isso, agrupá-las em intervalos de dimensão normalizada que se designam por bandas de frequências.

Em Acústica Musical, o intervalo que separa um som com uma determinada frequência doutro cuja frequência é o dobro da primeiro designa-se por oitava (por exemplo intervalo entre o Lá central do piano com uma frequência de 440 Hz e a nota Lá uma oitava acima – 880 Hz).

O intervalo de oitava é também o mais utilizado em Acústica Ambiental e de Edifícios, sendo as bandas de frequência com esta largura designadas por bandas de 1/1 oitava. No caso de análises mais detalhadas de um dado estímulo sonoro é ainda vulgar recorrer-se a bandas com a largura de 1/3 oitava (uma banda de 1/1 oitava contém 3 bandas de 1/3 oitava).

Uma banda de frequências é constituída por uma frequência central (utilizada para designar a respectiva banda) e por duas frequências que definem os limites inferior e superior da banda. A frequência central de uma banda de frequências de qualquer largura corresponde à média geométrica da banda (Equação (1.8)).

$$\frac{f_c}{f_1} = \frac{f_2}{f_c} \Rightarrow f_c = \sqrt{f_1 f_2} \quad (1.8)$$

Onde:

f_c – frequência central da banda de frequências (Hz)

f_1 – frequência que define o limite inferior da banda de frequências (Hz)

f_2 – frequência que define o limite superior da banda de frequências (Hz)

Por sua vez, os limites de cada banda devem respeitar a Equação (1.9).

$$\log_2 \left(\frac{f_2}{f_1} \right) = \frac{1}{k} \Rightarrow \frac{f_2}{f_1} = 2^{1/k} \quad (1.9)$$

Onde:

$k = 1$ no caso de bandas de frequências de 1/1 oitava

$k = 3$ no caso de bandas de frequências de 1/3 oitava

Se o objectivo for determinar o número de bandas (com uma determinada largura) existentes entre duas frequências distintas, então pode ser utilizada a Equação (1.10).

$$\frac{f_2}{f_1} = 2^{n/k} \quad (1.10)$$

Onde:
n – número de bandas existentes entre duas frequências
k = 1 no caso de bandas de frequências de 1/1 oitava,
k = 3 no caso de bandas de frequências de 1/3 oitava

A partir das Equações (1.8) a (1.10) é possível derivar as relações apresentadas na Figura 1.12. Na mesma figura encontra-se também definida uma expressão geral para a quantificação da largura de uma dada banda de frequências em função da sua frequência central (no caso da figura a frequência central é designada por f_0).

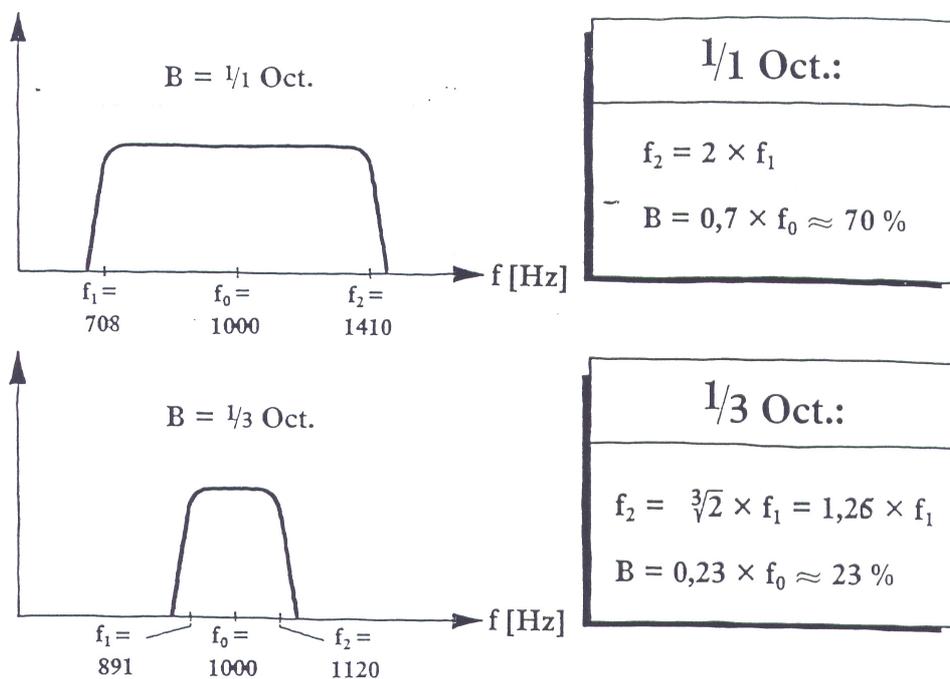


Figura 1.12 – Definições típicas das bandas de frequências de 1/1 oitava e de 1/3 oitava, com um exemplo para uma banda centrada na frequência de 1000 Hz

A título informativo apresentam-se na Tabela 1.2 os valores das frequências centrais das várias bandas de frequências de 1/1 oitava existentes entre os 16 Hz e os 31500 Hz, incluindo as respectivas bandas de 1/3 oitava.

Tabela 1.2 – Frequências centrais das bandas de frequências de 1/1 oitava entre os 16 Hz e os 31500 Hz, incluindo as respectivas bandas de 1/3 oitava (adaptado de Henrique 2003)

Frequência central (Hz)		Frequência central (Hz)	
1/1 oitava	1/3 oitava	1/1 oitava	1/3 oitava
16	12,5 16 20	1000	800 1000 1250
31,5	25 31,5 40	2000	1600 2000 2500
63	50 63 80	4000	3150 4000 5000
125	100 125 160	8000	6300 8000 10000
250	200 250 315	16000	12500 16000 20000
500	400 500 630	31500	25000 31500 40000

1.1.5 Pressão Sonora Eficaz, Impedância Acústica Específica

Referiu-se atrás que a variação da pressão sonora no caso de um som puro será do tipo sinusoidal. No entanto, para aplicações práticas interessa possuir um valor de pressão sonora constante que seja representativo do mesmo efeito do sinal variável, conhecido por valor eficaz (aplicável também a sinais não periódicos, bem como a inúmeras grandezas físicas). Assim, a pressão sonora eficaz (também denominada de pressão rms, abreviatura para “root mean square”) é obtida de acordo com a Equação (1.11).

$$p_{rms} = \left(\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.11)$$

Onde:

p_{rms} – pressão sonora eficaz (Pa)

$t_2 - t_1$ – intervalo de tempo de variação da pressão sonora p

No caso de um som puro (onda sinusoidal) é possível relacionar a pressão eficaz com a pressão máxima através da Equação (1.12).

$$p_{rms} = \frac{p_{m\acute{a}x}}{\sqrt{2}} \quad (1.12)$$

Onde:

p_{rms} – pressão sonora eficaz (Pa)

$p_{m\acute{a}x}$ – pressão máxima (Pa)

Outro conceito fundamental no estudo da Acústica Ambiental e de Edifícios é o de impedância acústica específica. De uma forma geral pode dizer-se que o conceito de impedância traduz o grau de resistência que um determinado meio opõe ao movimento. No caso de dois meios diferentes possuírem valores de impedância semelhantes, uma onda que se propague de um meio para o outro transfere-se praticamente sem reflexão, enquanto que se as impedâncias forem substancialmente díspares se produz reflexão da onda sonora (por exemplo o fenómeno da reflexão de uma onda sonora numa parede).

Apesar de existirem vários conceitos distintos de impedância úteis em Acústica (por exemplo impedância mecânica, impedância acústica e impedância acústica específica), neste ponto apresenta-se apenas o de impedância acústica específica já que possui um maior interesse no âmbito de aplicações correntes de Acústica Ambiental e de Edifícios.

A impedância acústica específica define-se como o quociente entre a pressão sonora e a velocidade das partículas do meio (note-se que não se trata da velocidade de propagação do som no ar) (Equação (1.13)).

$$Z = \frac{p}{v} \quad (1.13)$$

Onde:

Z – impedância acústica específica (Ns/m^3)

p – pressão sonora (Pa)

v – velocidade das partículas no meio (m/s)

A unidade da impedância acústica específica no Sistema Internacional é designada “rayl”, em homenagem aos importantes trabalhos do cientista Lord Rayleigh. No caso de uma onda sonora plana é possível demonstrar que o valor da impedância acústica específica é dado por:

$$Z = \rho c \quad (1.14)$$

Onde:

Z – impedância acústica específica (rayl) ($1 \text{ rayl} = 1 \text{ Ns/m}^3$)

ρ – massa volúmica (kg/m^3)

c – velocidade de propagação do som (m/s)

No caso do ar, e para temperaturas correntes em edifícios, a impedância acústica específica pode ser considerada igual a 410 rayl.

1.1.6 Intensidade Sonora e Potência Sonora

A intensidade sonora instantânea traduz a quantidade de energia sonora que atravessa, na unidade de tempo, uma área de superfície unitária perpendicular à direcção de propagação da onda sonora (Equação (1.15) e Figura 1.13).

$$I_i = \frac{E}{S t} \quad (1.15)$$

Onde:

I_i – intensidade sonora instantânea (W/m^2)

E – energia sonora (J)

t – unidade de tempo (s)

S – unidade de área (m^2)

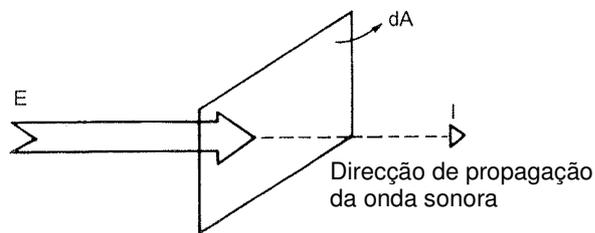


Figura 1.13 – Ilustração do conceito de intensidade sonora instantânea (Arau 1999)

Assim no caso de uma onda sonora plana o valor da intensidade sonora pode ser estimado através da Equação (1.16).

$$I = \frac{p_{rms} S dx}{S dt} = p_{rms} v_{rms} \quad (1.16)$$

Onde:

I – intensidade sonora (W/m^2)

S – unidade de área (m^2)

p_{rms} – pressão sonora eficaz (Pa)

v_{rms} – velocidade eficaz (m/s)

Atendendo às Equações (1.13) e (1.14), e com base na Equação (1.16), conclui-se que (para ondas sonoras planas):

$$I = \frac{p_{rms}^2}{\rho c} \quad (1.17)$$

Onde:

I – intensidade sonora (W/m^2)

p_{rms} – pressão sonora eficaz (Pa)

ρ – massa volúmica (kg/m^3)

c – velocidade de propagação do som (m/s)

A potência sonora traduz a quantidade de energia (sonora) emitida por uma fonte por unidade de tempo (Equação (1.18)).

$$W = \frac{E}{t} = I S \quad (1.18)$$

Onde:

W – potência sonora (W)

E – energia sonora (J)

t – unidade de tempo (s)

I – intensidade sonora (W/m^2)

S – unidade de área (m^2)

O interesse associado ao conceito de potência sonora é facilmente compreendido recorrendo a uma analogia com a térmica. Um aquecedor eléctrico produz uma determinada quantidade de energia por unidade de tempo ($J/s = W$). Este parâmetro permite avaliar a quantidade de calor que o aquecedor pode produzir, independentemente do local onde ele está instalado.

No entanto, e apesar da quantidade de energia calorífica libertada pelo aparelho ser constante e independente do local onde este se encontra, a temperatura do local vai ser distinta em função, entre outros parâmetros, da quantidade de calor absorvida pela envolvente construtiva e da quantidade de calor transmitida pelas paredes e janelas para o exterior.

De forma similar à relação potência térmica/temperatura interior, pode ser estabelecida uma relação entre a potência sonora/pressão sonora num determinado ponto da sala, variando esta sobretudo com a quantidade de energia sonora absorvida pela envolvente construtiva e com a quantidade de energia sonora transmitida para o exterior (Figura 1.14). Assim, se, por exemplo, se caracterizar a emissão de ruído de um equipamento electromecânico através do parâmetro potência sonora, podem-se utilizar os seus valores em qualquer espaço (interior ou exterior) para a avaliação da pressão sonora (em função das características da respectiva envolvente).

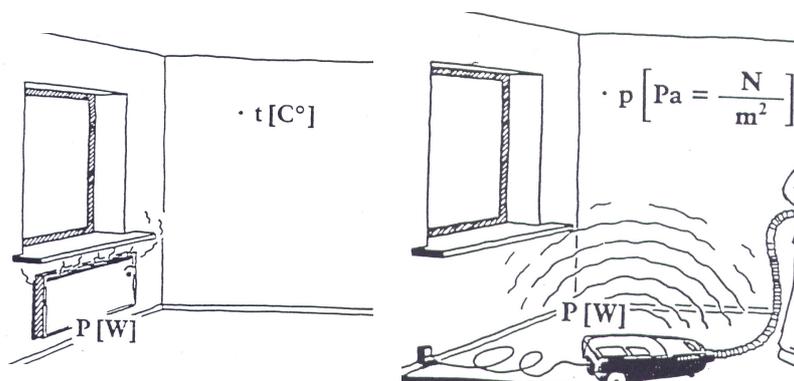


Figura 1.14 – Analogia entre pressão térmica e pressão sonora (Carvalho 2004)

1.1.7 Conceito de Nível

Tal como para a variação da altura tonal para o parâmetro frequência, também para a pressão sonora a sensação auditiva não varia linearmente com o aumento da pressão, mas de uma forma aproximadamente logarítmica. Por outro lado, e tal como já referido, a gama audível de pressão sonora varia para um indivíduo normal, entre cerca de 20 μPa e 100 Pa, o que para efeitos de utilização corrente se revela pouco prático.

Combinando os dois aspectos referidos, justifica-se em aplicações de Acústica Ambiental e de Edifícios o recurso ao conceito de nível (utilizado também em inúmeras aplicações fora do domínio da Acústica), que traduz a relação entre um valor de uma determinada grandeza e um valor de referência dessa grandeza, numa escala logarítmica (Equação (1.19)), exprimindo-se numa unidade designada por “Bel” (em homenagem ao cientista Alexander Graham Bell).

$$L_G = \log \left(\frac{G}{G_0} \right) \quad (1.19)$$

Onde:

L_G – nível da grandeza G (Bel)

G – valor medido

G_0 – valor de referência

As grandezas que em Acústica Ambiental e de Edifícios se definem habitualmente recorrendo ao conceito de nível são a pressão sonora (p), intensidade sonora (I) e potência sonora (W), sendo expressas numa unidade correspondente à décima parte do Bel, designada decibel (dB).

$$L_p = 10 \log \left(\frac{p^2}{p_0^2} \right) = 20 \log \left(\frac{p}{p_0} \right) \quad (1.20)$$

Onde:

L_p – nível de pressão sonora (dB)

p – pressão sonora (N/m^2)

p_0 – pressão sonora de referência ($20 \times 10^{-6} \text{ N/m}^2$), correspondente ao limiar da audição humana

$$L_I = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (1.21)$$

Onde:

L_I – nível de intensidade sonora (dB)

I – intensidade sonora (W/m^2)

I_0 – intensidade sonora de referência ($1 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$), correspondente ao limiar da audição humana

$$L_w = 10 \log \left(\frac{W}{W_0} \right) \quad (1.22)$$

Onde:

L_w – nível de potência sonora (dB)

W – potência sonora (W)

W_0 – pressão sonora de referência (1×10^{-12} W), correspondente ao limiar da audição humana

Note-se que através da aplicação da Equação (1.20), no caso do valor da pressão sonora ser igual ao limiar da audição humana (valor de referência), o correspondente nível de pressão sonora L_p será igual a zero. Para um valor de $p = 100$ Pa (limiar da dor), $L_p = 134$ dB. Na Figura 1.15 ilustra-se a comparação entre duas grandezas.

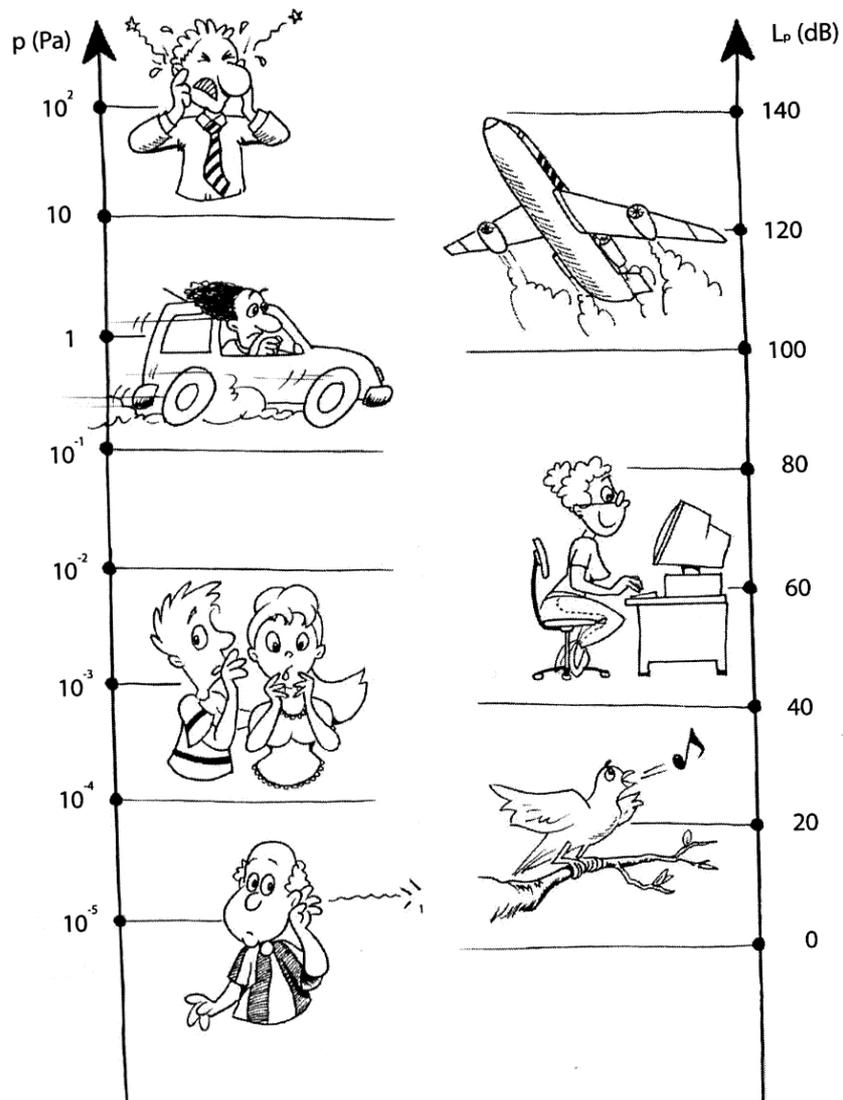


Figura 1.15 – Comparação entre pressão sonora (p) e nível de pressão sonora (L_p) (Souza et al. 2003)

1.1.8 Combinação de Níveis de Pressão Sonora

Adição de Níveis de Pressão Sonora

No caso de duas ou mais fontes sonoras actuarem sobre um determinado ponto receptor com valores de pressão sonora (eficaz) p_i , então a adição do seu efeito não poderá ser efectuada de uma forma linear, mas de acordo com a Equação (1.23)⁴.

$$p_t^2 = p_1^2 + p_2^2 + \dots + p_n^2 \quad (1.23)$$

Onde:

p_t – pressão sonora total eficaz (dB)

p_i – pressão sonora eficaz resultante da fonte i (dB)

Logo o nível de pressão sonora resultante da adição de várias fontes será (Equação (1.24)):

$$L_p = 10 \log \left(\frac{p_1^2 + p_2^2 + \dots + p_n^2}{p_0^2} \right) \quad (1.24)$$

Onde:

L_p – nível de pressão sonora total (dB)

p_0 – pressão sonora de referência (dB)

p_i – pressão sonora eficaz da resultante da fonte i (dB)

A Equação (1.24) pode ser também formulada em função dos níveis de pressão sonora resultantes de cada fonte sonora (Equação (1.25)).

$$L_p = 10 \log \left(10^{\frac{L_{p1}}{10}} + 10^{\frac{L_{p2}}{10}} + \dots + 10^{\frac{L_{pn}}{10}} \right) = 10 \log \left(\sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{pi}}{10}} \right) \quad (1.25)$$

Onde:

L_p – nível de pressão sonora total

L_{pi} – nível de pressão sonora resultante da fonte i

A adição de níveis de pressão sonora é vulgarmente utilizada para a determinação do nível de pressão sonora total de um ruído complexo, no caso de se possuir uma descrição desse ruído por bandas de frequência. Isto é, o nível de pressão sonora total de um ruído com conteúdo espectral (bandas de 1/1 oitava) entre os 125 Hz e os 4000 Hz poderá ser igualmente obtido através da aplicação da Equação (1.25), correspondendo L_{p1} , L_{p2}, \dots , L_{pn} , neste caso concreto a $L_{125\text{Hz}}$, $L_{250\text{ Hz}}$, \dots , $L_{4000\text{ Hz}}$.

⁴ Válida para o caso geral de ondas sonoras incoerentes; no caso de ondas coerentes (tonais e com a mesma frequência) a relação de fase entre ambas necessita ser considerada (situação no entanto muito rara em aplicações práticas).

Da mesma forma, o nível de pressão sonora de uma banda de frequências de 1/1 oitava pode ser obtido mediante a soma das três bandas de 1/3 de oitava que a constituem (Figura 1.16).

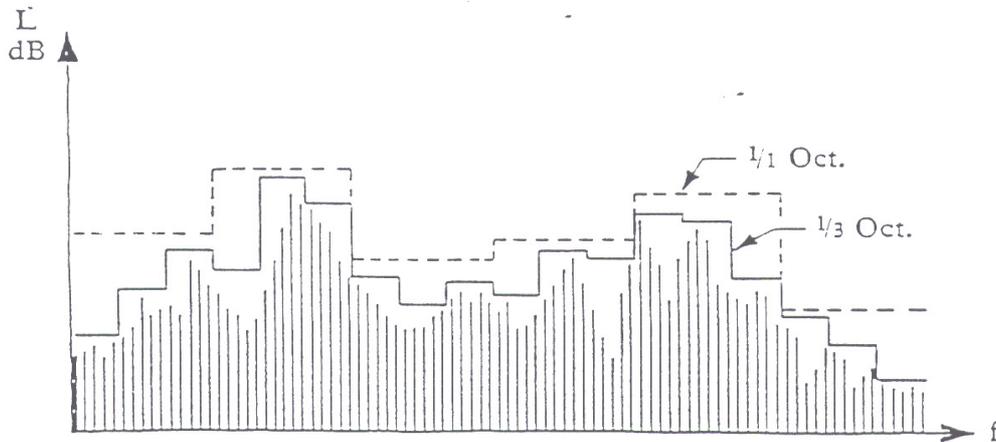


Figura 1.16 – Adição dos níveis de pressão sonora em bandas de 1/3 oitava para a obtenção do respectivo valor para uma banda de 1/1 oitava (Carvalho 2004)

A Equação (1.25) permite também somar níveis de intensidade sonora ou de potência sonora.

Subtracção de Níveis de Pressão Sonora

Por vezes é conhecido o nível de pressão sonora total devido ao funcionamento de várias fontes e pretende-se saber o valor relativo a apenas uma das fontes. Um exemplo deste tipo de situação seria a medição do ruído particular emitido por um equipamento numa indústria, na presença do ruído provocado pelo funcionamento dos demais equipamentos (ruído de fundo).

Neste tipo de situação não seria razoável proceder à interrupção da laboração de todos os equipamentos da indústria para medir o equipamento em causa, se esse valor pudesse ser calculado indirectamente apenas com a paragem do próprio equipamento. Para tal, e com base nos mesmos pressupostos referidos nos casos anteriores, pode recorrer-se à Equação (1.26).

$$L_{p1} = 10 \log \left(10^{\frac{L_{pt}}{10}} - 10^{\frac{L_{p2}}{10}} \right) \quad (1.26)$$

Onde:

L_{p1} – nível de pressão sonora relativo à fonte sonora em análise (dB)

L_{pt} – nível de pressão sonora total (dB)

L_{p2} – nível de pressão sonora resultante sem a fonte sonora em análise (dB)

A Equação (1.26) permite também subtrair níveis de intensidade sonora ou de potência sonora.

1.1.9 Fenómenos de Absorção, Reflexão, Difusão, Difracção, Refracção

Existem diversos fenómenos que envolvem a interacção das ondas sonoras com o meio que as rodeia e que importa apresentar. Neste ponto apenas se efectua uma descrição qualitativa dos fenómenos, uma vez que a sua análise quantitativa é invariavelmente complexa.

Absorção / Reflexão / Difusão

Quando uma onda sonora encontra um obstáculo de grandes dimensões comparativamente ao seu comprimento de onda, parte da energia sonora é absorvida⁵ e a restante é reflectida (na realidade também se verifica a transmissão de energia sonora, que neste caso se considera ser desprezável). Caso a onda sonora incida perpendicularmente no obstáculo, irá ocorrer apenas uma mudança de sentido (Figura 1.17). Se a incidência não for perpendicular, então a onda sonora reflectida terá uma direcção distinta da inicial.

Admitindo que a onda sonora pode ser tratada como um raio sonoro perpendicular à frente de onda (assumpção válida em função da relação de dimensões atrás referida, tipicamente para as médias e altas frequências, considerando superfícies interiores de edifícios), se a superfície de reflexão for totalmente plana, poderá então afirmar-se que o ângulo de incidência será igual ao ângulo de reflexão (Lei de Descartes) (Figura 1.17).

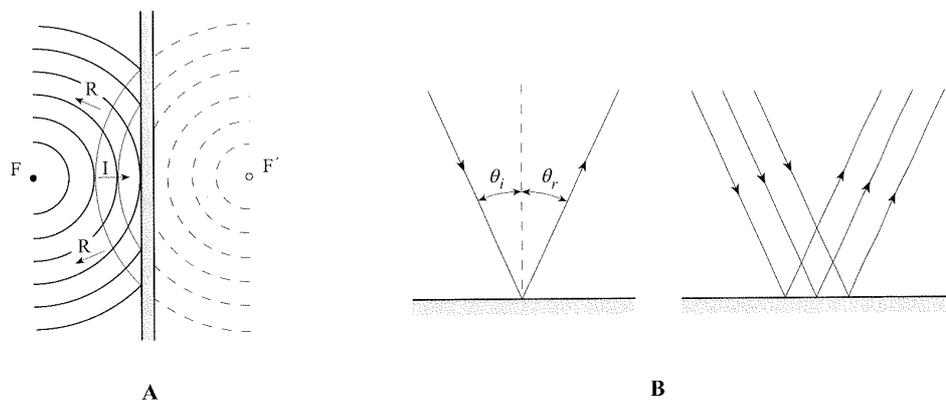


Figura 1.17 – Ilustração da reflexão de uma onda sonora ao incidir num obstáculo (de grandes dimensões) de forma perpendicular e oblíqua (Henrique 2002)

Caso a superfície possua irregularidades com uma dimensão próxima do comprimento de onda incidente, então a energia da onda sonora será reflectida para múltiplas direcções – fenómeno de difusão sonora (Figura 1.18).

⁵ O fenómeno de absorção sonora é discutido com maior detalhe no Capítulo 2.

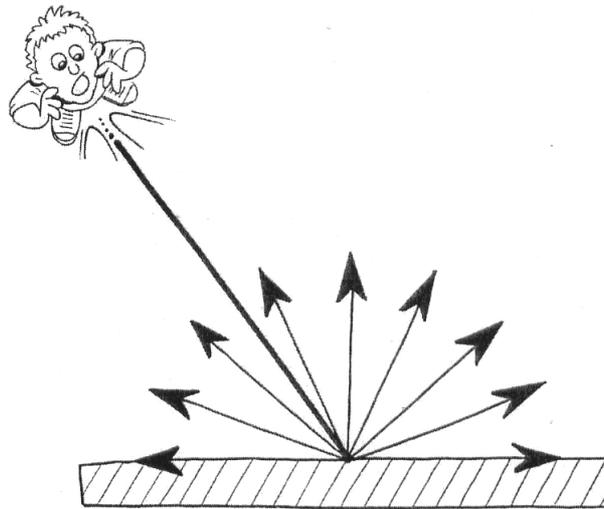


Figura 1.18 – Ilustração do fenómeno de difusão sonora (note-se que este fenómeno não ocorre em superfícies planas, o esquema é apenas indicativo do redireccionamento da energia sonora e não da forma da superfície) (Souza et al. 2003)

Difracção

Dado que os obstáculos que uma onda sonora encontra possuem dimensão finita, verifica-se que no caso da dimensão do obstáculo e o comprimento da onda sonora serem da mesma ordem de grandeza, que aquela pode “contornar” o obstáculo junto aos seus limites (embora a propagação sonora nessa zona se processe com menor intensidade) – fenómeno encontrado com frequência por exemplo em barreiras acústicas colocadas no exterior (Figura 1.19) e denominado de difracção sonora.

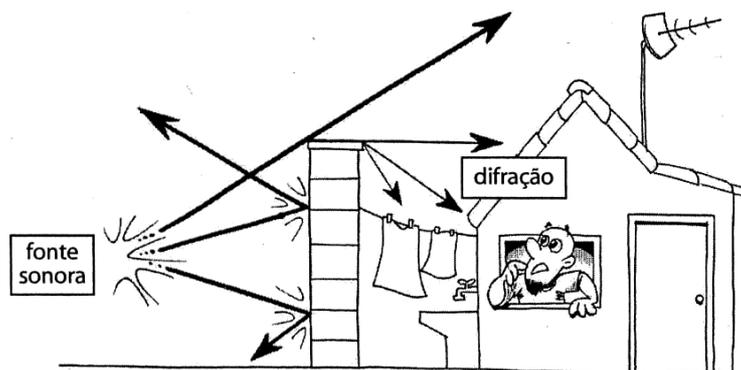


Figura 1.19 – Difracção sonora em torno de uma barreira acústica (Souza et al. 2003)

Assim, quando uma onda sonora de elevada frequência (comprimento de onda reduzido) encontra um obstáculo reflecte-se mais facilmente do que uma onda de baixa frequência (comprimento de onda elevado). Na Figura 1.20 ilustra-se a influência do valor do comprimento de onda no efeito provocado por um obstáculo ou por uma abertura (ambos com uma dada dimensão) na propagação da onda sonora.

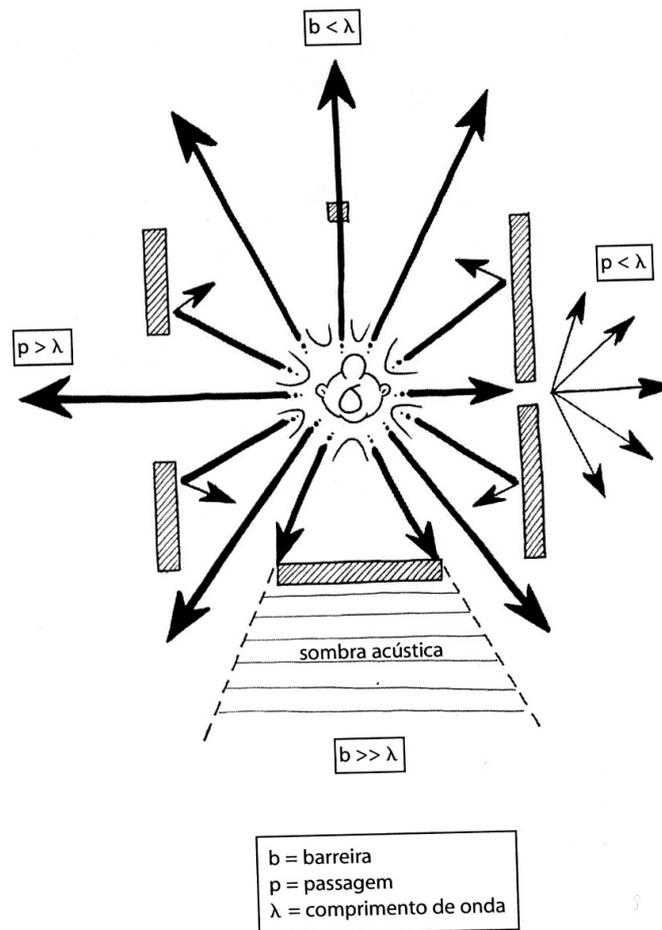


Figura 1.20 – Influência da relação entre o comprimento de onda e o tamanho de um obstáculo ou de uma abertura na propagação de uma onda sonora (Souza et al. 2003)

Com base na Figura 1.20, pode dizer-se, como regra geral, que um obstáculo cuja dimensão é substancialmente superior ao comprimento de onda potencia um efeito de barreira (sombra acústica) na propagação sonora, ao passo que um obstáculo de reduzida dimensão não terá qualquer efeito nessa propagação.

Do mesmo modo se uma abertura possui uma dimensão reduzida face ao comprimento de onda, então o seu efeito será como o de uma nova fonte sonora a radiar nesse ponto. Caso a dimensão da abertura seja superior ao comprimento de onda, o seu efeito será nulo.

Refração

O fenómeno de refração ocorre quando durante o percurso da onda sonora a sua velocidade é alterada, resultado da passagem para um meio de propagação distinto ou simplesmente da alteração da velocidade de propagação no meio inicial.

Como a velocidade de propagação do som no ar varia com a temperatura, então a ocorrência de variações da temperatura do ar com a altitude irá provocar a refração das ondas sonoras. Num caso em que a temperatura do ar aumente com a altitude (por exemplo uma manhã de Inverno com a temperatura junto ao solo muito baixa), verifica-se um encurvamento das ondas sonoras na direcção do solo (Figura 1.21), provocando o aumento do nível de pressão sonora junto ao solo. No caso contrário, ocorre uma deflexão da onda sonora na direcção oposta, resultando numa diminuição do nível de pressão sonora junto ao solo.

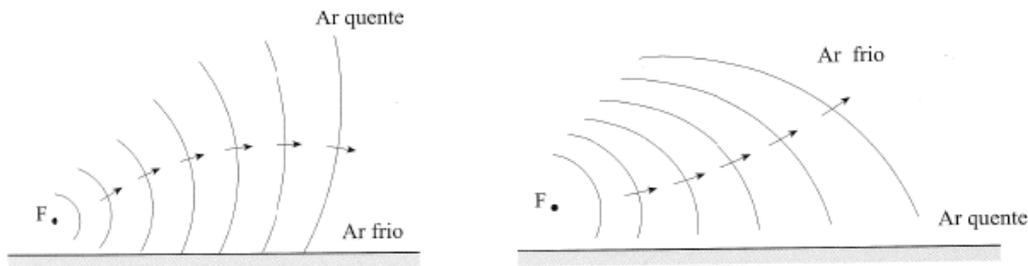


Figura 1.21 – Efeito de refração por acção de gradientes verticais da temperatura do ar (Henrique 2002)

O fenómeno de refração é igualmente frequente devido à acção do vento. Como a velocidade do vento geralmente aumenta com a altitude, então a velocidade efectiva de propagação do som no ar irá também ser alterada. No caso do vento soprar no mesmo sentido de propagação da onda sonora, a velocidade da onda sonora aumentará com a altitude, traduzindo-se num efeito de encurvamento similar ao anterior. Numa situação inversa ter-se-á uma deflexão da onda sonora, com a criação de uma zona de sombra (Figura 1.22).

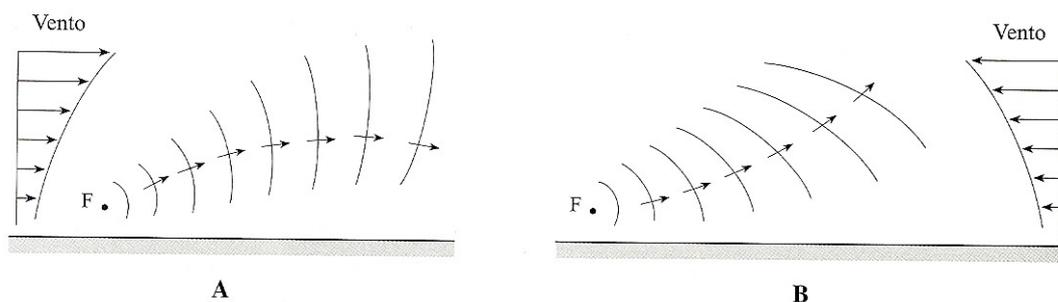


Figura 1.22 – Efeito de refração por acção do vento; A – se o som se propaga na mesma direcção do vento, a frente de onda encurva-se para o solo; B – Quando o som se propaga contra o vento, a frente de onda encurva-se para cima (Henrique 2002)

Na realidade o fenómeno de refração é originado simultaneamente por acção de gradientes verticais de temperatura e do vento, o que aumenta a complexidade da sua análise.

1.2 Fontes Sonoras

1.2.1 Fontes Sonoras Pontuais, Lineares e Planas

De uma forma geral podem distinguir-se três tipos de modelos de fontes sonoras: pontuais, lineares e planas, associadas respectivamente a ondas sonoras esféricas, cilíndricas e planas.

Fontes Sonoras Pontuais

Uma fonte sonora pontual corresponde conceptualmente a um ponto emitindo uma potência sonora constante em todas as direcções, originando uma onda sonora esférica (Figura 1.23). Por exemplo um equipamento electromecânico em funcionamento, desde que avaliado a uma distância suficiente face às suas dimensões, pode ser considerado uma fonte sonora pontual.

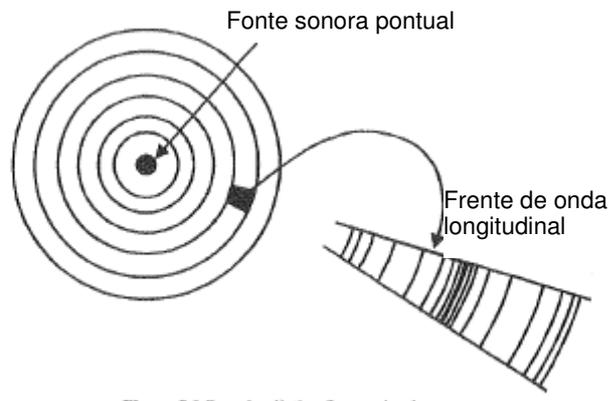


Figura 1.23 – Onda sonora esférica (Bies e Hansen 2003)

Assim, e, recordando que a intensidade sonora traduz a potência sonora que atravessa, numa direcção perpendicular, uma determinada área de superfície, tem-se para uma onda sonora esférica (recorde-se que a área da superfície da esfera é igual a $4\pi r^2$) (Figura 1.24):

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \quad (1.27)$$

Onde:

I – intensidade sonora (W/m^2)

W – potência sonora (W)

r – distância à fonte sonora (m)

Se a distância entre a superfície esférica e a fonte sonora duplicar ($r \rightarrow 2r$), então a intensidade sonora diminuirá para 1/4 do valor inicial, se triplicar diminuirá para 1/9 do valor inicial, e assim sucessivamente (Figura 1.25), ou seja a intensidade é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre a fonte e o ponto de recepção – lei do inverso do quadrado da distância.

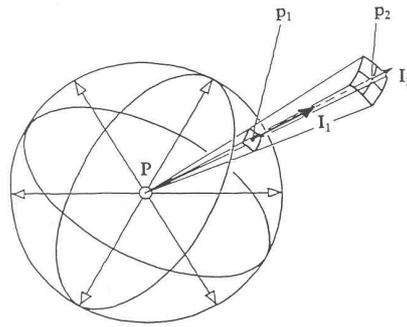


Figura 1.24 – Conceito de intensidade sonora para uma fonte sonora pontual (Carvalho 2004)

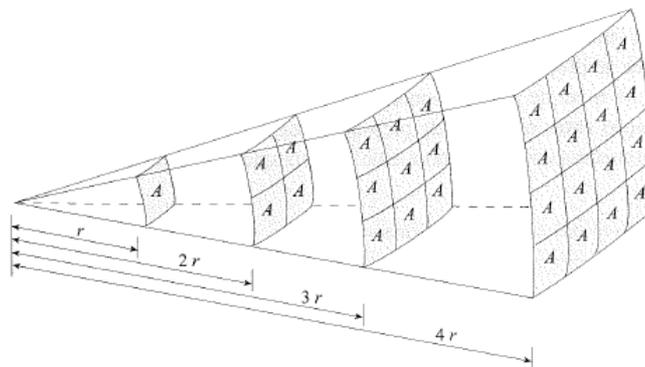


Figura 1.25 – Diminuição da intensidade sonora com a distância à fonte para uma onda sonora esférica (Henrique 2002)

Partindo da definição de nível de intensidade sonora L_I , e considerando igualmente a definição de nível de potência sonora L_W , tem-se:

$$L_I = 10 \log \left(\frac{W}{4 \pi r^2 10^{-12}} \right) = L_W - 20 \log(r) - 11 \quad (1.28)$$

Onde:

L_I – nível de intensidade sonora (dB)

W – potência sonora (W/m^2)

L_W – nível de potência sonora (dB)

r – distância à fonte sonora (m)

L_W – nível de potência sonora (dB)

Para uma distância suficiente⁶ à fonte sonora, o raio da curvatura de uma secção da frente de onda é suficientemente elevado de modo a que a onda possa ser considerada plana, sendo válida a Equação (1.17), e portanto, a relação $L_I = L_p$. Deste modo, o termo L_I na Equação (1.28) pode ser substituído por L_p (Equação (1.29)).

⁶ Pode ser avaliada com base na relação $2\pi r / \lambda \gg 1$ (Bies e Hansen 2003)

$$L_p = L_w - 20 \log(r) - 11 \quad (1.29)$$

Onde:

L_p – nível de pressão sonora (dB)
 L_w – nível de potência sonora (dB)
 r – distância à fonte sonora (m)

Esta equação permite calcular (em campo livre) o nível de pressão sonora a qualquer distância da fonte a partir do nível de potência sonora (por exemplo equipamento electromecânico), diminuindo o seu valor em 6 dB por duplicação da distância.

A Equação (1.29) pode igualmente ser utilizada para obter uma expressão muito útil na prática, pois permite traduzir o decréscimo do nível de pressão sonora por variação da distância.

$$\Delta L_p = 20 \log\left(\frac{r_1}{r_0}\right) \quad (1.30)$$

Onde:

ΔL_p – decréscimo no nível de pressão sonora (dB)
 r_i – distância à fonte sonora (m), com $r_1 > r_0$

Fontes Sonoras Lineares

Uma fonte sonora linear corresponde conceptualmente a um segmento de recta de grande dimensão constituído por um número de fontes pontuais muito próximas entre si emitindo uma potência sonora constante em todas as direcções, originando assim, a uma distância suficiente da fonte, uma onda sonora cilíndrica (Figura 1.26). Como exemplo de uma fonte sonora linear pode referir-se uma auto-estrada.

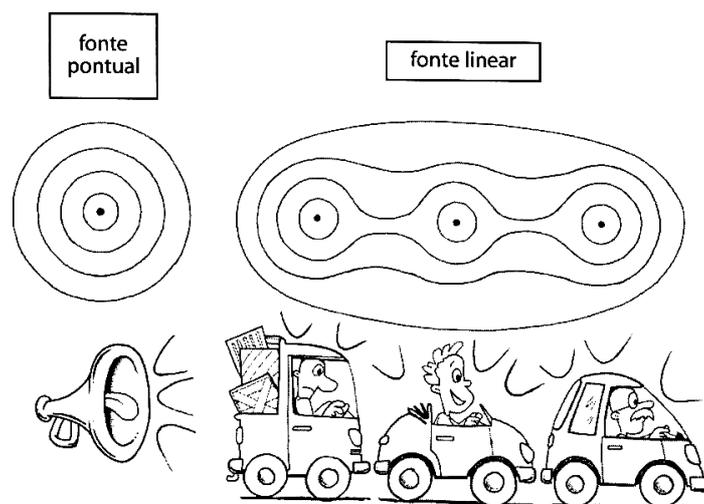


Figura 1.26 – Ilustração da diferença entre uma fonte sonora pontual e uma fonte sonora linear (Souza et al. 2003)

Por conseguinte neste caso a redução da intensidade sonora com a distância será proporcional ao aumento da área superficial do cilindro (Equação (1.31)).

$$I = \frac{W'}{2 \pi r} \quad (1.31)$$

Onde:

I – intensidade sonora (W/m^2)

W' – potência sonora linear (W/m)

r – distância à fonte sonora (m)

É possível estabelecer uma relação entre L_I e L_w (neste caso potência sonora por metro de desenvolvimento da fonte linear) admitindo novamente que os níveis de intensidade e de pressão sonora são equivalentes a uma distância razoável da fonte (Equação (1.32)).

$$L_p \cong L_I = 10 \log \left(\frac{W'}{2 \pi r 10^{-12}} \right) = L_{w'} - 10 \log(r) - 8 \quad (1.32)$$

Onde:

L_p – nível de pressão sonora (dB)

L_I – nível de intensidade sonora (dB)

W' – potência sonora linear (W/m)

r – distância à fonte sonora (m)

$L_{w'}$ – nível de potência sonora linear (dB/m)

Verifica-se assim que enquanto que no caso de uma fonte sonora pontual a duplicação de distância à fonte implica uma diminuição de 6 dB no nível de pressão sonora, numa fonte sonora linear esse valor reduz-se para 3 dB.

Da mesma forma que para as fontes pontuais, é possível para as fontes sonoras lineares relacionar o decréscimo do nível de pressão sonora por variação de distância (Equação (1.33)).

$$\Delta L_p = 10 \log \left(\frac{r_1}{r_0} \right) \quad (1.33)$$

Onde:

ΔL_p – decréscimo no nível de pressão sonora (dB)

r_i – distância à fonte sonora (m), com $r_1 > r_2$.

Fontes Sonoras Planas

A menos usual de todas as fontes é a fonte sonora plana. Um exemplo de uma fonte sonora plana é um pistão que trabalha no interior de um tubo, dando origem à propagação de ondas planas. Desde que não haja dissipação de energia sonora através das paredes do tubo, o fluxo de energia sonora ao longo do tubo é constante, e portanto a pressão sonora não depende da distância à fonte, apresentando o mesmo valor em qualquer ponto.

Por outras palavras, dir-se-á que no caso de uma fonte sonora plana o efeito de atenuação por divergência geométrica não se verifica.

1.2.2 Conceito de Direccionalidade

Contrariamente ao admitido no ponto anterior, a maioria das fontes sonoras reais não são omnidireccionais, isto é, não emitem a mesma energia sonora em todas as direcções. Assim na análise da emissão de uma dada fonte sonora importa caracterizar as suas características de radiação espacial, sendo para esse efeito comum o recurso a dois índices de caracterização:

- Coeficiente de Direccionalidade, Q ;
- Índice de Direccionalidade, D .

O coeficiente de direccionalidade Q de uma fonte sonora é definido como o quociente entre o valor da intensidade sonora (real) a uma dada distância da fonte, e a intensidade sonora que uma fonte omnidireccional com a mesma potência produziria nesse ponto (Equação (1.34)). O coeficiente de direccionalidade varia consoante a frequência da onda sonora (normalmente diminuindo à medida que a frequência aumenta).

$$Q = \frac{I}{I_{ref}} \quad (1.34)$$

Onde:

Q – coeficiente de direccionalidade (-)

I – intensidade sonora medida a uma dada distância da fonte (W/m^2)

I_{ref} – intensidade sonora de uma fonte pontual omnidireccional avaliada no mesmo ponto (W/m^2)

O índice de direccionalidade D corresponde à transposição do valor de Q para uma escala compatível com a utilização do conceito de nível (unidade dB) (Equação (1.35)):

$$D = 10 \log (Q) \quad (1.35)$$

Onde:

D – índice de direccionalidade (dB)

Q – coeficiente de direccionalidade (-)

Para a caracterização da direccionalidade de uma fonte sonora é vulgar o recurso a diagramas de direccionalidade (também designados por diagramas polares), que traduzem a variação da direccionalidade em função da direcção, para uma dada frequência (Figura 1.27 e Figura 1.28).

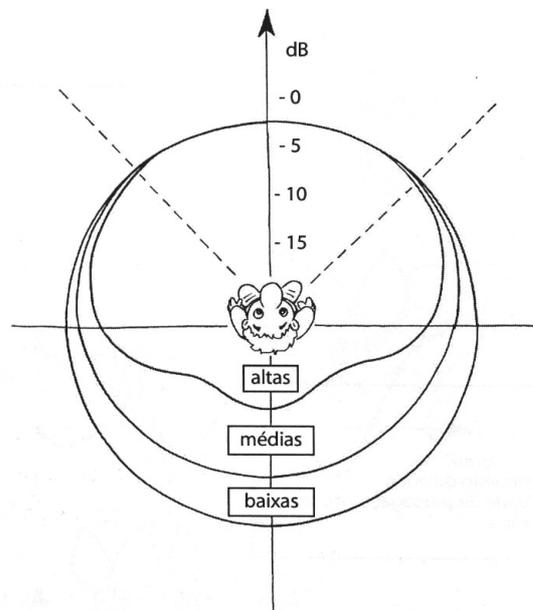


Figura 1.27 – Exemplo de um diagrama de direccionalidade da voz humana por gamas de frequências, com um tipo de representação essencialmente didáctico (Souza et al. 2003)

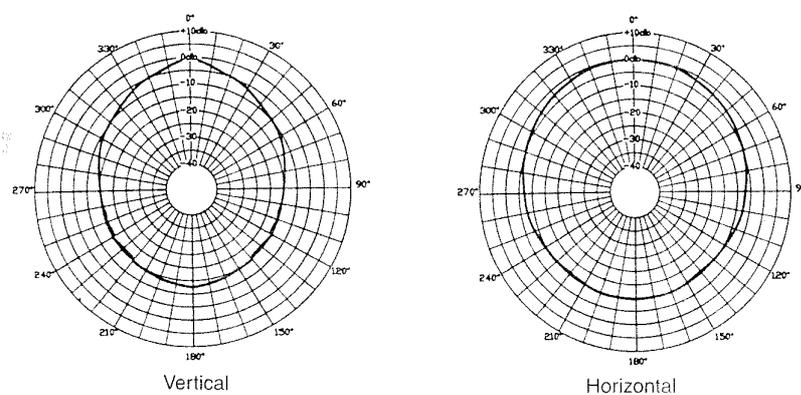


Figura 1.28 – Exemplo de um diagrama de direccionalidade de uma fonte sonora nas direcções horizontal e vertical (representação rigorosa) (Arau 1999)

Por vezes, a caracterização da direccionalidade é efectuada de forma a ter também em conta as condições de radiação e não apenas a direccionalidade da fonte sonora. Para algumas situações-tipo, envolvendo uma fonte sonora omnidireccional, é possível estimar os valores do coeficiente de direccionalidade e do índice de direccionalidade (Figura 1.29).

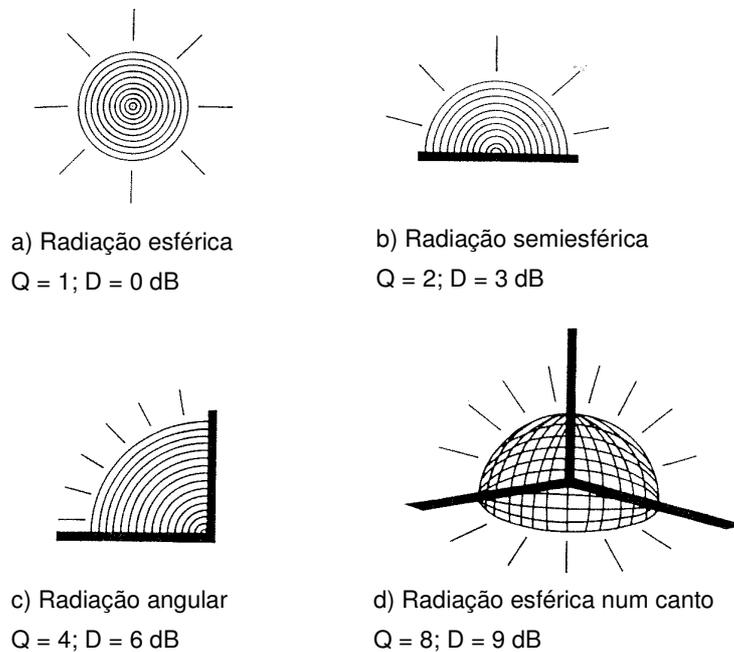


Figura 1.29 – Valores do coeficiente de direccionalidade e do índice de direccionalidade em situações-tipo envolvendo fontes sonoras omnidireccionais (Arau 1999)

O coeficiente de direccionalidade pode ser igualmente integrado na expressão que relaciona o nível de pressão sonora com o nível de potência sonora para uma fonte pontual através da Equação (1.36):

$$L_p \cong L_I = 10 \log \left(\frac{Q W}{4 \pi r^2 10^{-12}} \right) = L_w + 10 \log(Q) - 20 \log(r) - 11 \quad (1.36)$$

Onde:

L_p – nível de pressão sonora (dB)

L_I – nível de intensidade sonora (dB)

Q – coeficiente de direccionalidade (-)

W – potência sonora (W/m^2)

r – distância à fonte sonora (m)

L_w – nível de potência sonora (dB)

1.2.3 Ruído Branco e Ruído Rosa

Existem dois modelos de ruído normalizado muito utilizados quer na formulação teórica de alguns fenómenos quer em aplicações práticas: ruído branco e ruído rosa.

Um ruído branco possui um valor constante do nível de pressão sonora (L_p) numa escala linear ($L_p \times f$), pelo que no caso de se utilizarem bandas de frequências (escala logarítmica) o valor de L crescerá em 3 dB no caso de bandas de 1/1 oitava e em 1 dB para 1/3 oitava (Figura 1.30).

Um ruído rosa possui um valor constante do nível de pressão sonora (L_p) por banda de frequência, ao que corresponde numa escala linear ($L_p \times f$) um decréscimo de 3 dB entre valores de frequências que definam um intervalo de 1/1 oitava ($1 \text{ dB para } 1/3 \text{ oitava}$)⁷ (Figura 1.31).

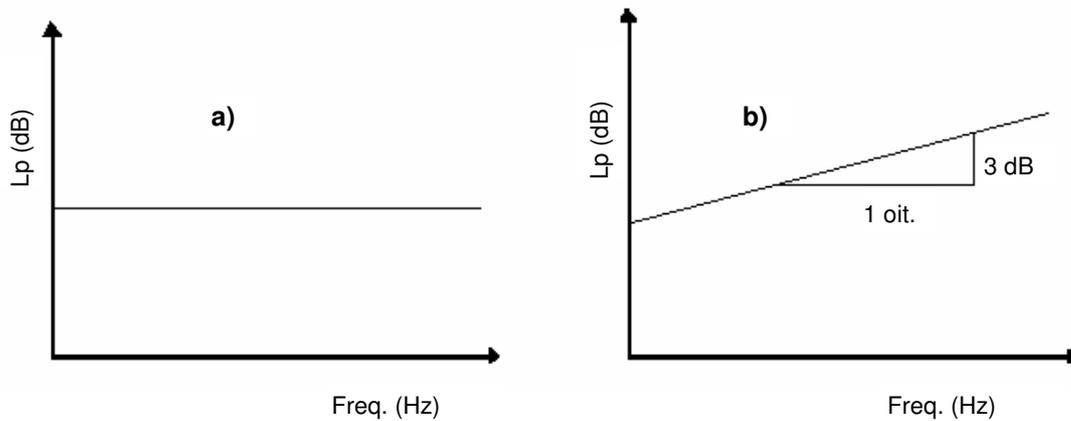


Figura 1.30 – Modelo de ruído branco, com a variação de frequência em escala linear (a) e em escala logarítmica (b) (Patrício 2003)

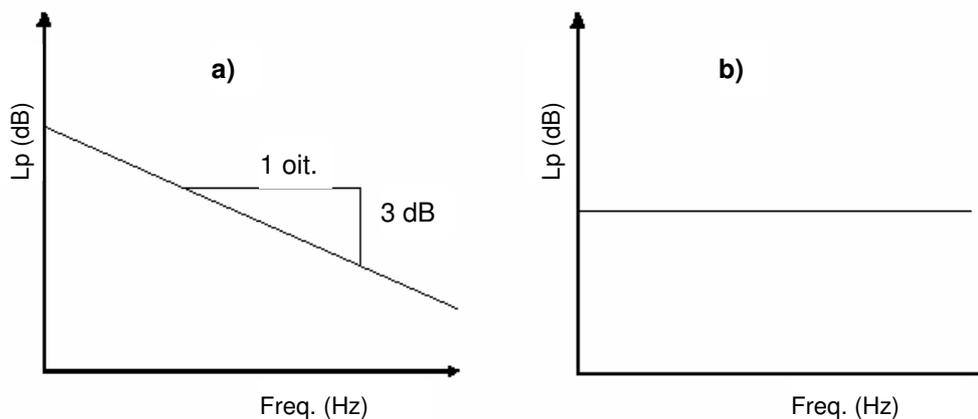


Figura 1.31 – Modelo de ruído rosa, com a variação de frequência em escala linear (a) e em escala logarítmica (b) (Patrício 2003)

⁷ As designações ruído rosa e ruído branco tiveram origem na análise espectral das ondas luminosas com a mesma cor (enquanto que a luz branca é composta por energia distribuída uniformemente por todo o espectro, o rosa corresponde à supressão de componentes de menor comprimento de onda, isto é, de maior frequência, como os azuis e os violetas).

1.3 Percepção Sonora

As principais noções apresentadas até este ponto são eminentemente do domínio físico, não sendo (sempre) passíveis de ser directamente transpostas para o domínio sensorial, ou seja, da percepção sonora. Importa assim distinguir um domínio de carácter objectivo associado à produção e propagação das ondas sonoras, de outro, de carácter mais subjectivo, relacionado com a percepção sonora por parte de um auditor.

1.3.1 Curvas Isofónicas

Aquando da apresentação e discussão do conceito de frequência, introduziu-se a noção de gama audível para o ouvido humano. Dentro da gama audível a sensibilidade do ouvido humano varia com a frequência, pelo que é necessário recorrer ao conceito de intensidade audível, correspondente ao atributo da sensação sonora com que o auditor avalia a intensidade física de um estímulo sonoro.

O nível de intensidade audível, expresso em fone, é numericamente igual ao nível de pressão sonora de um som com frequência de 1000 Hz que, propagando-se em meio livre, produziria no auditor igual sensação de intensidade. Na Figura 1.32 apresenta-se um conjunto de curvas que expressam a variação, por frequência, do nível de pressão sonora que determina no auditor valores constantes de intensidade audível (curvas isofónicas ou de Fletcher-Munson, em honra dos investigadores que as publicaram em 1933).

Facilmente se constata, pela análise da Figura 1.32 que o ouvido humano é mais sensível para as frequências na zona dos 2300 aos 2800 Hz (onde as curvas isofónicas apresentam valores inferiores) e menos sensível para frequências mais baixas. Analisando por exemplo a curva dos 40 fone, verifica-se que para a frequência de 125 Hz seria necessário produzir um som com um nível de pressão sonora de cerca de 50 dB de forma a obter a mesma intensidade audível do que o som de referência (nesta caso 40 dB a 1000 Hz). No entanto, e tal como se pode verificar, essa variação de sensibilidade varia com a intensidade do som em causa⁸.

Esclareça-se que a escala apresentada não permite concluir sobre a variação da intensidade audível entre dois sons, isto é, um som de 60 fone não será percebido como 3 vezes mais elevado do que um som de 30 fone. Para esse efeito deverá utilizar-se a unidade sone, para a qual é possível afirmar que um som com 3 sone será percebido como sendo 3 vezes mais elevado do que um som com 1 sone. A relação entre sone e fone é expressa pela Equação (1.38). A isofónica correspondente a 40 fone foi definida como referência (1 sone).

⁸ *Também a sensação de altura é afectada pela variação de intensidade (os sons graves “descem” e os sons agudos “sobem” – efeito Stevens (Henrique 2002)*

$$S = 2^{0,1(F-40)} \quad (1.37)$$

Onde:

S – intensidade audível relativa (sone)

F – intensidade audível absoluta (fone)

A Equação (1.37) é válida para a gama dos 40 aos 100 fone.

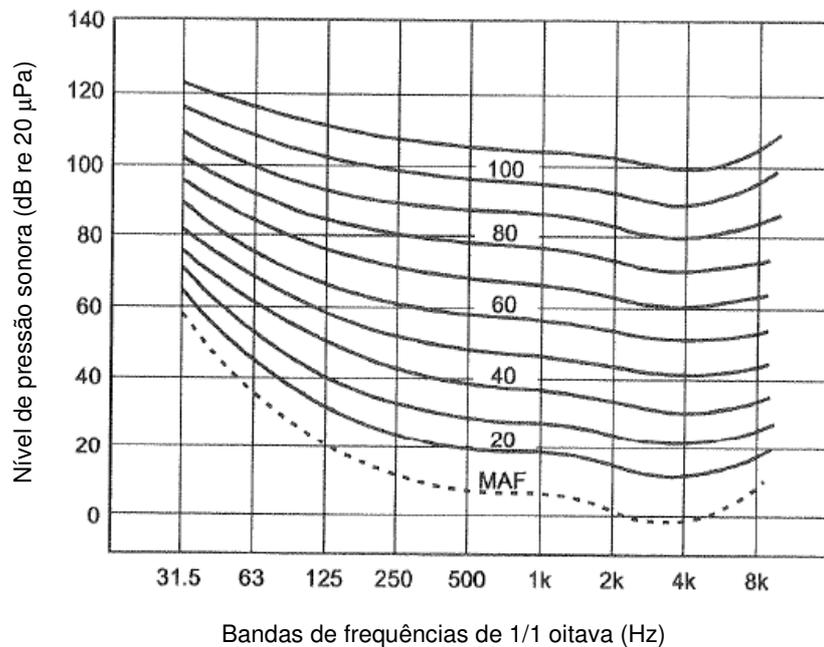
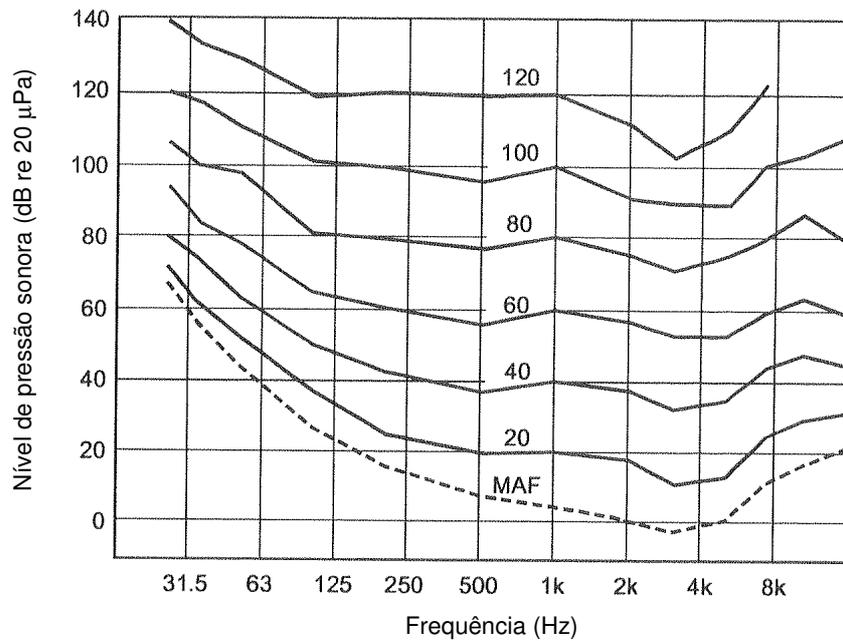


Figura 1.32 – Curvas de igual sensibilidade auditiva (ou isofónicas) (em cima para sons puros; em baixo para bandas de frequência de 1/1 oitava) (Bies e Hansen 2003)

1.3.2 Curvas de Ponderação

Atendendo ao exposto no ponto anterior, é facilmente compreensível a necessidade de corrigir os valores calculados ou medidos com base nos descritores puramente físicos, de modo a que os resultados sejam compatíveis com a sensação subjectiva do auditor humano. Para esse efeito foram introduzidos filtros electrónicos nos aparelhos de medição, tendo por base os resultados de Fletcher e Munson (curvas isofónicas).

As diversas curvas de ponderação que foram sendo propostas correspondem basicamente à inversão das curvas isofónicas. Assim, as curvas de ponderação com a designação A, B e C (Figura 1.33) correspondem aproximadamente à inversão das isofónicas de 40, 60 e 80 fone. Posteriormente foi proposta uma curva D, utilizando-se na actualidade para avaliação do ruído produzido por aviões.

A curva A foi definida inicialmente para aproximar a resposta do ouvido humano a níveis de pressão sonora reduzidos. As curvas do tipo B e C destinavam-se à avaliação de níveis de pressão sonora respectivamente entre 55 e 85 dB e superiores a 85 dB (Bies e Hansen 2003). Actualmente a curva B caiu em desuso, sendo a curva A aquela cujo uso é mais generalizado.

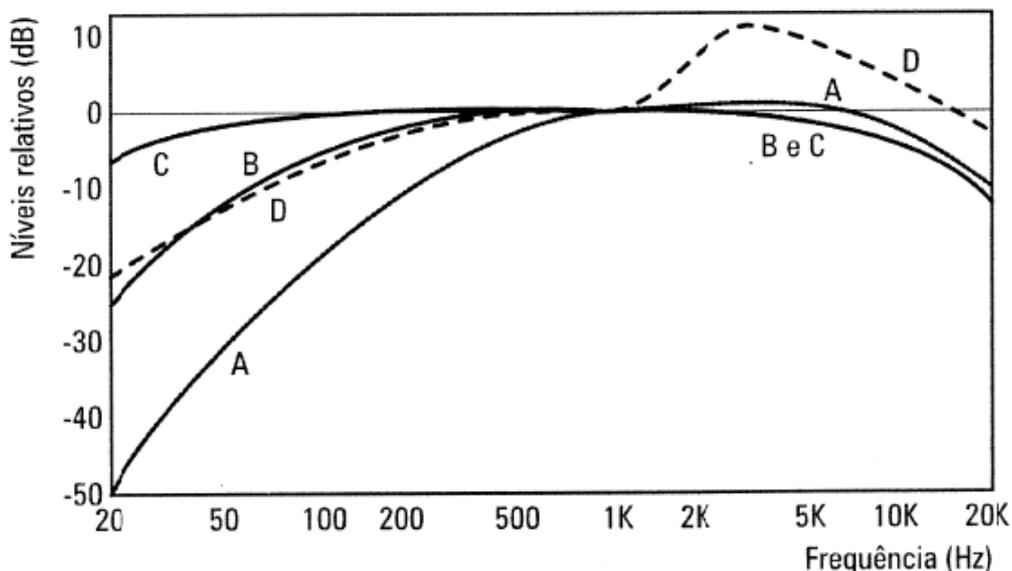


Figura 1.33 – Curvas de ponderação correntes (Patrício 2003)

A utilização da curva de ponderação A (ou outra) sobre uma dada descrição espectral de ruído efectua-se através da soma algébrica dos factores de correcção característicos da respectiva curva, normalmente em bandas de 1/1 oitava ou de 1/3 oitava (Tabela 1.3). No caso de um valor de nível de pressão sonora ser afectado de uma curva de ponderação, passa a designar-se por nível sonoro, devendo ser identificada a curva utilizada (como por exemplo nível sonoro ponderado A).

Tabela 1.3 – Valores da ponderação A para bandas de frequência de 1/1 oitava e 1/3 oitava

Frequência Central (Hz)	Ponderação 1/3 oitava (dB)	Ponderação 1/1 oitava (dB)
50	-30,2	-26
63	-26,2	
80	-22,5	
100	-19,1	-15,5
125	-16,1	
160	-13,4	
200	-10,9	-8,5
250	-8,6	
315	-6,6	
400	-4,8	-3
500	-3,2	
630	-1,9	
800	-0,8	0
1000	0,0	
1250	0,6	
1600	1,0	+1
2000	1,2	
2500	1,3	
3150	1,2	+1
4000	1,0	
5000	0,5	
6300	-0,1	+1
8000	-1,1	
10000	-2,5	

Para um dado espectro de ruído, as várias curvas de ponderação conduzem a níveis sonoros globais distintos. De modo a identificar a curva de ponderação utilizada é habitual definirem-se os níveis sonoros em termos de dB(A), dB(B), dB(C) ou dB(D).

Por vezes a distinção entre o nível de pressão sonora e o nível sonoro é efectuada colocando a designação da curva de ponderação (por exemplo A) no índice respectivo e não no resultado (por exemplo $L_A = 50$ dB).

Sempre que o valor global é expresso em dB significa que não foi feita qualquer ponderação, isto é, que o nível de pressão sonora medido traduz o fenómeno físico efectivo e não a forma como o ouvido humano o percepçiona.

Como exemplo do exposto apresenta-se na Figura 1.33 um espectro de ruído com os respectivos níveis de pressão sonora (L_{lin}) e nível sonoro ponderado A (L_A) globais.

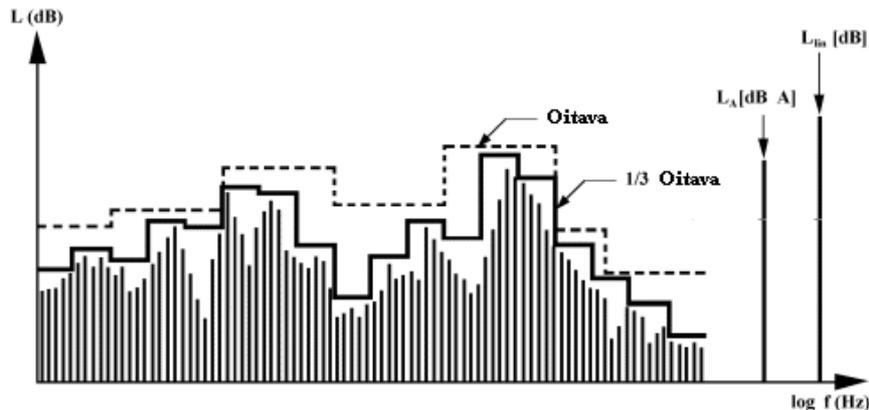


Figura 1.34 – Nível de pressão sonora global (L_{lin}) e nível sonoro global (L_A)

1.3.3 Equipamentos de Medição

Efectua-se neste ponto uma breve síntese dos principais equipamentos de medição utilizados em Acústica Ambiental e de Edifícios.

Dentre os vários aparelhos existentes destacam-se os seguintes:

- Sonómetros (equipamento mais utilizado, cuja descrição é efectuada de seguida, atendendo à sua importância);
- Analisadores de frequência – permitem analisar sinais no domínio da frequência;
- Dosímetros – permitem avaliar a exposição de um trabalhador ao ruído (em geral durante um dia de trabalho), facultando a análise dos valores médios de ruído bem como dos picos de curta duração;
- Sondas de intensidade sonora – permitem avaliar a intensidade sonora (numa dada direcção) provocada por uma fonte.

Sonómetro

Os sonómetros são equipamentos de medição de pressão sonora sob a forma de variadas unidades, mediante a utilização de uma cadeia de medição constituída, em linhas gerais, por um microfone, que converte a pressão sonora num sinal eléctrico, um sistema de amplificação do sinal, um circuito de ponderação em frequência (por exemplo ponderação A), um circuito de obtenção de valores eficazes e um mostrador (Figura 1.35).

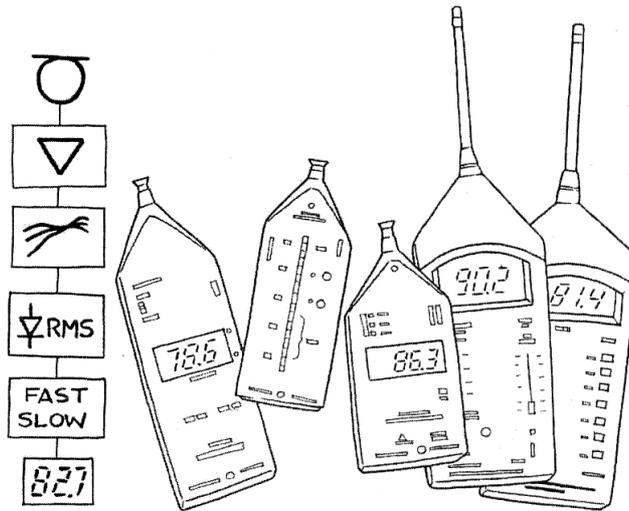


Figura 1.35 – Exemplos de sonómetros

Alguns sonómetros estão também habilitados a efectuar a integração dos valores medidos ao longo de um intervalo de tempo definido pelo utilizador (sonómetros integradores), enquanto outros apenas permitem obter o valor da grandeza medida após integração com uma constante temporal específica (sonómetros não-integradores).

Os sonómetros contam ainda normalmente com um circuito de resposta rápida, resposta lenta ou impulsiva. O circuito de resposta rápida é usado para ruídos com níveis mais constantes, o de resposta lenta para situações de grande oscilação do nível de pressão sonora, e o impulsivo é aconselhado para ruídos de muito curta duração.

Existem diversas classes de sonómetros em função da sua precisão:

- Classe 0, correspondente aos padrões de laboratório (de referência);
- Classe 1, para utilização em laboratório e “in situ” (de precisão);
- Classe 2, para utilização “in situ” (de uso geral);
- Classe 3, equipamento de muito baixa precisão (para estimativas).

1.4 Propagação no Exterior

1.4.1 Mecanismos de Atenuação

Quando se pretende conhecer o nível de ruído num determinado ponto em consequência do funcionamento de uma ou mais fontes de potência sonora conhecida, o efeito de divergência geométrica não é o único mecanismo de atenuação da energia sonora (bem como, embora em média inferiores, os gradientes de temperatura e a acção do vento).

De facto são vários os mecanismos (complementares) de atenuação na propagação do som (utiliza-se a nomenclatura definida pela NP 4361-2:2001 (Acústica. Atenuação do som na sua propagação ao ar livre. Parte 2: Método de cálculo).

- Absorção atmosférica;
- Efeito do solo (Figura 1.36);
- Efeito de barreira (Figura 1.37);
- Propagação através de vegetação (Figura 1.38);
- Propagação através duma área habitacional;
- Propagação através duma área industrial (Figura 1.39).

A norma supracitada (NP 4361-2) apresenta um método de cálculo para a quantificação destes vários mecanismos, admitindo fontes sonoras do tipo pontual e condições meteorológicas constantes e padronizadas. Na Tabela 1.4 apresentam-se alguns valores de referência para a absorção atmosférica por bandas de 1/1 oitava.

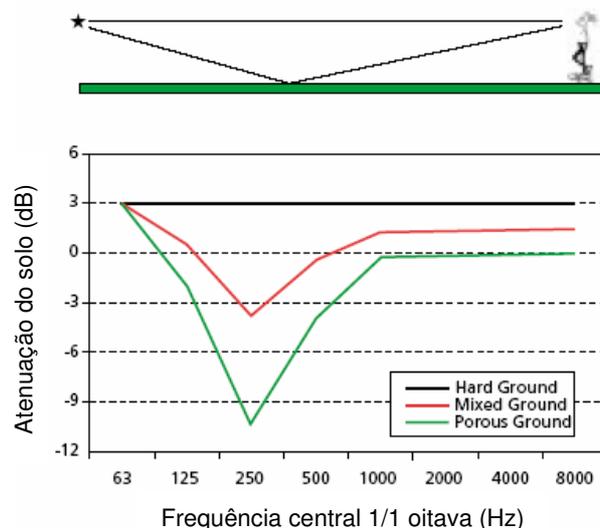


Figura 1.36 – Atenuação sonora por efeito do solo (para uma distância entre 100 m entre a fonte e o receptor e uma altura de 2 m para ambos) (Brüel & Kjær).

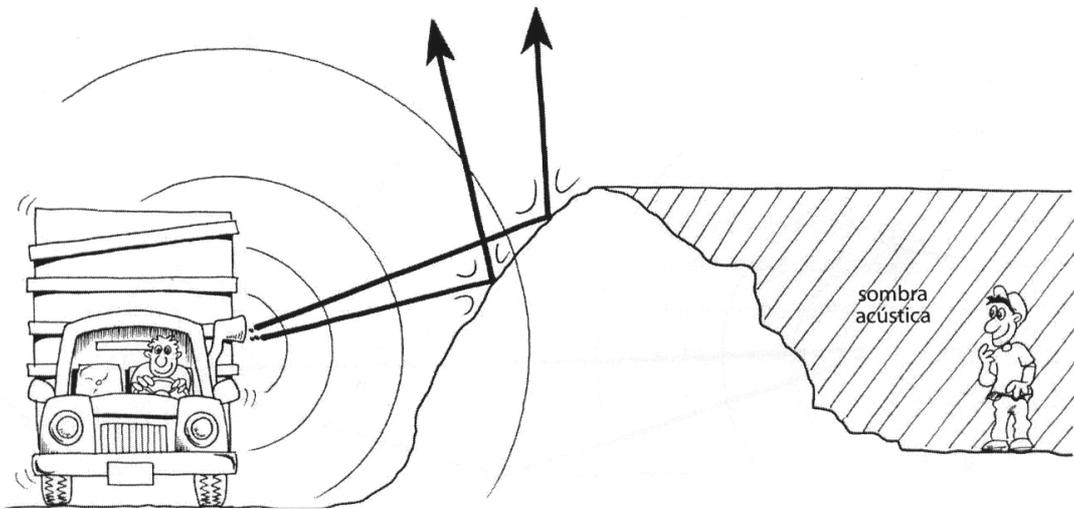
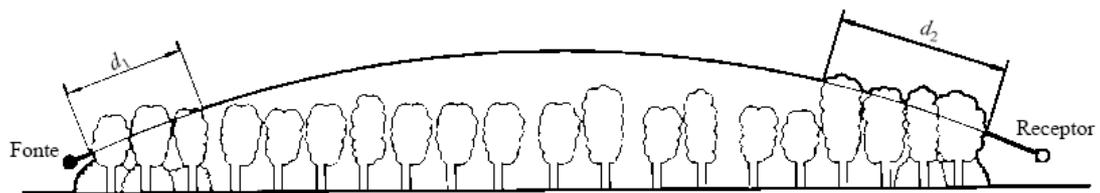


Figura 1.37 – Atenuação sonora por efeito de barreira (Souza et al. 2003)



NOTA: Nota - $d_t = d_1 + d_2$

Figura 1.38 – Atenuação sonora por propagação através de vegetação densa (NP 4361-2)

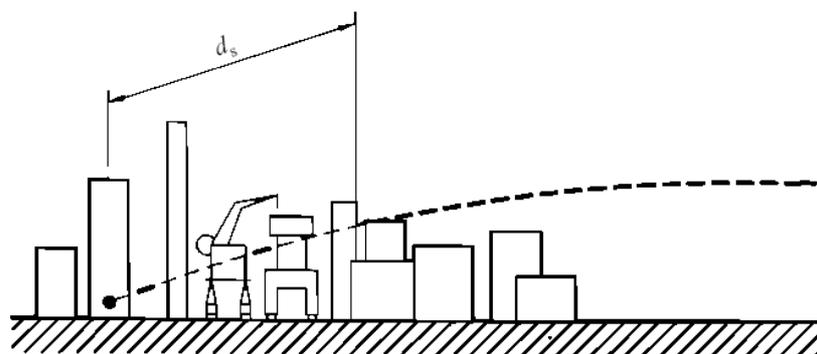


Figura 1.39 – Atenuação sonora por propagação através duma área industrial (NP 4361-2)

Tabela 1.4 – Coeficiente de atenuação atmosférica para a propagação do som no ar, por bandas de frequências de 1/1 oitava (NP 4361-2)

Temperatura °C	Humidade relativa %	Coeficiente de atenuação atmosférica α , dB/km							
		Frequência central nominal, Hz							
		63	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000
10	70	0,1	0,4	1,0	1,9	3,7	9,7	32,8	117
20	70	0,1	0,3	1,1	2,8	5,0	9,0	22,9	76,6
30	70	0,1	0,3	1,0	3,1	7,4	12,7	23,1	59,3
15	20	0,3	0,6	1,2	2,7	8,2	28,2	88,8	202
15	50	0,1	0,5	1,2	2,2	4,2	10,8	36,2	129
15	80	0,1	0,3	1,1	2,4	4,1	8,3	23,7	82,8

Nota: para condições atmosféricas não contempladas nesta tabela, a obtenção do valor de α deve ser efectuada por consulta da NP4361-1:1997 (Acústica. Atenuação do som na sua propagação ao ar livre. Parte 1: Cálculo da absorção sonora atmosférica).

Por vezes em aplicações correntes o efeito dos demais mecanismos de atenuação enunciados são desprezados, considerando-se apenas os efeitos de divergência geométrica e de absorção atmosférica, o que normalmente traduz uma situação conservativa. Na prática poderão contudo existir também factores que contribuem para o incremento do nível de ruído medido num receptor (por exemplo reflexões de edifícios existentes).

Na actualidade a previsão dos níveis de ruído num determinado ponto em consequência do funcionamento de uma ou mais fontes de potência sonora conhecida é, em geral, realizado a partir de programas de simulação informática.

1.4.2 Principais Parâmetros de Avaliação

A caracterização do ruído no exterior utiliza, em geral, três tipos de análise:

- Análise no espaço;
- Análise no tempo;
- Análise em frequência.

A análise no espaço é utilizada sempre que está em causa a caracterização do ruído numa determinada zona, cuja dimensão impõe a realização de um levantamento em diversos pontos, de modo a elaborar um mapa de ruído da área em questão (Figura 1.40). Existem muitas variáveis num estudo dessa natureza, tais como a definição dos locais de medição, do período do dia ou da noite, da duração da medição, da natureza da monitorização (permanente ou intermitente), entre outros. Estes tipos de estudos são normalmente desenvolvidos recorrendo a simulação informática a partir de medições reais numa malha de pontos.

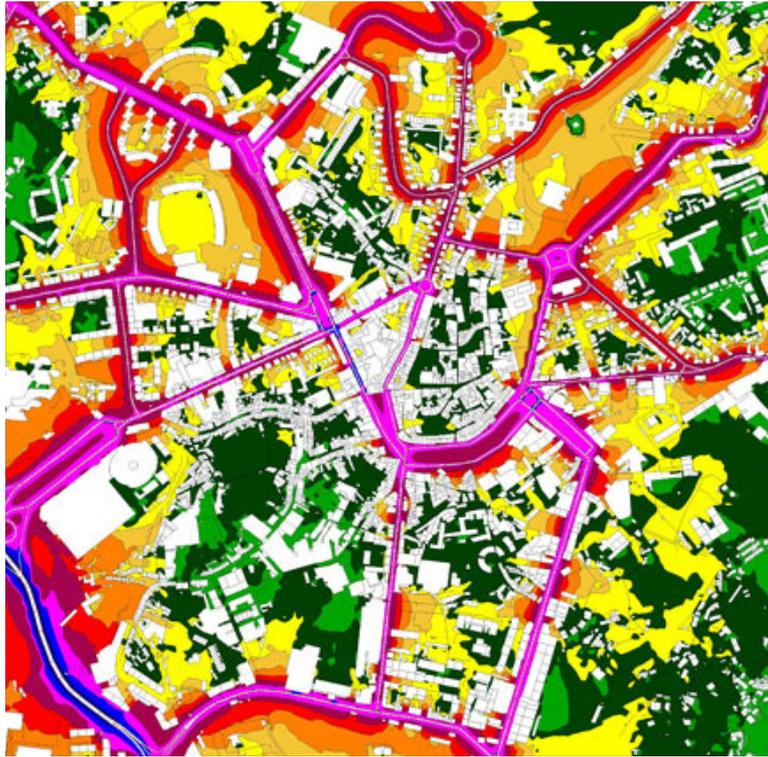


Figura 1.40 – Mapa de ruído da cidade de Guimarães, no período entre as 07:00 às 22:00 (que no âmbito da anterior legislação de ruído – Decreto-Lei n.º 292/200 – correspondia ao Período Diurno) (site da Câmara Municipal de Guimarães)

A análise em frequência tem uma utilização algo limitada ao nível da caracterização do ruído no exterior, embora seja fundamental a sua consideração na modelação da propagação de ruído. É também útil em situações de avaliação de incomodidade sonora para a detecção da potencial existência de características tonais no ruído ambiente.

A análise do ruído no tempo é extremamente importante e tanto é utilizada na caracterização sonora de uma determinada zona urbana como na análise da exposição ao ruído nos postos de trabalho, ou ainda na avaliação do grau de incomodidade de um ruído que afecta apenas uma pessoa. A sua importância resulta do facto de que, na generalidade dos casos, o conjunto de fontes de ruído que contribuem para o nível sonoro global, assim como as actividades que lhes dão origem, variam ao longo do tempo de um modo muito significativo, impossibilitando a sua qualificação de uma forma instantânea ou mesmo em curtos períodos de tempo.

É assim vulgar recorrer-se a parâmetros de avaliação estatísticos ou energéticos que permitam traduzir num único valor a referida variação do nível de ruído ao longo do tempo. Dentre uma vasta quantidade de parâmetros existentes, destacam-se pela sua importância e pela utilização generalizada, os seguintes:

- Nível sonoro contínuo equivalente, $L_{Aeq,T}$ (parâmetro energético);
- Nível sonoro estatístico, L_N .

O nível sonoro contínuo equivalente (para um intervalo de tempo T), $L_{Aeq,T}$, corresponde ao valor do nível sonoro que se actuasse de uma forma constante ao longo do intervalo de tempo T, se traduziria numa quantidade de energia sonora equivalente à da variação real do nível sonoro durante o intervalo. Esta definição é equivalente à Equação (1.38):

$$L_{Aeq,T} = 10 \log \left(\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p_A^2(t) dt}{p_0^2} \right) \quad (1.38)$$

Onde:

$L_{Aeq,T}$ – nível sonoro contínuo equivalente (dB(A))

T – intervalo de tempo de avaliação

$p_A(t)$ – pressão sonora instantânea, ponderada A (Pa)

p_0 – pressão sonora de referência (20×10^{-6} Pa)

Na Figura 1.41 ilustra-se o conceito do parâmetro nível sonoro contínuo equivalente que, de acordo com a definição apresentada, corresponde à linha que define um rectângulo cuja área é similar à referente da variação do parâmetro L_p ao longo do tempo.

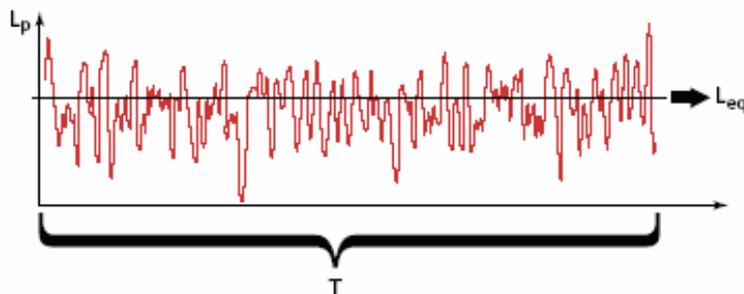


Figura 1.41 – Ilustração do parâmetro nível sonoro contínuo equivalente (Brüel & Kjøær)

No caso do ruído em avaliação possuir regimes distintos (com valores de L_{Aeq} característicos) o nível sonoro contínuo equivalente global pode ser calculado da seguinte forma:

$$L_{Aeq,T} = 10 \log \left(\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n t_i 10^{L_{Aeq,i}/10} \right) \quad (1.39)$$

Onde:

$L_{Aeq,T}$ – nível sonoro contínuo equivalente (dB(A))

T – intervalo de tempo de avaliação

t_i – intervalo de tempo relativo ao regime i

$L_{Aeq,i}$ – nível sonoro contínuo equivalente característico do regime i (dB(A))

Os níveis sonoros estatísticos (L_N) correspondem ao nível sonoro que é excedido em N% do tempo de medição, sendo que os mais comumente utilizados são o L_{10} , L_{50} e L_{90} .

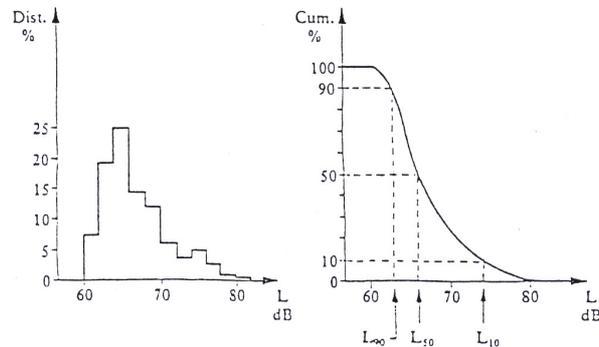


Figura 1.42 – Distribuição de níveis de ruído ao longo do tempo e valores de L_{90} , L_{50} e L_{10}

Como conclusão refira-se ainda que no âmbito do documento legal que tutela em Portugal a prevenção do ruído e o controlo da poluição sonora (Decreto-Lei n.º 9/2007 de 17 de Janeiro) é ainda utilizado um parâmetro energético complementar, o indicador de ruído diurno-entardecer-nocturno, L_{den} (Equação (1.40)). As penalizações de 5 dB(A) e de 10 dB(A) respectivamente nos períodos do entardecer e nocturno pretendem traduzir a maior incomodidade associada a níveis sonoros elevados em alturas destinadas ao lazer e descanso.

$$L_{den} = 10 \log \frac{1}{24} \left(13 \times 10^{\frac{L_d}{10}} + 3 \times 10^{\frac{L_e+5}{10}} + 8 \times 10^{\frac{L_n+10}{10}} \right) \quad (1.40)$$

Onde:

L_{den} – indicador de ruído diurno-entardecer-nocturno (dB(A))

L_d ou L_{day} – Indicador de ruído diurno (07:00-20:00) (dB(A))

L_e ou $L_{evening}$ – Indicador de ruído do entardecer (20:00-23:00) (dB(A))

L_n ou L_{night} – Indicador de ruído nocturno (23:00-07:00)

Somente a título informativo, o mesmo documento regulamentar define valores máximos para os indicadores L_{den} e L_n para zonas sensíveis⁹ e mistas¹⁰:

- Zonas sensíveis: $L_{den} \leq 55$ dB(A), $L_n \leq 45$ dB(A);
- Zonas mistas: $L_{den} \leq 65$ dB(A), $L_n \leq 55$ dB(A).

⁹ Área definida em plano municipal de ordenamento do território como vocacionada para uso habitacional, ou para escolas, hospitais ou similares, ou espaços de lazer, existentes ou previstos, podendo conter pequenas unidades de comércio e de serviços destinadas a servir a população local, tais como cafés e outros estabelecimentos de restauração, papelarias e outros estabelecimentos de comércio tradicional, sem funcionamento no período nocturno.

¹⁰ Área definida em plano municipal de ordenamento do território, cuja ocupação seja afectada a outros usos, existentes ou previstos, para além dos referidos na definição de zona sensível.

CAPÍTULO 2

Acústica Interior de Espaços Correntes



2.1 Introdução

O domínio de estudo da acústica interior de espaços é habitualmente definido, em contraponto ao do isolamento sonoro, como aquele no qual se estudam os fenómenos físicos relacionados com a emissão, propagação e percepção sonoras no interior de um espaço fechado (no qual se encontra um receptor), com o objectivo de avaliar a qualidade acústica do espaço para uma dada utilização, admitindo não ser para o efeito relevante (ou estar controlado através do estudo detalhado das características de isolamento sonoro da envolvente) o ruído proveniente de espaços adjacentes ou do exterior (Figura 2.1).

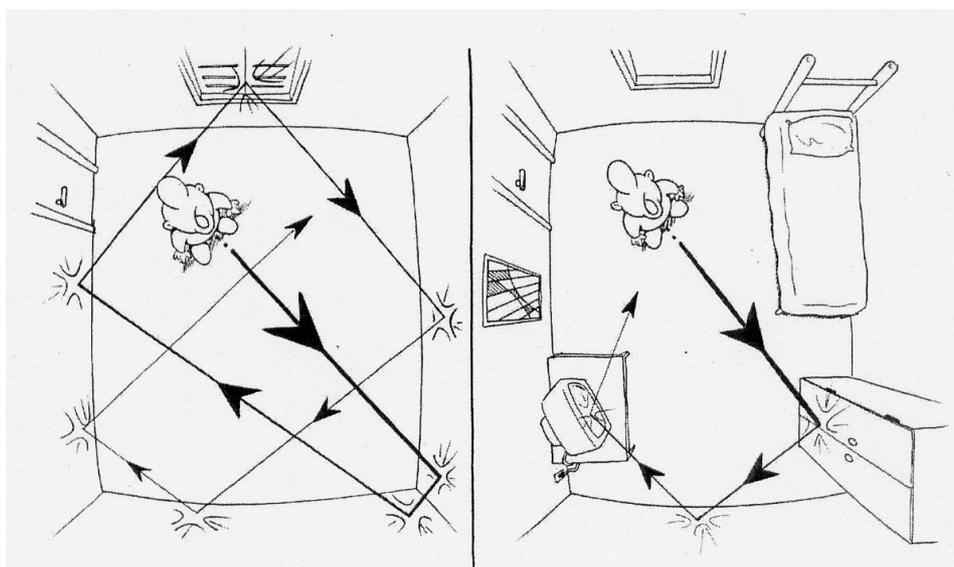


Figura 2.1 – A análise do ambiente acústico em cada um dos compartimentos de uma forma independente (admitindo que o outro não existe) é um problema do domínio da acústica interior; a análise da influência da actividade de um compartimento no ambiente acústico do outro é um problema do domínio do isolamento sonoro (Souza et al. 2003)

Embora sob um ponto de vista conceptual os dois domínios sejam normalmente abordados de uma forma independente, isto não significa a não existência de uma forte interligação entre ambos, sendo corrente a existência de patologias ao nível do isolamento sonoro que poderão ser mitigadas recorrendo a intervenções do foro da acústica interior (por exemplo diminuição do nível de ruído de fundo numa sala de equipamentos), tal como por outro lado a existência de situações de desconforto num determinado ambiente com boas condições acústicas interiores derivadas de condições deficientes de isolamento sonoro (por exemplo a transmissão de ruído através de condutas de AVAC numa sala de aula).

Ao estudo combinado dos domínios da acústica interior e do isolamento sonoro designa-se habitualmente por Acústica Arquitectónica (“Architectural Acoustics”), mas no caso em que o estudo da acústica interior se cinge a espaços correntes a designação mais adequada será Acústica de Edifícios (“Building Acoustics”).

A análise da acústica interior de espaços pode ser abordada e desenvolvida segundo vários modelos teóricos que se poderão enquadrar em três grandes famílias:

- Teoria Ondulatória;
- Teoria Geométrica;
- Teoria Estatística.

A teoria estatística é adequada para o estudo de espaços que potenciem a obtenção de um campo sonoro cujas características se assemelhem às de um hipotético campo sonoro difuso (ver §2.4.1), donde decorre, ainda que parcialmente, a limitação do objecto de estudo do presente capítulo a “espaços correntes”.

De facto, o estudo da acústica interior de locais não correntes, como auditórios, teatros, locais de culto, salas de conferências, salas de aula, estúdios de gravação, ou mesmo edifícios industriais (entre outros) obriga a recorrer, em geral como complemento da teoria estatística, às teorias ondulatória e/ou geométrica, de forma a permitir modelar de uma forma rigorosa a potencial complexidade dos fenómenos acústicos envolvidos.

Por outro lado, enquanto a avaliação da qualidade acústica interior em espaços correntes pode ser efectuada (ainda que de uma forma simplificada) recorrendo ao conceito de tempo de reverberação (ver §2.4.2), para espaços não correntes (por exemplo salas de aula) são já necessários diversos parâmetros complementares de natureza psico-acústica (por exemplo no caso de salas de aula relacionados com a inteligibilidade da palavra).

São portanto duas as principais razões que poderão determinar a classificação de um espaço como “corrente” sob o ponto de vista do estudo da sua acústica interior: a possibilidade de estudá-lo recorrendo apenas a modelos estatísticos sem comprometer a fiabilidade dos resultados obtidos, e a utilização do tempo de reverberação como o principal parâmetro de análise da sua qualidade acústica.

Apesar de restritivas, estas condições permitem todavia abarcar uma grande diversidade de espaços de edifícios com distintas funcionalidades, entre os quais se podem referir os seguintes (desde que respeitadas as condições de aplicação da teoria estatística):

- Compartimentos de edifícios habitacionais;
- Espaços comuns de edifícios colectivos;
- Equipamentos desportivos (ginásios, piscinas, etc.);
- Cantinas, refeitórios, restaurantes e cafetarias;
- Salas de reuniões (de pequenas dimensões) e salas de trabalho;
- Museus e bibliotecas;
- Showrooms.

Referiu-se atrás que para a análise de espaços correntes o tempo de reverberação poderá ser utilizado como o principal parâmetro de análise da qualidade acústica. Ora o termo principal foi utilizado de forma intencional, uma vez que indistintamente do espaço em análise (corrente ou não-corrente) existe sempre pelo menos um outro aspecto determinante para garantir uma elevada qualidade acústica: o ruído provocado por equipamentos electromecânicos (sobretudo os associados ao funcionamento de sistemas de AVAC).

Na Tabela 2.1 apresenta-se um conjunto de valores máximos de referência para o parâmetro L_{Aeq} recomendáveis para algumas situações concretas.

Tabela 2.1 – Valores máximos recomendáveis (para algumas situações típicas) do nível de ruído provocado pelo funcionamento de equipamentos electromecânicos, incluindo espaços correntes e não correntes (adaptado de Bies e Hansen 2003)

Material Elemento construtivo	L_{Aeq} (dB(A)) ≤...
Habituação (em descanso) Quarto de hotel Sala de concertos/ópera, teatros	25
Habituação (em lazer) Salas de aula de grande dimensão (+ 50 pessoas) Auditório multiusos / Sala de conferências Cinema	30
Salas de aula correntes Biblioteca (zona de leitura) Gabinetes de trabalho	35
Biblioteca (zona de pesquisa) Gabinete de projecto (open-plan) Restaurante	40
Zonas de circulação comum (edifícios públicos) Terminal de aeroporto Ginásio	45
Piscina pública	50

Note-se que a própria regulamentação nacional para edifícios (Decreto Lei 129/2002 de 11 de Maio. Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios) estabelece limites a este nível através da definição do parâmetro L_{AR} ¹¹. Deve também salientar-se que para além do nível máximo de ruído, importa também garantir uma adequada distribuição espectral dos níveis de pressão sonora que compõem esse ruído, sendo comum na prática, o recurso a diversos parâmetros complementares de análise (como põe exemplo o índice Noise Rating – NR).

¹¹ L_{AR} – nível de avaliação do ruído particular, correspondente ao nível sonoro contínuo equivalente, ponderado A, durante um dado intervalo de tempo, adicionado das correcções devidas às características tonais e impulsivas do som

2.2 Absorção Sonora

Embora para a análise da acústica interior de espaços não correntes (como é o caso de auditórios, Figura 2.2) seja também importante a consideração de fenómenos de difracção e difusão sonoras, no caso dos espaços correntes, e sobretudo utilizando a teoria estatística, a absorção sonora possui uma influência substancialmente maior, pelo que neste capítulo só se abordarão as questões relacionadas com este fenómeno.

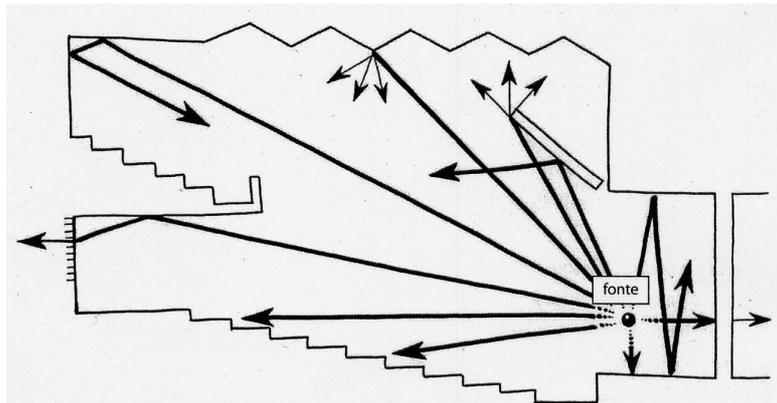


Figura 2.2 – Exemplo de um espaço não corrente (auditório) para o qual os fenómenos de difusão (tecto) e de difracção (pala sobre o palco) assumem uma importância decisiva (Souza et al. 2003)

Conceito de absorção sonora

Considere-se uma fonte sonora emitindo energia num espaço fechado. A onda sonora resultante propaga-se até atingir um obstáculo, por exemplo uma parede interior. Nesse instante parte da energia sonora incidente é transmitida de acordo com as características de isolamento sonoro do elemento construtivo, e da restante energia, uma parte será absorvida pelo elemento e a outra reflectida, tal como mostra a Figura 2.3.

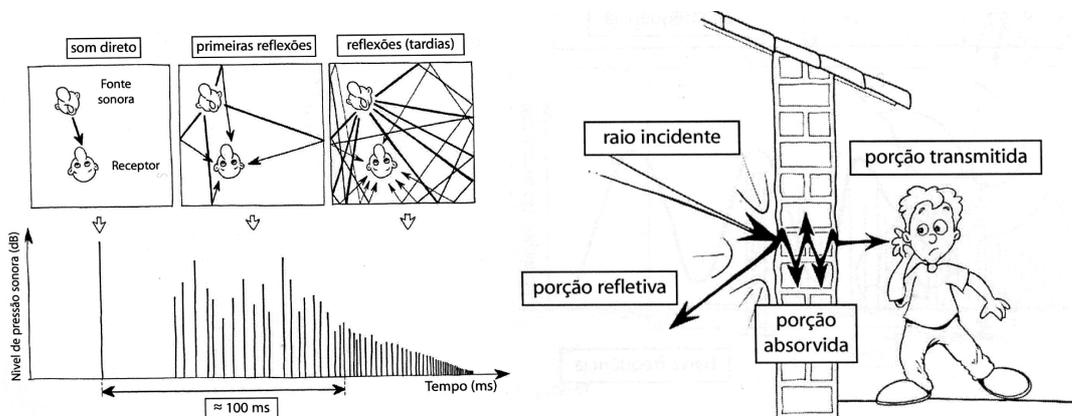


Figura 2.3 – Som directo e reflectido num espaço; incidência sonora numa superfície, incluindo os fenómenos de transmissão, absorção e reflexão (Souza et al. 2003)

A energia sonora reflectida, caso não atinja directamente o receptor, será de novo reflectida sempre que a onda sonora alcance a envolvente do espaço e assim sucessivamente (diversas ordens de reflexão). A sensação sonora no receptor será sobretudo condicionada pela intensidade das diferentes reflexões e pelo seu desfasamento face à onda sonora que o atinge directamente (som directo) (Figura 2.3).

Em cada reflexão da onda sonora na envolvente interior uma parte da sua energia é absorvida (dissipada noutra forma de energia, geralmente térmica). A percentagem de energia absorvida e reflectida por um dado material ou sistema construtivo é variável consoante a sua natureza, podendo ser avaliada pelo designado coeficiente de absorção sonora (α), que traduz a relação entre a energia absorvida e a energia incidente (admitindo desprezável a quantidade de energia transmitida) (Figura 2.4).

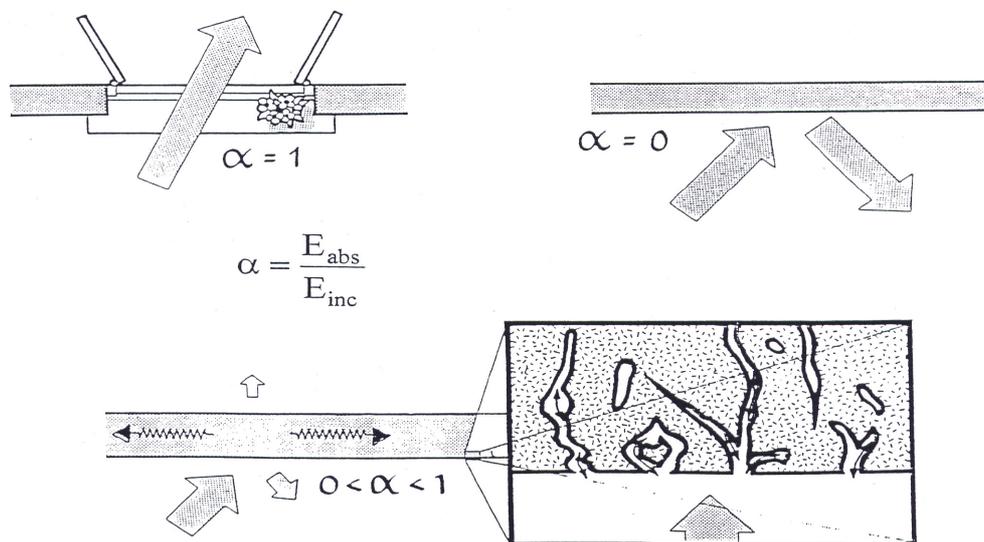


Figura 2.4 – Ilustração do conceito de coeficiente de absorção sonora

Trata-se pois de uma grandeza cujo valor pode variar entre 0 e 1. Por exemplo uma janela aberta terá (teoricamente) um valor de absorção unitário, isto é, toda a energia incidente é absorvida, enquanto que uma parede de betão possui um valor de absorção próximo de zero, isto é a maioria da energia sonora incidente é reflectida.

O coeficiente de absorção sonora de um material ou elemento construtivo não se mantém constante para os sons graves, médios e agudos, isto é, varia com a frequência da onda sonora incidente, tal como mostra a Figura 2.5. O seu valor varia também com o ângulo de incidência da onda sonora, embora em geral os valores disponíveis correspondam a uma incidência sonora difusa, isto é, ponderando todos os possíveis ângulos de incidência.

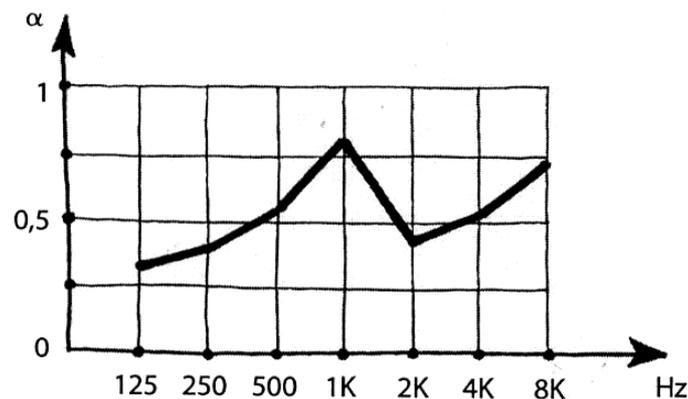


Figura 2.5 – Exemplo da variação do coeficiente de absorção de um determinado material com a frequência do som incidente (Souza et al. 2003)

Na Tabela 2.2 apresentam-se a título indicativo alguns coeficientes de absorção de materiais, elementos construtivos, grupos de objectos e de pessoas (valores adaptados da norma europeia EN 12354-6: 2003 (Building acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements – Part 6: Sound absorption in enclosed spaces). Note-se que quer o mobiliário quer as pessoas presentes no interior dos espaços possuem também características de absorção sonora que devem portanto ser ponderadas na análise do respectivo campo sonoro.

A capacidade de absorção sonora é assim uma característica comum a todos os materiais e elementos construtivos, sendo todavia distinto o nível de desempenho de absorção sonora e o modo (fenómeno físico) como esta é promovida.

Quando um material possui a absorção sonora como uma característica distintiva do seu desempenho pode ser designado por material absorvente sonoro¹². Na prática, e ainda que de uma forma simplista, poderá entender-se como material absorvente sonoro aquele que possui um coeficiente de absorção sonora igual ou superior a 0,50 para uma ou mais bandas de frequências de 1/1 oitava.

Por uma questão de facilidade é vulgar a utilização de índices únicos para a caracterização da absorção sonora que ponderam o valor de α para as diferentes bandas de frequências. Embora o parâmetro mais completo seja o coeficiente de absorção sonora ponderado α_w (índice w de “weighted”) definido pela ISO 11654:1997 (Acoustics. Sound absorbers for use in buildings. Rating of sound absorption) aquele cuja utilização é mais generalizada atendendo à maior facilidade na sua determinação é o NRC (“noise reduction coefficient”), correspondente à média aritmética dos valores do coeficiente de absorção sonora entre as bandas de 1/1 oitava centradas nos 250 Hz e 2000 Hz, inclusive (Equação (2.1)).

¹² Esta designação pode ser contudo menos precisa no caso de materiais (por exemplo lã de rocha) que apresentam um elevada desempenho de absorção sonora e simultaneamente de isolamento térmico (baixa condutibilidade térmica).

Tabela 2.2 – Coeficientes de absorção sonora de materiais e elementos construtivos correntes, bem como de grupos de objectos e de pessoas (EN 12354-6)

Material ou Elemento construtivo	Coeficiente de absorção sonora α (-) por bandas de frequências de 1/1 oitava (frequência central, Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Betão Alvenaria de tijolo rebocada	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03
Alvenaria de tijolo não rebocada	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07
Revestimentos de piso rígidos (ex. pvc, parquet) aplicados em pavimento rígido (ex. laje de betão)	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,06
Pavimentos em madeira	0,12	0,10	0,06	0,05	0,05	0,06
Vãos envidraçados	0,12	0,08	0,05	0,04	0,03	0,02
Portas em madeira	0,14	0,10	0,08	0,08	0,08	0,08
Aberturas (menor dimensão > 1m)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Grelhas de ventilação (50% área aberta)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Cadeiras de madeira ou plástico em fila (0,9 m a 1,2 m)	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16
Cadeiras estofadas em fila (0,9 m a 1,2 m, valores mínimos típicos)	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,50
Cadeiras estofadas em fila (0,9 m a 1,2 m, valores máximos típicos)	0,50	0,70	0,80	0,90	1,00	1,00
Pessoas sentadas em fila (0,9 m a 1,2 m, valores mínimos típicos)	0,20	0,40	0,50	0,60	0,70	0,70
Pessoas sentadas em fila (0,9 m a 1,2 m, valores máximos típicos)	0,60	0,70	0,80	0,90	0,90	0,90

$$NRC = \frac{\alpha_{250Hz} + \alpha_{500Hz} + \alpha_{1000Hz} + \alpha_{2000Hz}}{4} \quad (2.1)$$

Onde,

NRC – “noise reduction coefficient” (-)

α_i – coeficiente de absorção sonora na banda de frequências de 1/1 oitava centrada em i (dB)

O valor obtido através da Equação (2.1) deve ser arredondado para o múltiplo de 0,05 mais próximo. Recomenda-se que um dado valor de NRC seja sempre analisado considerando a natureza do material ou sistema em causa (ver §2.3), sendo que sempre que o material seja suposto actuar numa gama de frequências estreita (por exemplo uma membrana), e particularmente fora da zona das médias frequências, deverá ser considerado o valor de α por banda de frequência de 1/1 oitava e não um valor médio. Nestes casos, e se se pretender recorrer a um índice único, a utilização do parâmetro α_w é mais apropriada.

Saliente-se que a utilização dos índices únicos apenas deverá servir para a comparação entre o desempenho de materiais alternativos e não para a previsão do tempo de reverberação.

Medição do coeficiente de absorção sonora

Embora o coeficiente de absorção sonora de uma solução construtiva possa ser estimado através de modelos teóricos, a complexidade associada à sua aplicação bem como o domínio de validade algo restrito dos modelos levam a que na prática se recorra predominantemente à medição em laboratório de uma dada solução construtiva.

O método mais utilizado para a avaliação do coeficiente de absorção sonora é o método da câmara reverberante (NP 20354:1993. Acústica. Determinação em câmara reverberante do coeficiente de absorção sonora e da área de absorção sonora equivalente.), baseado na medição do tempo de reverberação (ver § 2.4.2) da referida câmara com e sem uma amostra do material em estudo, e na comparação entre os valores obtidos para as duas situações (cujas diferenças apenas podem ser justificadas pelo efeito da amostra do material em estudo).

Importa neste ponto distinguir duas situações-limite em termos das características de absorção sonora de um espaço interior: a câmara anecóica e a câmara reverberante (Figura 2.6). Uma câmara reverberante é um espaço de dimensões predefinidas (em normalização específica para o efeito) em que as superfícies interiores são eminentemente reflectoras (valores de α próximos de 0), enquanto que uma câmara anecóica possui todas as superfícies interiores com características muito absorventes (valores de α próximos de 1).

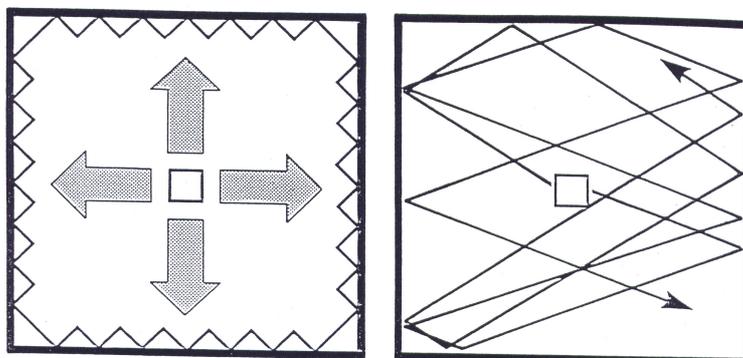


Figura 2.6 – Ilustração esquemática do princípio de funcionamento de uma câmara anecóica (à esquerda, sem reflexões) e de uma câmara reverberante (à direita, com múltiplas reflexões) (Tadeu e Mateus 1995)

Na Figura 2.7 é possível observar uma amostra de um material colocada no pavimento de uma câmara reverberante, de acordo com o procedimento normalizado (refira-se que a amostra do material possui uma área de 10 a 12 m²).

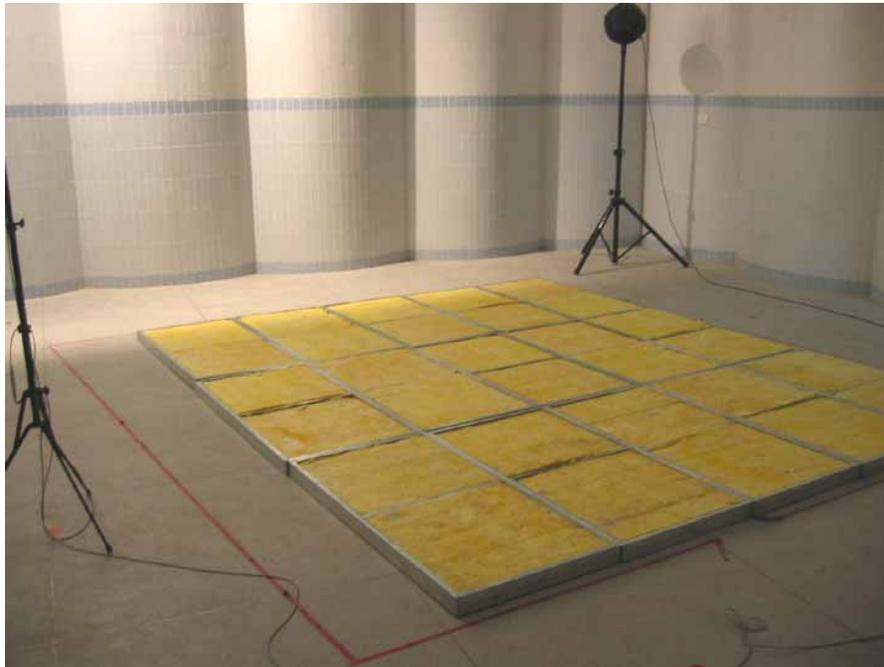


Figura 2.7 – Medição do coeficiente de absorção sonora de um material absorvente em câmara reverberante (<http://www.aa-lab.com>)

A medição do coeficiente de absorção sonora em câmara reverberante pode conduzir a valores do coeficiente de absorção sonora superior à unidade, que por vezes são reproduzidos em boletins de ensaio (consequência da utilização da metodologia de Sabine (ver §2.4.2) para a medição do coeficiente de absorção sonora). Nesses casos recomenda-se a limitação do valor de absorção sonora a utilizar a 1,0 para efeitos de utilização prática.

No caso dos coeficientes de absorção sonora serem apresentados em bandas de 1/3 oitava, os valores para bandas de 1/1oitava podem ser estimados recorrendo à média aritmética.

Um método alternativo para a determinação do coeficiente de absorção sonora é a utilização do tubo de ondas estacionárias (ou tubo de Kundt), embora possua o inconveniente do valor de α medido ser referente apenas a uma incidência perpendicular das ondas sonoras (ainda que seja possível converter posteriormente os valores obtidos para uma situação de incidência difusa), pelo que o seu uso não se encontra tão generalizado.

2.3 Materiais e Sistemas Absorventes Sonoros

O modo como a energia sonora é absorvida pelos materiais ou sistemas construtivos permite a distinção das seguintes três classes:

- Porosos (destinados sobretudo à absorção das altas frequências)
- Ressonadores (destinados sobretudo à absorção das médias frequências)
- Membranas (destinados sobretudo à absorção das baixas frequências).

2.3.1 Materiais Porosos

Estes tipos de materiais são caracterizados fisicamente por possuírem uma estrutura aberta de pequenas dimensões que é acessível às ondas sonoras de comprimento de onda reduzido, isto é, de frequência elevada, fazendo movimentar o ar ao longo dos interstícios existentes no seu interior, entre o conjunto de partículas/fibras que os constituem (Figura 2.8). A dissipação da energia da onda sonora incidente em energia térmica processa-se fundamentalmente devido ao atrito decorrente da movimentação do ar nos interstícios do material, e em menor proporção por viscosidade e atrito interno aquando da vibração da sua própria estrutura.

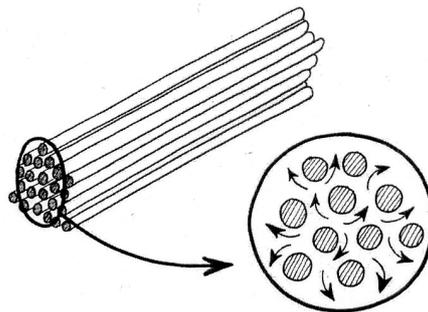


Figura 2.8 – Representação esquemática de um material do tipo poroso (Souza et al. 2003)

O parâmetro que determina em grande medida o desempenho de absorção sonora deste tipo de materiais é a resistividade ao fluxo de ar. Se esta for muito reduzida então a estrutura do material não é densa o suficiente para que as perdas por atrito sejam elevadas; por outro lado, se a estrutura for demasiado densa, então o ar terá dificuldade em penetrar no interior do material e a absorção sonora será igualmente reduzida.

O desempenho de absorção sonora dos materiais porosos é particularmente eficaz para a gama das altas frequências, mas podem apresentar um aumento da sua eficiência para a zona inferior do espectro de interesse na acústica interior de espaços correntes (125 – 4000 Hz em bandas de 1/1 oitava), se a sua espessura e/ou o espaço de ar entre o material e a superfície rígida na qual é aplicado forem aumentados (Figura 2.9). Porém um aumento da espessura não influi normalmente de uma forma significativa na absorção das altas frequências. Quanto à densidade do material, a sua variação, considerando valores correntes de mercado, não influi de forma notória no seu desempenho de absorção sonora.

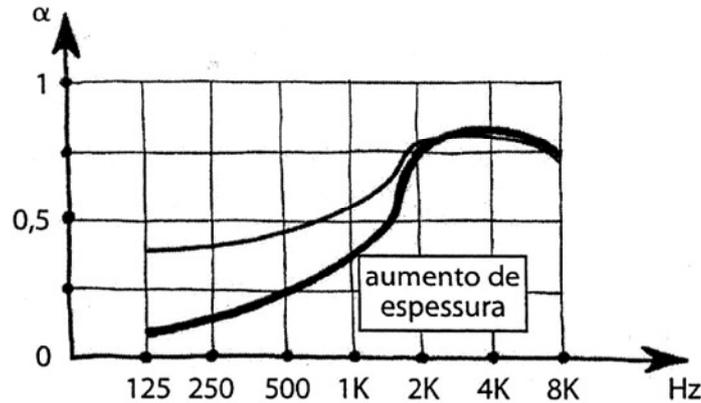


Figura 2.9 – Efeito do aumento da espessura e da caixa de ar na absorção sonora do material (Souza et al. 2003)

A espessura óptima do material depende sobretudo da gama de frequências para a qual se pretende que o desempenho de absorção seja elevado, isto porque a máxima eficiência ocorre se o material for colocado numa posição que permita uma dissipação de energia na zona onde a velocidade de vibração das partículas do ar é maior (que para uma incidência perpendicular corresponde a $\lambda/4$). No caso de uma incidência difusa o referido valor diminui para $\lambda/8$ (em que λ corresponde ao comprimento de onda, em m).

Alguns exemplos de materiais com estas características utilizados habitualmente em edifícios são: lã de rocha, lã de vidro, espumas, tecidos e alcatifas, massas porosas para projecção, aglomerados de madeira, aglomerados de cortiça, etc. É necessária precaução com a eventual pintura da superfície destes materiais, pois esta pode diminuir a sua porosidade e prejudicar a absorção sonora. Uma eventual coloração dos materiais deve ser sempre garantida em fábrica, ou por um processo específico definido pelo fabricante.

2.3.2 Membranas

Este tipo de sistema é constituído por um painel flexível em geral de pequena espessura (por exemplo gesso cartonado) apoiado numa estrutura intermédia fixada num elemento rígido (por exemplo parede, pavimento ou tecto) e com um espaço de ar no tardo (que poderá ser ou não total ou parcialmente preenchido por um material absorvente do tipo poroso) (Figura 2.10).

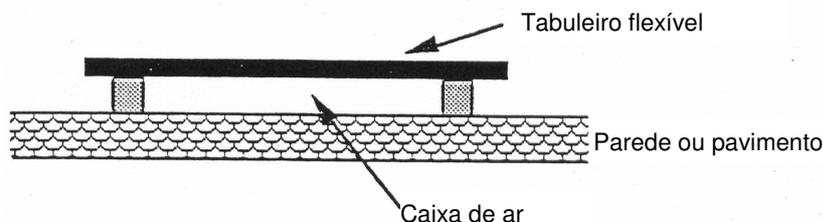


Figura 2.10 – Representação esquemática de uma membrana (Tadeu e Mateus 1995)

A vibração do painel provocada por uma onda sonora incidente determina a compressão e tracção do ar existente na caixa de ar, sendo que se a frequência da onda sonora for próxima da frequência de ressonância do sistema massa-mola constituído respectivamente pelo painel e o espaço de ar, então a dissipação de energia sonora, sobretudo em energia mecânica (e posteriormente em calor), será máxima, e assim também o respectivo valor de α .

As membranas são particularmente eficazes para a absorção das baixas frequências, sendo possível estimar a sua frequência de eficácia máxima pela Equação (2.2). Esta expressão conduz a um resultado que por vezes não se verifica exactamente em aplicações práticas devido às características de rigidez do painel e às condições de apoio.

$$f_r = \frac{60}{\sqrt{m d}} \quad (2.2)$$

Onde:

f_r – frequência de ressonância (Hz)

m – massa superficial (kg/m^2)

d – espessura da caixa de ar (m)

Importa referir que esta solução é bastante selectiva (em redor da frequência de ressonância) em termos das frequências com uma elevada eficácia de absorção sonora, o que constitui uma clara desvantagem. Uma possível solução para atenuar este aspecto é a introdução na caixa de ar de um material do tipo poroso, obtendo-se uma zona com bom desempenho de absorção sonora mais alargada, embora o valor máximo atingido diminua (Figura 2.11).

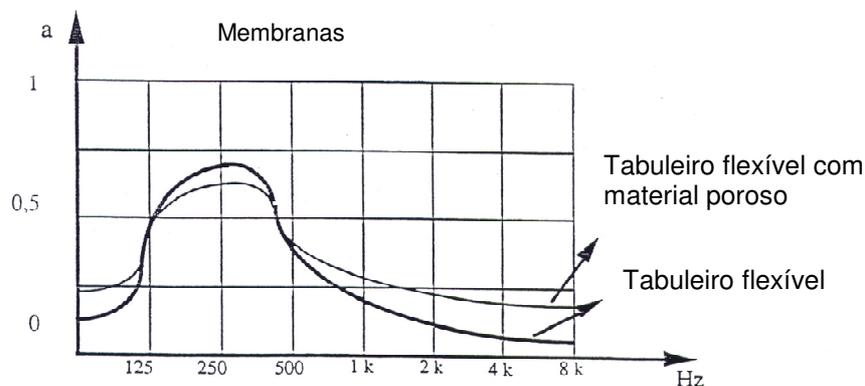


Figura 2.11 – Efeito da inclusão de um material poroso na caixa de ar de uma membrana (Tadeu e Mateus 1995)

Alguns exemplos de materiais com estas características utilizados habitualmente em edifícios são: painéis de madeira ou gesso cartonado aplicados através de uma estrutura de suporte como revestimento de tectos e/ou de paredes.

2.3.3 Ressonadores

Os ressoadores (também designados por ressoadores de Helmholtz) baseiam a sua acção, tal como as membranas, no fenómeno da ressonância. Um ressoador é um sistema constituído por uma cavidade com ar confinado (por exemplo uma garrafa), ligado ao ambiente através de uma abertura estreita (gargalo). Também para este sistema pode ser definida uma analogia com um sistema do tipo massa-mola amortecido, em que o ar no gargalo corresponde ao elemento massa e o ar no corpo do ressoador ao elemento mola (com os mecanismos de dissipação de energia por atrito dos movimentos do ar no contacto com as paredes da cavidade sendo responsáveis pelo amortecimento) (Figura 2.12).

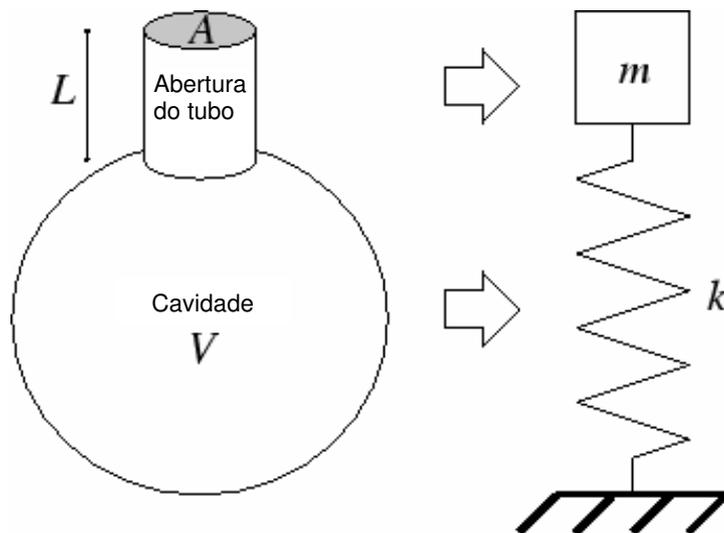


Figura 2.12 – Representação esquemática do modo de funcionamento de um ressoador (<http://www.music.mcgill.ca/~gary>)

Tal como pode se observar na Figura 2.13, a frequência de ressonância de um ressoador cresce com a área de abertura do gargalo, sendo inversamente proporcional ao volume interior e ao comprimento do gargalo. No exemplo da garrafa, se se soprar para o seu interior, a frequência (predominante) do som produzido será tanto mais grave quanto menor for a secção da abertura e maiores a profundidade do gargalo e o volume da garrafa.

A frequência de ressonância de um ressoador pode ser estimada a partir da Equação (2.3):

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V(l + 1,6r)}} \quad (2.3)$$

Onde:

f_r – frequência de ressonância (Hz)

c – velocidade de propagação do som no ar (m/s)

S – área do gargalo (mm^2)

V – volume de ar interior (dm^3)

r – raio do gargalo (mm)

l – comprimento do gargalo (mm)

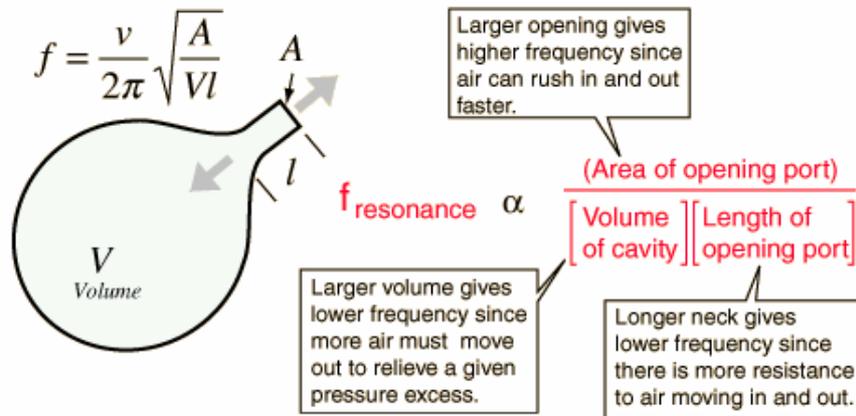


Figura 2.13 – Representação esquemática de um ressoador com a indicação dos parâmetros que fazem variar a frequência de ressonância (<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>)

Este tipo de sistema, tal como as membranas, é muito selectivo quanto à zona de máxima eficiência, podendo a zona útil de desempenho ser também alargada através da colocação de um material do tipo poroso no volume de ar (Figura 2.14).

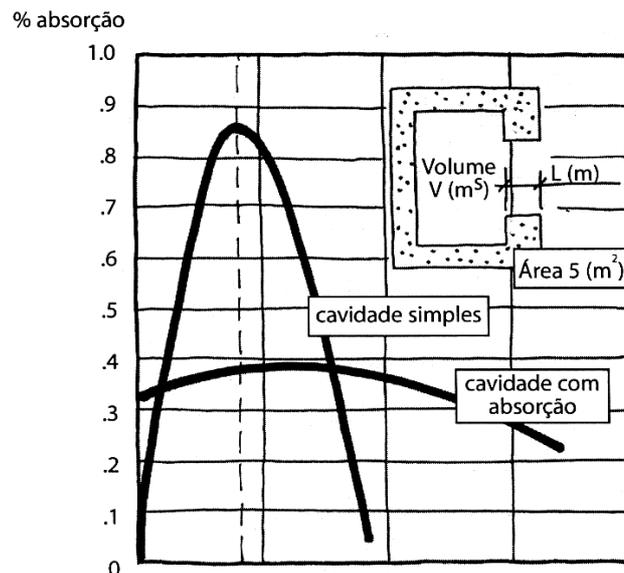


Figura 2.14 – Efeito da inclusão de um material poroso no volume de ar de um ressoador (Souza et al. 2003)

Em edifícios correntes, as soluções de absorção sonora adoptadas com base neste tipo de sistema não se baseiam num único elemento ressoador isolado mas sim num conjunto de ressoadores agrupados, como é o caso de tectos falsos perfurados (normalmente em madeira, gesso cartonado ou metálicos) (Figura 2.15).

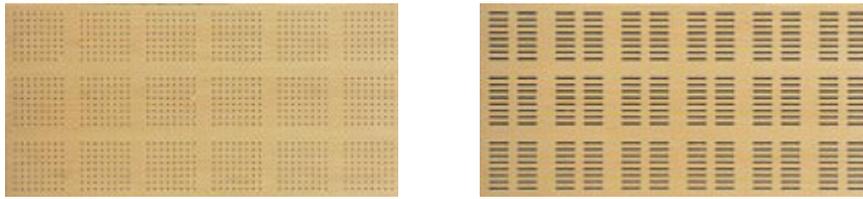


Figura 2.15 – Exemplos de ressoadores agrupados (Gustafs)

Os ressoadores agrupados são em regra materializados à base de aberturas circulares, para os quais a frequência de eficácia de absorção máxima pode ser obtida pela Equação (2.4).

$$f_r = \frac{10 c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{d(e + 1,6 r)}} \quad (2.4)$$

Onde:

f_r – frequência de ressonância (Hz)

c – velocidade de propagação do som no ar (m/s)

P – percentagem de perfuração (%)

d – espessura da caixa de ar (cm)

e – espessura da placa perfurada (cm)

r – raio de perfuração (cm)

Domínio de validade da expressão: $f_r \times d \leq 3400$ Hz-cm e orifícios circulares.

Note-se que a quantificação da frequência de absorção máxima para ressoadores agrupados através da equação apresentada possui um cariz apenas indicativo do desempenho de uma dada solução, recomendando-se no caso de uma aplicação prática a consulta do boletim de ensaio laboratorial da respectiva solução.

2.3.4 Aplicação Conjugada dos Diferentes Tipos de Sistema

Em muitas aplicações práticas correntes a mesma solução técnica conjuga as propriedades dos diversos sistemas descritos, o que permite garantir um bom desempenho de absorção sonora para uma gama alargada de frequências. Aliás, esta é normalmente uma exigência de projecto, visto que a utilização de um só tipo de sistema absorvente num espaço pode levar a características de absorção excessivas numa determinada gama de frequências, causando efeitos indesejáveis ao nível da percepção sonora.

Considere-se a aplicação de um sistema à base de placas perfuradas similar ao ilustrado na Figura 2.16 como revestimento de uma laje de tecto ou da envolvente de um espaço, incluindo uma caixa de ar entre as placa perfuradas e a superfície rígida de suporte e um material poroso (por exemplo um painel de lã mineral) no seu interior. O desempenho desta solução conjuga os efeitos da porosidade do painel de lã mineral (altas frequências) com o efeito de ressonância típico de uma membrana (baixas frequências) e ainda com o desempenho de um ressoador (médias frequências).

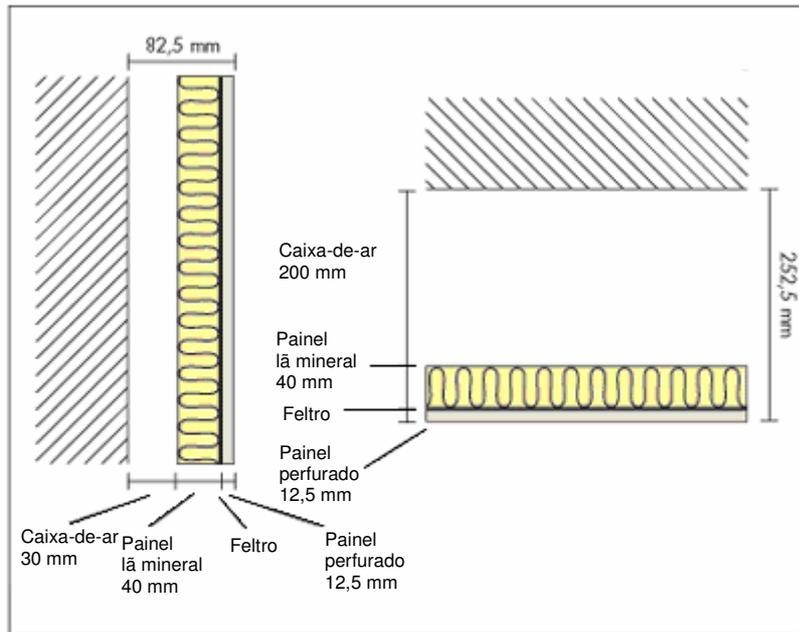


Figura 2.16 – Conjugação dos três tipos de sistemas absorventes (poroso, membrana e ressonador) numa mesma solução (painel de madeira perfurado com um raio de perfuração de 8mm e uma percentagem de perfuração de 24%) (Gustafs)

Na Figura 2.17 podem-se observar os resultados de um ensaio em câmara reverberante para uma solução com estas características.

Coefficiente de absorção sonora

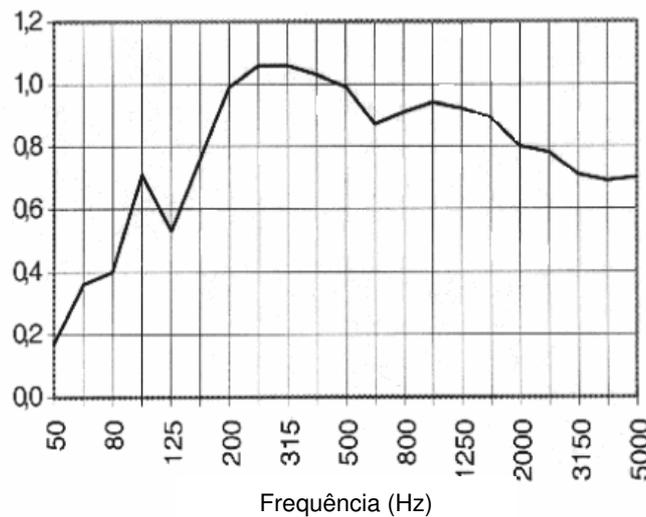


Figura 2.17 – Resultados da avaliação laboratorial do coeficiente de absorção sonora para o sistema apresentado na figura anterior, verificando-se um melhor desempenho para as médias frequências, mas também razoável nas baixas e altas frequências (Gustafs)

Saliente-se como regra de boa prática que a especificação de um material ou sistema absorvente deve ser sempre efectuada a partir de um requisito de desempenho (NRC, α_w , ou outro) determinado a partir das exigências colocadas pela situação específica em análise, e nunca apresentado apenas uma solução comercial existente no mercado.

Adverte-se ainda que a proposição de uma solução para incrementar a absorção sonora de um espaço deve ponderar o comportamento da mesma ao nível de diversas valências tendo em conta as características do local onde irá ser aplicada, tais como reacção ao fogo, durabilidade, isolamento térmico, aspecto, higiene, entre outros.

2.4 Metodologias de Análise – Teoria Estatística

2.4.1 Campo Sonoro Difuso

O conceito de campo sonoro difuso é fundamental para a utilização da teoria estatística na análise da acústica interior de um espaço fechado. De uma forma simples pode-se definir um campo sonoro difuso como aquele que possui a mesma densidade de energia sonora em qualquer ponto do seu espaço, para o qual todas as direcções possíveis de propagação das ondas sonoras ocorrem com a mesma probabilidade.

Trata-se de uma conjectura teórica que não se verifica em nenhum espaço fechado mas que permite uma análise matemática simplificada cujos resultados se podem considerar fiáveis em diversas situações práticas (por resultados “fiáveis” entenda-se uma variação de $\pm 10\%$ no caso da avaliação do tempo de reverberação e de ± 2 dB no nível de pressão sonora).

Perante um exemplo concreto de um espaço existem alguns aspectos que podem “a priori” invalidar a assumpção teórica de um campo sonoro difuso e, por conseguinte, a utilização da teoria estatística (pelo menos na sua descrição clássica):

- Volume irregular – uma das três dimensões superior em pelo menos 5 vezes o valor da maior de qualquer uma das demais (EN 12354-6), embora um valor de 3 vezes possa ser já considerado problemático (DTU 2006);
- Absorção sonora não uniforme – o valor do coeficiente de absorção sonora entre pares de superfícies opostas não deve variar em mais de três vezes, exceptuando no caso da presença de objectos que incrementem a difusão sonora (EN 12354-6);
- Presença excessiva de objectos no interior – fracção do volume ocupada por objectos deve ser inferior a 0,2 (EN 12354-6);

- Volume interior muito elevado – um valor de 5000 m³ pode ser referido como referência indicativa (DTU 2006).

Ao admitir-se um campo sonoro difuso está-se de forma implícita a considerar relações de fase desprezáveis entre reflexões (permitindo tratá-las numa base energética) e uma densidade modal elevada o suficiente que permita desprezar a influência dos modos próprios do espaço (teoria ondulatória).

Esta última condição é difícil de garantir sobretudo nas baixas frequências, podendo estimar-se um valor de referência para a frequência a partir da qual essa hipótese possa ser admitida sem um erro significativo, conhecida por frequência de Schroeder (Equação (2.5)).

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{T_{60}}{V}} \quad (2.5)$$

Onde:

T_{60} – tempo de reverberação (s)

V – volume (m³)

Por conseguinte, abaixo da frequência de Schroeder não se deve proceder à avaliação das condições acústicas interiores recorrendo à teoria estatística.

2.4.2 Tempo de Reverberação

Conceito Geral

Quando num espaço fechado uma fonte sonora interrompe a sua emissão, a componente do campo sonoro interior relativa ao som directo extingue-se quase imediatamente (intervalo de tempo que a onda sonora demora a atingir o receptor), mas persiste a componente relativa às múltiplas reflexões das ondas sonoras na envolvente, diminuindo mais ou menos rapidamente em função do grau de absorção da envolvente (a absorção do ar pode ser igualmente um factor importante) e do volume interior.

Sob o ponto de vista da percepção sonora no interior do espaço este fenómeno traduz-se num prolongamento da sensação sonora, designando-se por reverberação (por vezes erradamente confundido com o eco).

Define-se tempo de reverberação como o intervalo de tempo (medido em s) necessário a um decaimento do nível de pressão sonora (L) de 60 dB (Figura 2.18) a partir do momento que a fonte sonora interrompe a sua emissão¹³, designando-se normalmente por T_{60} .

¹³ Equivalente à redução da intensidade sonora a 1 milionésimo do seu valor inicial, ou a pressão sonora a 1 milésimo do seu valor inicial.

Na prática o tempo de reverberação permite quantificar o intervalo de tempo que um estímulo sonoro demora a se extinguir após a interrupção da fonte que o originou. O decaimento sonoro será tanto mais rápido quanto mais absorventes forem as superfícies da envolvente do espaço.

O seu valor pode também nalguns casos (em geral quando o ruído de fundo do espaço é muito elevado) ser obtido por extrapolação (para um decaimento de 60 dB) a partir de um decaimento de 20 dB ou de 30 dB (situações mais comuns), designando-se nesse caso respectivamente T_{20} ou T_{30} (de qualquer modo a interpretação do resultado obtido deverá corresponder sempre a um decaimento de 60 dB).

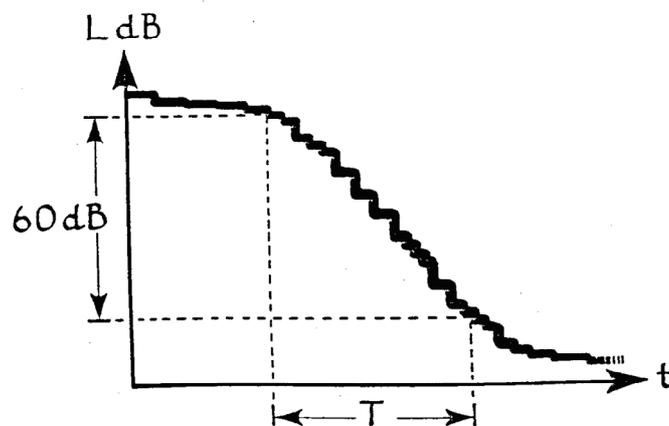


Figura 2.18 – Ilustração do conceito do tempo de reverberação (neste caso a partir do nível de pressão sonora L)

O tempo de reverberação é o parâmetro fundamental para a análise da qualidade acústica de espaços correntes (e também importante para espaços não correntes), existindo para cada tipo de utilização valores de referência recomendáveis (ver §2.5). A necessidade prática de limitar o tempo de reverberação para uma dada utilização a um intervalo de valores resulta do tipo de alterações provocadas no campo sonoro interior pela sua variação.

De uma forma simplificada, e considerando uma situação em que a totalidade das superfícies da envolvente interior de um espaço possuíssem valores de α próximos de 1, então a energia sonora reflectida seria praticamente nula e os níveis de pressão sonora no interior do local seriam demasiado reduzidos (por exemplo numa sala de reuniões de média dimensão a voz de um orador poderia não ser perceptível mesmo para uma pequena distância).

No extremo oposto, para valores de α próximos de 0, os níveis de pressão sonora no local seriam muito elevados (por exemplo numa indústria com equipamentos em funcionamento), com o grave inconveniente para o caso de locais com emissão da palavra (por exemplo uma sala de reuniões) da energia sonora reflectida se sobrepor à energia directa e assim diminuir a inteligibilidade da mensagem.

Área de absorção sonora equivalente e coeficiente de absorção sonora médio

Define-se área de absorção sonora equivalente (A , em m^2 , por banda de frequências) de um espaço como o somatório do produto dos coeficientes de absorção sonora dos materiais da sua envolvente pela área respectiva, conforme a Equação (2.6).

$$A = \sum_i \alpha_i S_i \quad (2.6)$$

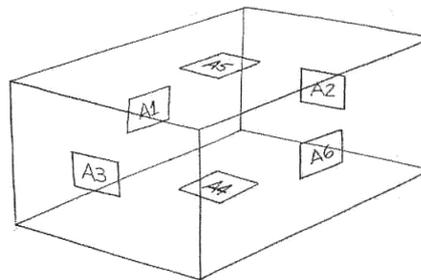
Onde:

A – área de absorção sonora equivalente, para uma dada banda de frequências (m^2)

α_i – coeficiente de absorção sonora da superfície i (-)

S_i – área da superfície i (m^2)

A Figura 2.19 exemplifica a quantificação da área de absorção sonora equivalente num espaço.



$A_1 = 50 \text{ m}^2 \quad \alpha=0,20$	$A_{\text{total}} = (50 \times 0,20) + (25 \times 0,10) + (50 \times 0,20) + (25 \times 0,30) + (50 \times 0,05) + (50 \times 0,05)$ $A_{\text{total}} = 35 \text{ Sm}$
$A_2 = 25 \text{ m}^2 \quad \alpha=0,10$	
$A_3 = 50 \text{ m}^2 \quad \alpha=0,20$	
$A_4 = 25 \text{ m}^2 \quad \alpha=0,30$	
$A_5 = 50 \text{ m}^2 \quad \alpha=0,05$	
$A_6 = 50 \text{ m}^2 \quad \alpha=0,05$	

Figura 2.19 – Exemplo prático da determinação da área de absorção sonora equivalente (Souza et al. 2003)

Note-se que apesar do parâmetro A ser dado em m^2 , esta unidade corresponde a uma área de absorção sonora equivalente e não a uma área propriamente dita. Pode ser entendida como a área de um hipotético material absorvente com um valor de $\alpha = 1$ cuja utilização se traduziria no mesmo efeito de absorção sonora que a utilização do material real com a respectiva área. Nalgumas publicações (como o exemplo da Figura 2.19) é possível encontrar a unidade Sm como alternativa na quantificação da área de absorção equivalente (em homenagem a Sabine, o precursor do conceito e da quantificação do tempo de reverberação – ver ponto seguinte).

O coeficiente de absorção sonora médio da envolvente interior (α_m) corresponde a:

$$\alpha_m = \frac{1}{S} \sum_i \alpha_i S_i \quad (2.7)$$

Onde:

α_m – coeficiente de absorção sonora médio, para uma dada banda de frequências (-)
 S – área total da superfície interior (m^2)
 α_i – coeficiente de absorção sonora da superfície i (-)
 S_i – área da superfície i (m^2)

Analisando as Equações (2.6) e (2.7) facilmente se constata que:

$$A = S \alpha_m \quad (2.8)$$

Onde:

A – área de absorção sonora equivalente (, para uma dada banda de frequências m^2)
 S – área total da superfície interior (m^2)
 α_m – coeficiente de absorção sonora médio, para uma dada banda de frequências (-)

Em rigor, a área de absorção sonora equivalente depende ainda da absorção sonora adicional conferida pela presença de pessoas e/ou objectos (A_j), a absorção do ar (m):

$$A = \sum_i \alpha_i S_i + \sum_j A_j + 4 m V \quad (2.9)$$

Onde:

A – área de absorção sonora equivalente (, para uma dada banda de frequências (m^2))
 α_i – coeficiente de absorção sonora da superfície i (-)
 S_i – área da superfície i (m^2)
 A_j – área de absorção sonora equivalente conferida por pessoas e/ou objectos (m^2)
 m – coeficiente de absorção sonora do ar (Neper/m)
 V – volume interior livre (m^3)

A absorção sonora do ar é variável com as condições termo-higrométricas interiores (humidade relativa e temperatura), podendo ser utilizados os valores constantes da Tabela 2.3. No entanto para bandas de 1/1 oitava inferiores à banda centrada nos 1000 Hz, e para espaços com volume inferior a 200 m^3 , a absorção sonora conferida pelo ar pode ser desprezada.

Tabela 2.3 – Valores típicos para o coeficiente de absorção sonora do ar, m (EN 12354-6)

	m, em 10^{-3} Neper/m, para bandas de 1/1 oitava com a frequência central em Hz						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
10°C, de 30% a 50% de humidade	0,1	0,2	0,5	1,1	2,7	9,4	29,0
10°C, de 50% a 70% de humidade	0,1	0,2	0,5	0,8	1,8	5,9	21,1
10°C, de 70% a 90% de humidade	0,1	0,2	0,5	0,7	1,4	4,4	15,8
20°C, de 30% a 50% de humidade	0,1	0,3	0,6	1,0	1,9	5,8	20,3
20°C, de 50% a 70% de humidade	0,1	0,3	0,6	1,0	1,7	4,1	13,5
20°C, de 70% a 90% de humidade	0,1	0,3	0,6	1,1	1,7	3,5	10,6

Quando as condições de temperatura interior e de humidade relativa do espaço em análise não são especificadas ou conhecidas, recomenda-se a utilização dos seguintes valores:

- Temperatura interior igual a 20 °C;
- Humidade relativa compreendida entre 50% a 70%.

Principais modelos de cálculo estatísticos – equações de Sabine e de Norris-Eyring

Os modelos de cálculo (estatísticos) do tempo de reverberação de Sabine e de Norris-Eyring são os mais divulgados e utilizados para a previsão do valor de T_{60} , sendo apelidados de modelos “clássicos”. Note-se que a dedução teórica de ambos admite como pressuposto a existência de um campo sonoro interior difuso.

O primeiro modelo de cálculo referido (Sabine 1898) resultou de uma extensa investigação experimental sobre condições de inteligibilidade da palavra numa sala de aula da Universidade de Harvard (Estados Unidos) realizado pelo físico Wallace Clement Sabine, cientista a quem se deve o conceito de tempo de reverberação de um espaço. A sua famosa equação define uma relação entre o tempo de reverberação, a área de absorção sonora equivalente e o volume interior livre do espaço (Equação (2.10)).

$$T_{60} = \frac{55,3 V}{c A} \cong \frac{0,16 V}{\sum_i \alpha_i S_i + \sum_j A_j + 4 m V} \quad (2.10)$$

Onde:

T_{60} – tempo de reverberação (s)

V – volume interior livre (m^3)

c – velocidade de propagação do som no ar (m/s)

A – área de absorção sonora equivalente (m^2)

Refira-se que a constante de 0,16 que em regra se utiliza no numerador corresponde a admitir uma velocidade de propagação do som no ar (c) igual a 345,6 m/s.

O modelo de cálculo de Norris-Eyring (1930) parte do pressuposto que o processo de absorção sonora se realiza de uma forma discreta cada vez que a energia sonora incide na envolvente, ao contrário da assumpção de um decaimento contínuo no caso de Sabine (refira-se que o modelo de Sabine foi demonstrado teoricamente por Franklin em 1902).

A equação resultante do modelo de Norris-Eyring é a seguinte:

$$T_{60} = \frac{55,3 V}{c \left(-S \ln(1 - \alpha_m) + \sum_j A_j + 4 m V \right)} \quad (2.11)$$

Onde:

T_{60} – tempo de reverberação (s)

V – volume interior livre (m^3)

c – velocidade de propagação do som no ar (m/s)

S – área total da superfície interior (m^2)

α_m – coeficiente de absorção sonora médio (-)

A_j – área de absorção sonora equivalente conferida por pessoas e/ou objectos (m^2)

m – coeficiente de absorção sonora do ar (Neper/m)

V – volume interior livre (m^3)

Analisando a Equação (2.11) verifica-se que para espaços com uma reduzida absorção sonora (na prática com um valor de α_m inferior a 0,3), a equação pode ser simplificada (uma vez que o termo $-\ln(1-\alpha) \cong \alpha$) para a equação de Sabine.

Por conseguinte, em espaços reverberantes ($\alpha_m < 0,3$) os dois modelos são equivalentes. No entanto a equação de Norris-Eyring revela-se mais correcta para espaços com maior absorção, embora seja particularmente adequada caso os coeficientes de absorção sonora da envolvente interior sejam muito semelhantes.

A aplicação destes modelos pode ser efectuada para bandas de frequência de 1/1 oitava ou de 1/3 oitava, sendo normalmente suficiente a análise por bandas de 1/1 oitava entre os 100 e os 4000 Hz (através da aplicação da teoria estatística apresentada não deverão ser calculados valores quer acima quer abaixo dos limites referidos, por questões de fiabilidade).

Modelos estatísticos alternativos

A não garantia de condições próximas das de um campo difuso no caso da aplicação dos modelos estatísticos clássicos pode resultar em diferenças significativas entre os valores estimados do tempo de reverberação e os valores característicos de um dado espaço, que em casos extremos podem ser superiores a 100% do valor estimado (EN 12354-6).

Nesses casos recomenda-se o recurso a formulações modificadas a partir da teoria estatística clássica, como por exemplo as de Arau-Puchades (Arau 1999) ou de Nilsson (EN 12354-6).

2.5 Critérios de Desempenho Acústico

Em espaços correntes, o tempo de reverberação é o parâmetro mais utilizado para a avaliação da qualidade acústica interior.

A definição de critérios de desempenho acústico ao nível da qualidade acústica interior não se deve restringir às exigências de cariz regulamentar (que em geral correspondem apenas a valores mínimos de conforto), recomendando-se a especificação de critérios complementares que assegurem condições de conforto acústico na utilização compatíveis com o tipo de edifício em causa (valores mais restritivos do que as exigências regulamentares e/ou definição de critérios para situações omissas).

É possível para cada tipo de espaço definir valores apropriados para o tempo de reverberação em função da utilização (e nalguns casos do volume do espaço interior), tal como apresentado na Figura 2.20. Refira-se que os valores extremos correspondem em regra a locais destinados em exclusivo à transmissão da palavra (valores mínimos) ou à produção e/ou audição de música (valores máximos), tal como se pode observar na Figura 2.20.

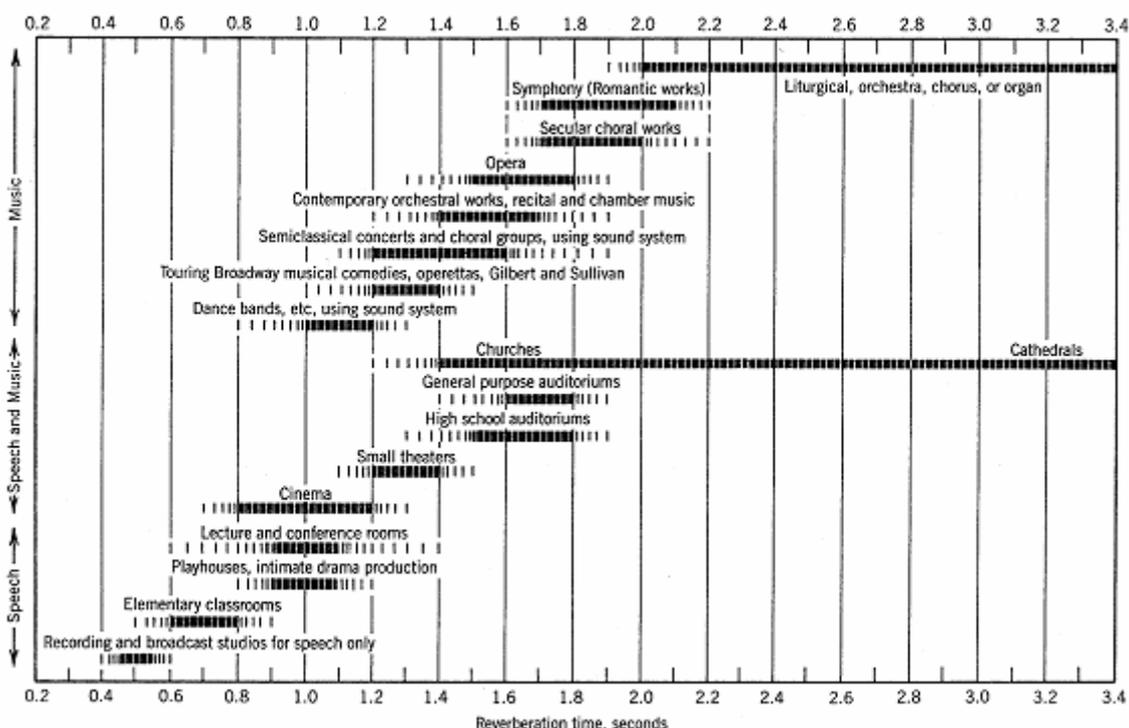


Figura 2.20 – Exemplos de valores aconselháveis para o tempo de reverberação em função do tipo de utilização (Cavanaugh 1999)

A preferência por um determinado valor de tempo de reverberação varia de igual modo com a frequência, sendo um aspecto importante sobretudo no caso da música (em que por exemplo o auditor tendencialmente aprecia um valor mais elevado nas baixas frequências).

Em espaços correntes é em geral suficiente a caracterização do tempo de reverberação pela média dos resultados das bandas de 1/1 oitava centradas nos 500 e 1000 Hz (T_{mid}). No entanto, mesmo neste tipo de espaços é necessário garantir alguma uniformidade na variação do tempo de reverberação por banda de frequências, o que poderá na prática implicar uma combinação de vários tipos de sistemas absorventes, tal como foi já referido.

A regulamentação Portuguesa relativa às exigências acústicas (mínimas) em edifícios (Decreto-Lei n.º 129/2002) impõe valores máximos para o tempo de reverberação no interior de alguns espaços das diversas categorias de edifícios definidas, sobretudo quando é expectável um elevado número de pessoas na sua utilização combinado com exigências de concentração ou sossego, ou ainda de transmissão da palavra com adequadas condições de inteligibilidade:

Edifícios comerciais, industriais ou de serviços:

- *Refeitórios ou recintos públicos de restauração, escritórios com $V \geq 100 \text{ m}^3$;*

Edifícios escolares e de investigação:

- *Salas de aula, bibliotecas, salas polivalentes, refeitórios, ginásios, circulações comuns;*

Edifícios hospitalares:

- *Refeitórios; enfermarias e átrios/salas de espera com $V \geq 100 \text{ m}^3$, circulações comuns;*

Recintos desportivos:

- *Interior do recinto;*

Estações de transporte de passageiros:

- *Interior dos átrios ou salas de embarque com $V \geq 350 \text{ m}^3$.*

A limitação do tempo de reverberação definida regulamentarmente é avaliada tendo em conta o valor médio estimado (ou medido) para as bandas de frequências de 1/1 oitava centradas nos 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz ($T_{500\text{Hz}-2\text{kHz}}$), admitindo os espaços não ocupados e normalmente mobilados (Equação (2.12)). O nível de exigência é incrementado no caso dos espaços serem dotados de sistemas de difusão pública de mensagens sonoras (Equação (2.13)).

$$T_{500\text{Hz}-2\text{kHz}} \leq 0,15 V^{1/3} \quad (2.12)$$

$$T_{500\text{Hz}-2\text{kHz}} \leq 0,12 V^{1/3} \quad (2.13)$$

Onde:

$T_{500\text{Hz}-2\text{kHz}}$ – média dos valores de tempo de reverberação para as bandas de 1/1 oitava centradas nos 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz (s)

V – volume interior livre (m^3)

No caso de edifícios habitacionais não existem exigências legais aplicáveis, embora se afigure fundamental como exigência de conforto o controlo do tempo de reverberação, em especial em espaços de circulação comum (caixas de escadas ou corredores de circulação comum).

Neste tipo de espaços recomenda-se a utilização como parâmetro de referência na definição da exigência de desempenho a área de absorção sonora equivalente (A) e não o tempo de reverberação propriamente dito (atendendo sua à forma característica), como acontece aliás para o caso das circulações comuns de edifícios escolares e hospitalares a nível regulamentar.

Assim, um possível critério complementar de conforto para edifícios de habitação poderia ser a seguinte exigência para zonas de circulação comum: $A_{500\text{Hz}-2\text{ kHz}} \geq 0,5 \times S_{\text{planta}}$ (m²), em que o valor de A corresponde à média aritmética da área de absorção equivalente para as bandas de 1/1 oitava centradas nos 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz, e S_{planta} corresponde à área de pavimento da zona de circulação comum.

2.6 Potenciais Defeitos Acústicos em Espaços Correntes

A utilização da teoria estatística para a análise de espaços correntes pode conduzir à obtenção de resultados médios adequados (por exemplo o tempo de reverberação), mas que não garantem que os espaços não padeçam de defeitos acústicos passíveis de deteriorar as condições de conforto acústico no seu interior, dos quais se podem destacar como os mais comuns (em espaços não correntes existem bastantes mais potenciais defeitos acústicos):

- Eco;
- Eco flutuante;
- Focalização sonora.

2.6.1 Eco

A existência de reflexões com um desfasamento temporal elevado em relação à recepção do som directo por parte de um ouvinte (na transmissão da palavra é usual considerar-se um valor de referência de 50 ms proposto a partir dos estudos de Haas) traduz-se numa sensação de desconforto pois o mecanismo auditivo humano já não o integra como um prolongamento natural do som directo, efeito que se designa normalmente por eco (Figura 2.21).

Na Figura 2.22 apresenta-se um exemplo de um reflectograma (representação do conjunto de reflexões que chegam a um dado receptor num gráfico intensidade vs. tempo) no qual se detecta a presença de uma reflexão tardia e de intensidade relevante, isto é, um eco.

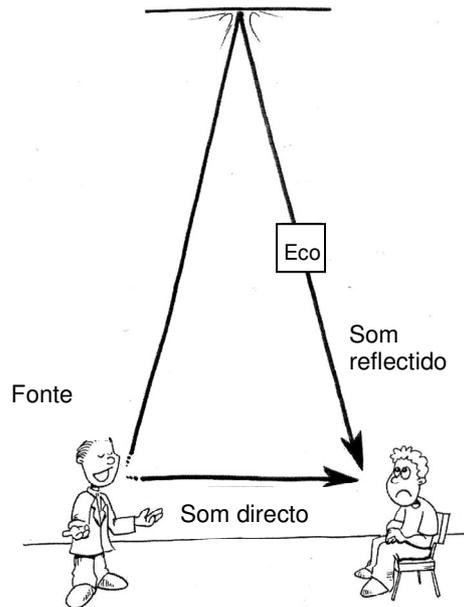


Figura 2.21 – Ilustração de um potencial eco percebido pelo receptor (Souza et al. 2003)

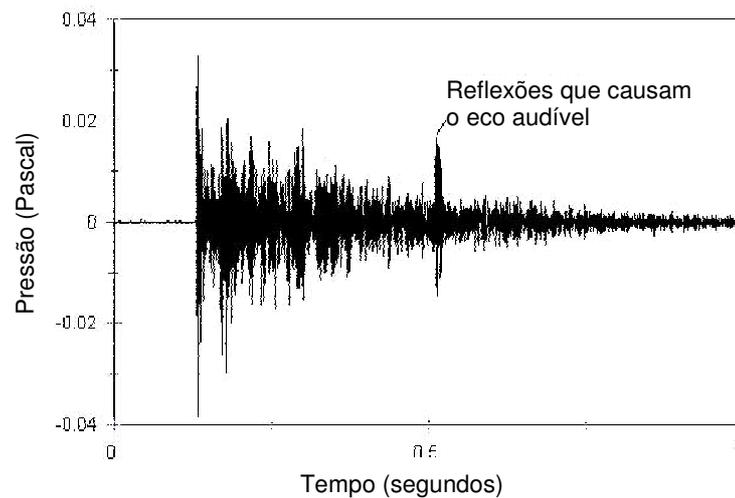


Figura 2.22 – Exemplo da detecção de um eco num reflectograma (http://www.acoustics.salford.ac.uk/acoustics_world/concert_hall_acoustics/testing.html)

2.6.2 Eco Flutuante

O fenómeno de eco flutuante produz-se no caso da emissão sonora entre duas superfícies paralelas reflectoras (não muito afastadas entre si), e traduz-se por uma rápida sucessão de reflexões do som original; o efeito é particularmente perceptível no caso do espaço possuir boas características de absorção sonora na restante envolvente (e mesmo ao ar livre entre duas superfícies reflectoras, por exemplo através de um estímulo sonoro tão simples como o bater de palmas) (Figura 2.23).

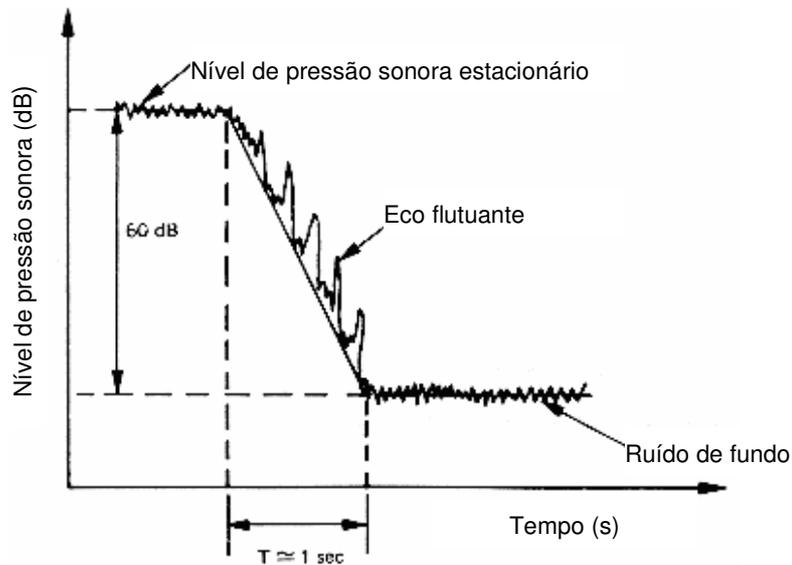


Figura 2.23 – Exemplo da medição do tempo de reverberação num receptor para o qual foi detectado um eco flutuante

2.6.3 Focalização Sonora

A utilização de formas geométricas que promovam a concentração da energia sonora em determinados pontos do espaço (como é o caso de superfícies côncavas ou circulares) deve ser evitada de modo a preservar a uniformidade do campo sonoro no interior do espaço.

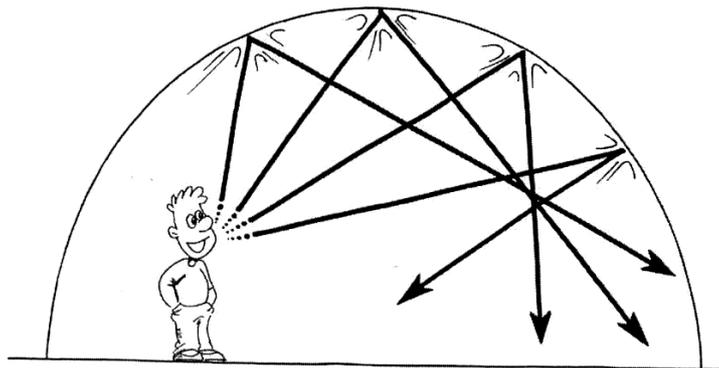


Figura 2.24 – Fenómeno de focalização sonora devido ao efeito de uma superfície côncava (Souza et. al. 2003)

2.6.4 Estratégias de Resolução

Apesar da resolução deste tipo de defeitos acústicos não obedecer a um conjunto de regras predefinidas (já que qualquer intervenção para a minimização dos seus efeitos acarreta outras consequências no campo sonoro interior do espaço – por exemplo a introdução de material absorvente reduz o tempo de reverberação), os tipos de acções de correcção (a dimensionar por um especialista na área) mais correntes desenvolvidas passam pela colocação sobre a(s) superfície(s) potencialmente problemáticas de uma das seguintes soluções:

- Material com um elevado desempenho de absorção sonora (Figura 2.25);
- Material com um elevado desempenho de difusão sonora (Figura 2.26);

Saliente-se que este tipo de intervenção só é, em geral, necessária se o responsável pelo projecto de Acústica não foi consultado desde a fase de concepção inicial do espaço, visto que a maioria dos defeitos acústicos apresentados podem ser minimizados através de uma correcta definição da geometria do espaço.

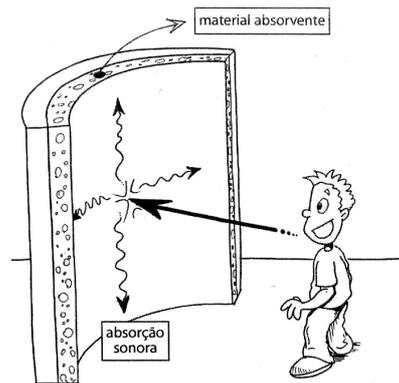


Figura 2.25 – Exemplo da resolução de um defeito acústico através de uma solução de elevada absorção sonora (Souza et. al. 2003)

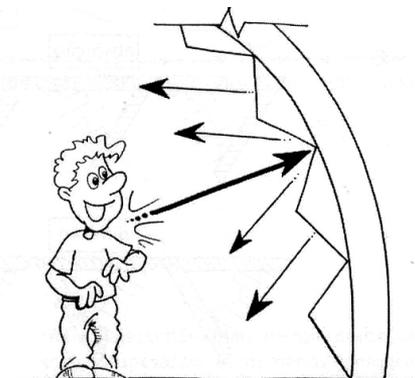
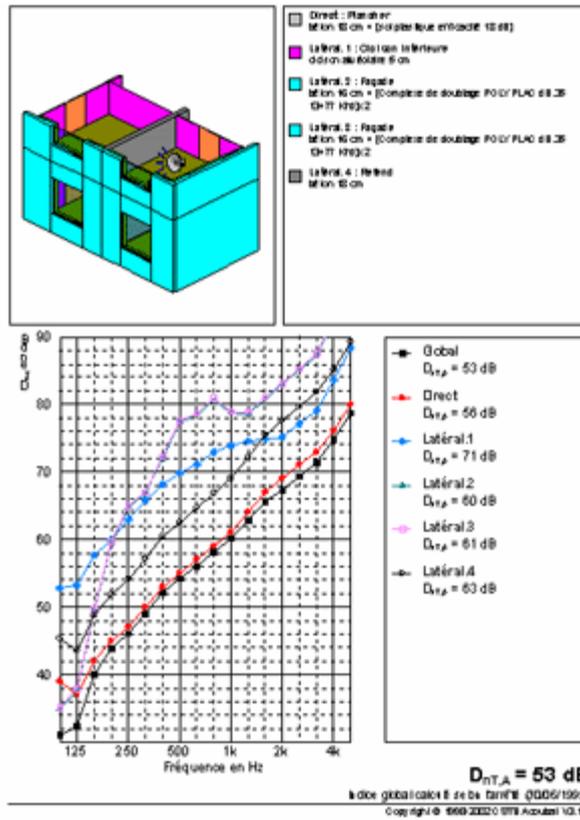


Figura 2.26 – Exemplo da resolução de um defeito acústico através de uma solução de elevada difusão sonora (Souza et. al. 2003)

CAPÍTULO 3

Isolamento Sonoro em Edifícios



3.1 Introdução

O conceito de isolamento sonoro pressupõe a existência de dois espaços: um espaço emissor (que pode ser um local fechado ou o ambiente exterior) e um espaço receptor no qual o “som” percebido seja entendido como “ruído”. Deste modo, uma primeira classificação na análise de um problema de isolamento sonoro pode basear-se na localização do espaço emissor, ou seja, a proveniência da fonte de ruído:

- Isolamento sonoro a sons¹⁴ provenientes de um espaço interior ao edifício;
- Isolamento sonoro a sons provenientes do exterior.

Por outro lado, um problema de isolamento sonoro pode ser também classificado de acordo com o modo como se processa a emissão e propagação do ruído no espaço emissor, uma vez que a transmissão do ruído se processará sempre pela vibração dos elementos construtivos do edifício (a diferença reside apenas no modo como esses elementos são excitados), sobretudo os confinantes com o espaço receptor (no caso dos dois espaços serem contíguos).

Quando a emissão e propagação do ruído se processa unicamente através da vibração do ar contido no espaço emissor por solicitação de uma dada fonte (por exemplo uma televisão em funcionamento), trata-se de um problema de isolamento sonoro a sons de condução aérea. No caso da emissão e propagação do ruído resultar apenas da vibração de elementos sólidos por acção directa da fonte sonora (por exemplo o arrastar de móveis sobre uma laje), trata-se de um problema de isolamento sonoro a sons de condução sólida (habitualmente designado por isolamento sonoro a sons de percussão) (Figura 3.1).

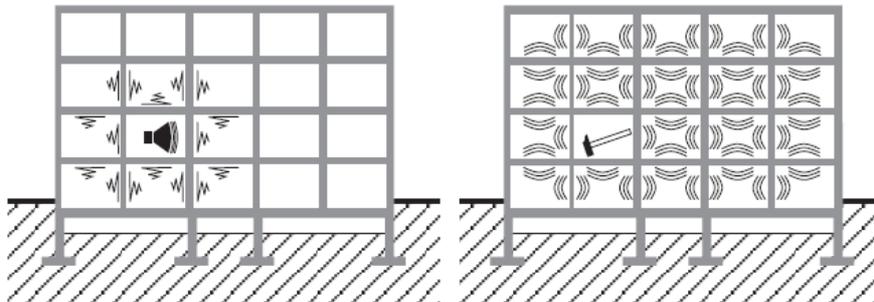


Figura 3.1 – Diferença entre sons de condução aérea e sons de condução sólida ao nível da geração e propagação do ruído (Patrício 2003)

Note-se, contudo, que a geração dos sons de percussão implica também, por vibração dos elementos construtivos, a transmissão de energia sonora por via aérea para o compartimento emissor, que por sua vez se poderá propagar por esta mesma via para o espaço receptor (embora na prática, na maioria das situações, esta componente possa ser desprezada).

¹⁴ Refere-se neste capítulo “isolamento sonoro a sons...” e não “isolamento sonoro a ruídos...”, bem como “sons de condução aérea/percussão” e não “ruídos...” em consonância com a legislação em vigor (Decreto-Lei n.º 129/2002) e toda a normalização neste domínio, apesar da segunda designação ser mais condizente com a distinção som/ruído.

A Figura 3.1 permite também ilustrar o facto de que enquanto os sons de condução aérea são sobretudo condicionantes para as condições acústicas dos espaços adjacentes ao local da emissão, os sons de percussão são passíveis de fazer sentir a sua acção em espaços mais distantes, consequência do tipo de propagação das ondas sonoras e do amortecimento interno dos meios de propagação correntes (paredes de alvenaria e lajes em betão armado) ser muito reduzido (da ordem de 0,5 a 1%).

Quer os sons de condução aérea quer os de percussão podem ser provenientes do exterior do edifício (Figura 3.2). Contudo, e exceptuando algumas situações particulares (por exemplo o metropolitano), a análise dos sons de percussão centra-se em regra naqueles que têm origem no interior dos edifícios e, em situações correntes, apenas nos associados à excitação de elementos horizontais (pavimentos), visto que se admite ser possível evitar a excitação de elementos verticais sem prejudicar ou sequer limitar a sua utilização quotidiana. Já no caso dos sons de condução aérea devem considerar-se fontes interiores e exteriores aos edifícios.



Figura 3.2 – Exemplos de sons de condução aérea e de percussão com origem no exterior dos edifícios (Souza et al. 2003)

Exceptuando em situações de ensaios laboratoriais, a transmissão sonora entre dois espaços por via aérea ou sólida efectua-se sempre através da vibração quer do elemento separador entre os espaços emissor e receptor (transmissão directa), quer dos demais elementos que delimitam os dois espaços (transmissão marginal) (Figura 3.3).

A análise (e resolução) de um problema de isolamento sonoro implica a consideração destes dois aspectos, sob pena de se revelar ineficaz (Figura 3.4), exceptuando eventuais casos em que a transmissão marginal possa ser considerada desprezável – por exemplo uma situação de isolamento sonoro a sons aéreos entre dois espaços em que os elementos construtivos de contorno possuam um desempenho (índice de redução sonora R_w – ver §3.2.1) muito superior (da ordem dos 10 dB) ao do elemento de separação.

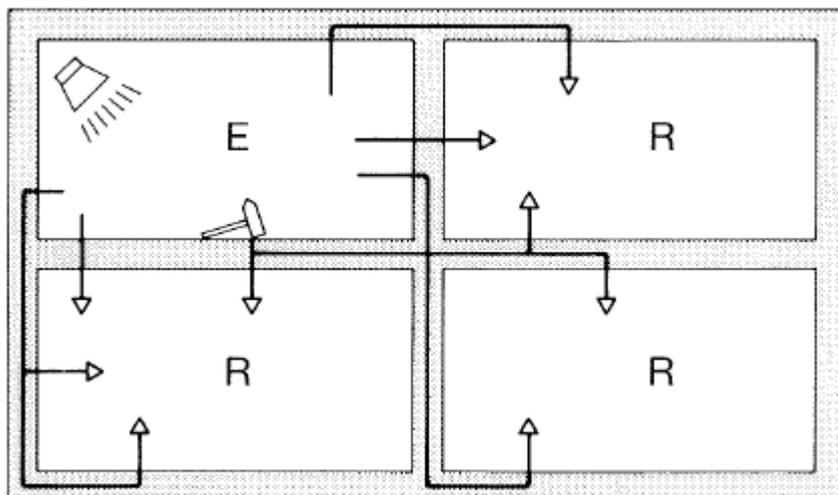


Figura 3.3 – Processos de transmissão sonora directa e marginal entre um espaço emissor (E) e espaços receptores contíguos (R) (Hawaphon)

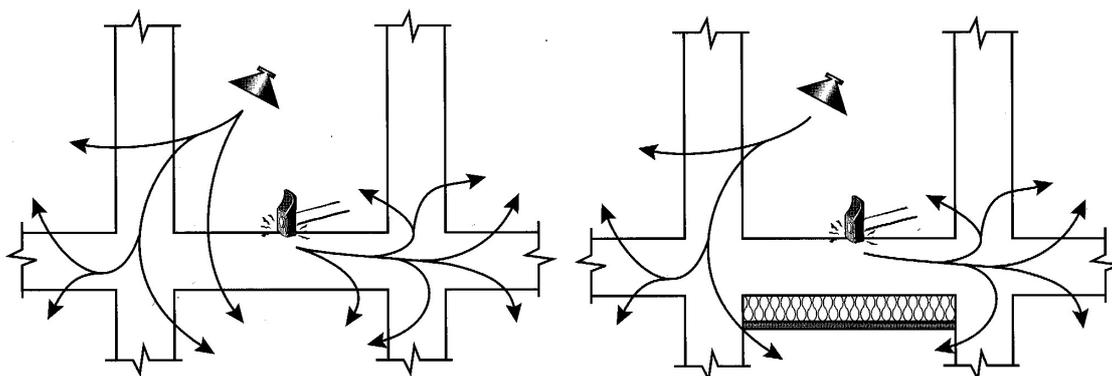


Figura 3.4 – Exemplo de uma proposta de resolução ineficaz de um problema de isolamento sonoro por omissão da contribuição da transmissão marginal (Acústica Integral)

Na prática importa ainda considerar eventuais transmissões por via aérea indirecta (também designadas por transmissões “parasitas”) em consequência por exemplo da existência de um sistema de ventilação comum entre dois espaços (Figura 3.5).

Refira-se a propósito que uma análise detalhada de um problema de isolamento sonoro poderá implicar a consideração da emissão de ruído associado ao funcionamento de equipamentos e instalações, incidindo particularmente nos seguintes pontos:

- Transmissão de ruído em condutas de AVAC;
- Isolamento de vibrações.

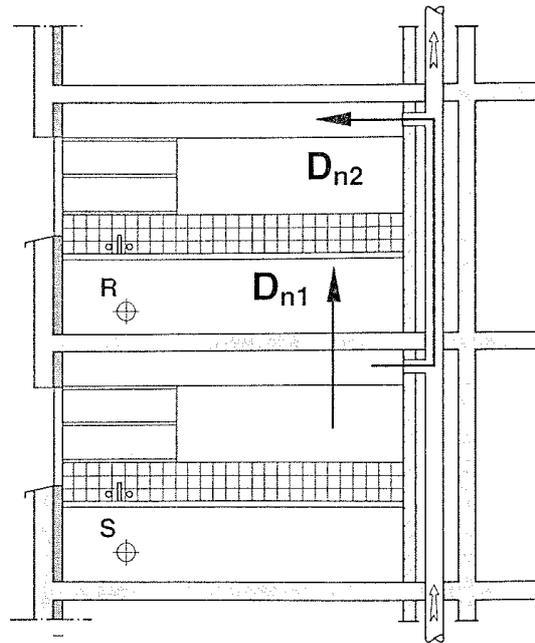


Figura 3.5 – Transmissão “parasita” através de uma conduta de ventilação (fenómeno também designado como interfonia) (Hamayon 1996)

Na ausência de ensaios de caracterização laboratorial, a previsão do isolamento sonoro a sons de condução aérea de elementos construtivos (simples, duplos ou triplos) é um processo muito complexo, cuja modelação fiável depende de inúmeros factores. Apresentam-se de seguida os principais aspectos que condicionam desempenho de um elemento construtivo corrente (por exemplo uma parede de alvenaria, uma laje em betão armado, um vidro, etc.):

- Frequência da onda sonora incidente;
- Ângulo de incidência da onda sonora;
- Massa superficial (kg/m^2) do elemento construtivo;
- Rigidez do elemento construtivo – módulo de Young (N/m^2) e coeficiente de Poisson (-);
- Amortecimento interno do elemento construtivo;
- Dimensões do elemento construtivo.

No caso da existência de uma caixa de ar (elementos duplos ou triplos) o isolamento a sons aéreos será ainda influenciado por outros factores, dos quais se destacam:

- Dimensão da caixa de ar;
- Presença ou não de material de absorção sonora na caixa de ar;
- Existência e forma de ligação entre os panos dos elementos construtivos.

Por conseguinte, sempre que existam ensaios de caracterização laboratorial disponíveis para uma dada solução construtiva, a sua utilização deverá ser preferida face aos resultados obtidos através de modelos de cálculo (recomendação também válida no caso dos sons de percussão).

Ao nível dos sons de percussão, a complexidade associada a este fenómeno de transmissão sonora é também elevada, sendo a sua modelação função de alguns factores comuns ao caso anterior (sons aéreos) como a massa superficial, rigidez, amortecimento interno e dimensões do elemento construtivo.

Porém, no caso dos sons de percussão existe um elemento cuja acção pode ser determinante para um desempenho adequado: os revestimentos de pavimento. Note-se aliás que para as lajes estruturais utilizadas na construção corrente não é em geral possível verificar os valores de referência (regulamentares ou de conforto) de isolamento sonoro a sons de percussão sem a consideração do efeito dos revestimentos de pavimento.

Na prática é possível enquadrar estes tipos de revestimento em pelo menos dois grupos:

- Revestimentos resilientes – a redução da transmissão sonora por percussão deriva do aumento do tempo de impacto da acção de percussão em relação à situação do elemento não revestido (por exemplo uma alcatifa).
- Sistemas flutuantes – a redução da transmissão sonora por percussão é modelada por um sistema reológico massa/mola, sendo o elemento “massa” materializado através de uma lajeta flutuante (por exemplo em betão armado) e o elemento “mola” consistindo nas características elásticas da camada de material resiliente colocada entre aquele e o elemento laje estrutural (Figura 3.6).

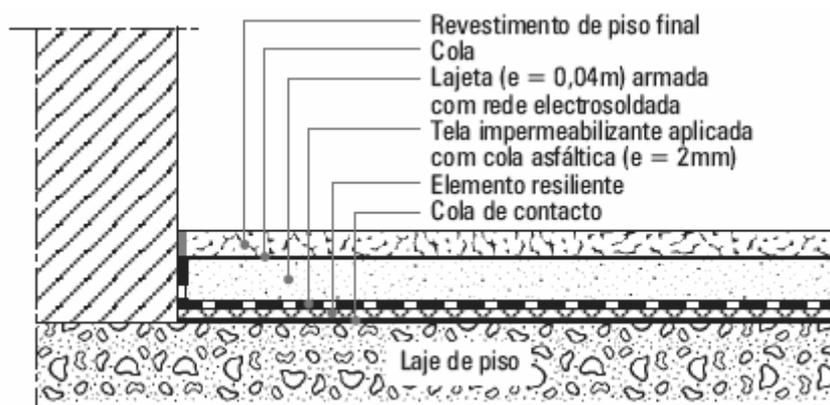


Figura 3.6 – Exemplo de um sistema de revestimento de pavimento com um efeito importante na redução da transmissão sonora por via sólida (Patrício 2003) (o revestimento superficial não deve contratar directamente com a envolvente vertical)

3.2 Sons de Condução Aérea

Apresentam-se neste ponto os principais parâmetros descritores de isolamento sonoro a sons de condução aérea, inicialmente numa situação ideal sem influência da transmissão marginal (correspondente a condições laboratoriais), e posteriormente já com a consideração da sua influência, ou seja, representando uma situação real num edifício.

3.2.1 Situação Ideal – Sem Influência da Transmissão Marginal

Quando uma onda sonora incide num elemento construtivo, uma parte da sua energia é reflectida, outra parte é absorvida, e a restante é transmitida para o espaço receptor (num caso ideal considerando apenas um espaço receptor) mediante a vibração do elemento construtivo (no caso de existir transmissão indirecta ou marginal, parte da energia será também transferida para os elementos adjacentes). O isolamento sonoro a sons de condução aérea resulta assim da capacidade de dissipação da energia sonora incidente no elemento construtivo.

Índices de transmissão sonora (τ) e de redução sonora (R)

O conceito de índice de transmissão sonora (τ) traduz o quociente entre a potência sonora transmitida por um elemento construtivo e a potência sonora nele incidente, quantificando a sua capacidade de dissipação de energia sonora (Equação (3.1)).

$$\tau = \frac{W_2}{W_1} \quad (3.1)$$

Onde:

τ – índice de transmissão sonora (-)

W_1 – potência sonora incidente no elemento construtivo (dB)

W_2 – potência sonora transmitida pelo elemento construtivo (dB)

No entanto, e visto que os valores do índice de transmissão sonora são normalmente muito reduzidos (para além do facto do ouvido humano não responder a um estímulo sonoro de uma forma linear), é habitual caracterizar-se o desempenho de isolamento sonoro a sons aéreos de um elemento construtivo através do parâmetro índice de redução sonora (R) (Equação (3.2)). Trata-se do parâmetro utilizado na avaliação laboratorial de soluções construtivas correntes, sendo de grande utilidade prática na medida em que pode ser considerado constante para um dado elemento construtivo.

$$R = 10 \log \left(\frac{1}{\tau} \right) = -10 \log (\tau) \quad (3.2)$$

Onde:

R – índice de redução sonora (dB)

τ – índice de transmissão sonora (-)

Tal como já referido, o valor do índice de redução sonora (R) de um elemento construtivo varia consoante a frequência e o ângulo de incidência das ondas sonoras. É pois necessário definir a banda de frequências (tipicamente de 1/1 oitava ou 1/3 oitava) a que o valor se refere, sendo que se nada for dito em relação ao ângulo de incidência das ondas sonoras (situação típica por exemplo de um ensaio laboratorial corrente) se assume que o valor apresentado diz respeito a uma incidência sonora difusa.

Com base na Equação (3.2) conclui-se que quanto maior for o índice de redução sonora (R) de um elemento construtivo melhor será o seu isolamento sonoro a sons de condução aérea.

Isolamento sonoro bruto (D)

De todo o modo, a noção intuitiva de isolamento sonoro não corresponde ao índice de redução sonora (R), mas sim à diferença aritmética que, para uma situação concreta, se verifica entre os níveis de pressão sonora nos espaços emissor e receptor. Ao parâmetro assim obtido denomina-se isolamento sonoro bruto (D) (Equação (3.3)).

$$D = L_1 - L_2 \quad (3.3)$$

Onde:

D – isolamento sonoro a sons de condução aérea bruto (dB)

*L*₁ – nível médio de pressão sonora no espaço emissor (dB)

*L*₂ – nível médio de pressão sonora no espaço receptor (dB)

No entanto, e como *L*₂ é em geral a incógnita do problema, para a avaliação do isolamento sonoro bruto é imperativo conhecer o isolamento conferido pelo elemento de separação, pelo que se torna necessário relacionar os parâmetros D e R.

Influência da área do elemento construtivo (S) e da absorção sonora do espaço receptor (A)

Assumindo a hipótese de campo difuso nos espaços emissor e receptor, é possível estabelecer uma relação entre os parâmetros D e R apenas em função da área de absorção sonora equivalente do espaço receptor (A) e da área do elemento construtivo de separação entre os espaços emissor e receptor (S) (Equação (3.4)). Verifica-se que o isolamento sonoro bruto aumenta proporcionalmente à absorção sonora do espaço receptor (A), diminuindo com o aumento da área de radiação sonora (S).

$$D = R + 10 \log \left(\frac{A}{S} \right) \quad (3.4)$$

Onde:

D – isolamento sonoro a sons de condução aérea bruto (dB)

R – índice de redução sonora (dB)

A – área de absorção sonora equivalente do espaço receptor (m²)

S – área do elemento construtivo de separação entre os espaços emissor e receptor (m²)

Caracterização experimental do índice de redução sonora

A avaliação laboratorial do índice de redução sonora de um elemento construtivo é realizada em câmaras reverberantes (construídas conforme os requisitos definidos na ISO 140-1), de acordo com a metodologia definida na ISO 140-3 (Figura 3.7).

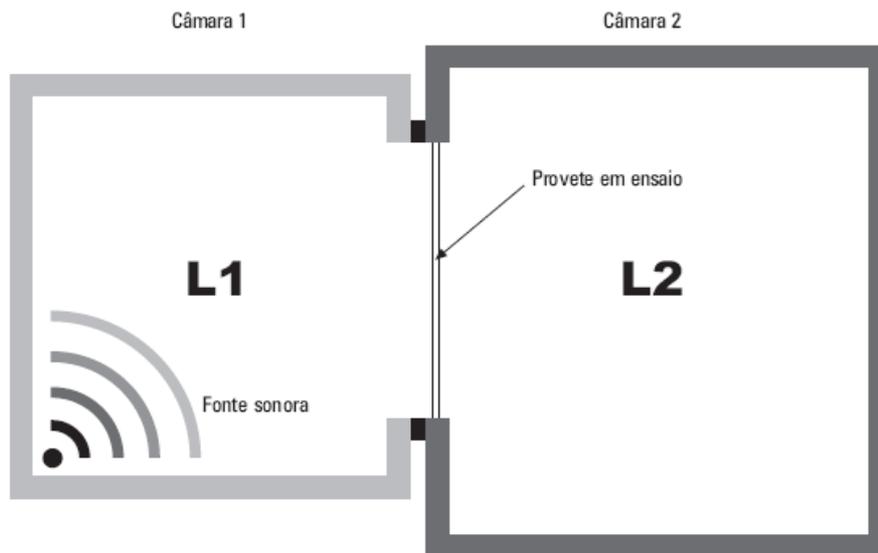


Figura 3.7 – Representação esquemática da caracterização experimental do índice de redução sonora de um elemento construtivo em câmaras reverberantes (Patrício 2003)

De uma forma resumida, o procedimento de ensaio consiste na criação de um campo sonoro (que se pode assumir como difuso) no interior do espaço emissor (câmara reverberante) através de uma fonte sonora com características normalizadas, e a medição dos níveis médios de pressão sonora nos espaços emissor e receptor. Conhecida a área do provete do elemento construtivo em análise, e a área de absorção sonora equivalente do espaço receptor (câmara reverberante), é então possível determinar o valor de R.

A avaliação laboratorial do índice de redução sonora efectua-se por bandas de frequências de 1/3 oitava (no mínimo entre as bandas centradas nos 100 Hz e nos 3150 Hz, sendo também comum a utilização de bandas de frequências entre os 50 e os 5000 Hz), com os resultados expressos sob a forma de um boletim de ensaio (Figura 3.8).

Em anexo apresentam-se alguns valores característicos do isolamento sonoro a sons aéreos de algumas soluções construtivas (EN 12354-1), recomendando-se sempre, no âmbito de uma aplicação prática, a consulta dos boletins laboratoriais de ensaio das soluções a utilizar.

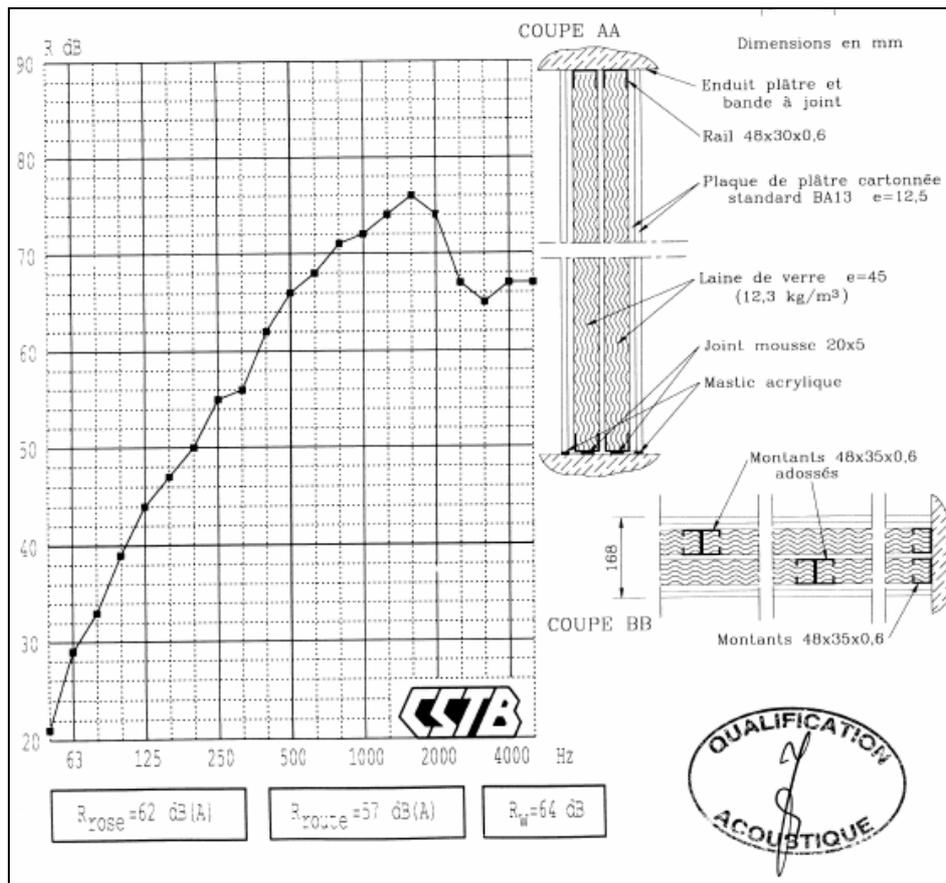


Figura 3.8 – Excerto de um boletim de ensaio laboratorial relativo à avaliação do Índice de redução sonora de uma divisória em gesso cartonado (BPB Iberplaco)

Caracterização experimental do índice de redução sonora de outros elementos construtivos

Existem todavia componentes utilizados na construção para os quais a avaliação do isolamento sonoro a sons aéreos não se adequa ao procedimento proposto na ISO 140-3, como é por exemplo o caso de tectos falsos (ISO 140-9) e de elementos de pequena dimensão como grelhas de ventilação e caixas de estore (ISO 140-10), para os quais foram adoptados novos índices de caracterização em laboratório:

- Isolamento sonoro (a sons de condução aérea) normalizado de tectos falsos, $D_{n,c}$;
- Isolamento sonoro (a sons de condução aérea) normalizado de um componente construtivo de pequena dimensão, $D_{n,e}$.

Na Figura 3.9 apresenta-se um excerto de um boletim de ensaio laboratorial relativo a uma solução de uma grelha de admissão de ar a integrar numa fachada.

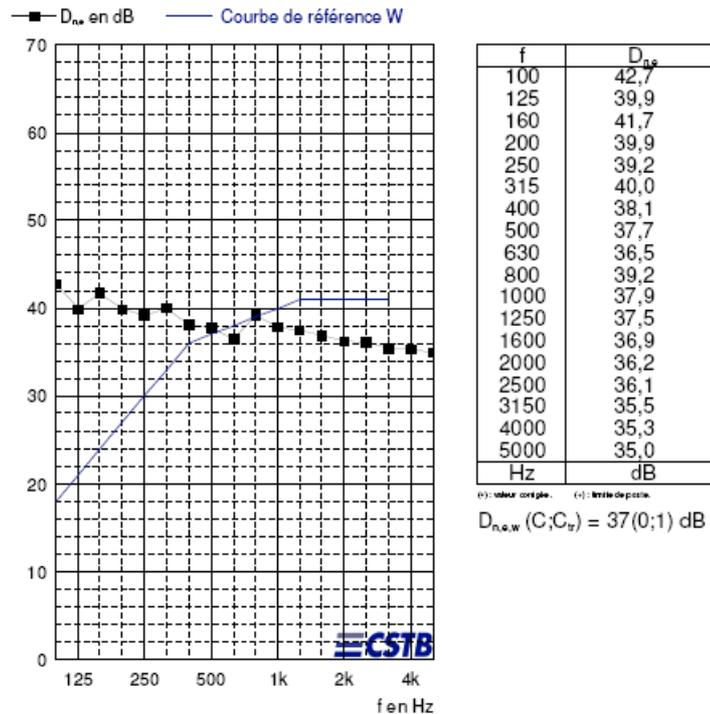


Figura 3.9 – Excerto de um boletim de ensaio laboratorial do isolamento sonoro a sons de condução aérea de uma grelha de ventilação (elemento de pequena dimensão) (Anjos)

Homogeneização de componentes construtivos distintos

É comum um elemento construtivo ser constituído por vários componentes (por exemplo uma parede exterior com zona opaca, vãos envidraçados, caixas de estore e grelhas de ventilação natural) com características distintas de isolamento sonoro, para o qual importa conhecer o índice de isolamento sonoro global, homogeneizando o desempenho dos vários componentes.

Atentando ao conceito de índice de redução sonora (R), e admitindo um elemento constituído por um componente 1 (por exemplo alvenaria), com uma área S_1 e uma redução sonora R_1 , e por um componente 2 (por exemplo vidro), com uma área S_2 e uma redução sonora R_2 , o desempenho homogeneizado R não poderá ser obtido através de uma média ponderada da área de cada um dos componentes.

Esse mesmo procedimento será porém correcto se se recorrer ao conceito de índice de transmissão sonora (τ), que não depende de nenhum factor logarítmico. Através deste conceito é possível relacionar as potências sonoras incidente e transmitida pelo elemento construtivo com base na referida média ponderada (Equação (3.5)).

$$W_2 = \frac{\sum_i \tau_i S_i}{\sum_i S_i} W_1 \quad (3.5)$$

Onde:

W_1 – potência sonora incidente no elemento construtivo (dB)

W_2 – potência sonora transmitida pelo elemento construtivo (dB)

τ_i – índice de transmissão sonora do componente i (-)

S_i – área do componente i (m²)

É então possível calcular o índice de redução sonora (R) do elemento construtivo:

$$R = 10 \log \left(\frac{1}{\tau} \right) = 10 \log \left(\frac{\sum_i S_i}{\sum_i \tau_i S_i} \right) \quad (3.6)$$

Onde:

R – índice de redução sonora homogeneizado (dB)

τ – índice de transmissão sonora homogeneizado (-)

τ_i – índice de transmissão sonora do componente i (-)

S_i – área do componente i (m²)

A equação anterior pode ser igualmente expressa em função dos índices de redução sonora de cada componente do elemento construtivo (R_i):

$$R = 10 \log \left(\frac{\sum_i S_i}{\sum_i \frac{S_i}{10^{R_i/10}}} \right) \quad (3.7)$$

Onde:

R – índice de redução sonora homogeneizado (dB)

R_i – índice de redução sonora do componente i (-)

S_i – área do componente i (m²)

Sempre que o elemento construtivo em estudo incluir componentes cuja avaliação laboratorial do isolamento a sons aéreos não é efectuada segundo a ISO 140-3 (na qual é utilizada como parâmetro de desempenho o índice de redução sonora), o processo de homogeneização será distinto. A Equação (3.8) permite determinar o valor homogeneizado no caso mais corrente de um componente construtivo de pequena dimensão estar integrado no elemento em análise.

$$R = 10 \log \left(\frac{1}{\tau} \right) = 10 \log \left(\frac{1}{\frac{1}{S} \sum_i S_i 10^{-R_i/10} + \frac{A_0}{S} \sum_j 10^{-D_{n,e,j}/10}} \right) \quad (3.8)$$

Onde:

R – índice de redução sonora homogeneizado (dB)

τ – índice de transmissão sonora homogeneizado (-)

S – área do elemento construtivo (m^2)

S_i – área do componente i (m^2)

R_i – índice de redução sonora do componente i (-)

A_0 – área de absorção sonora equivalente de referência (m^2), tomando um valor igual a $10 m^2$ no caso de edifícios residenciais e situação análogas

$D_{n,e,j}$ – isolamento sonoro normalizado do componente de pequena dimensão j (dB)

Conceito de valor ponderado (índice único)

O isolamento sonoro a sons de condução aérea conferido por um dado elemento construtivo depende da frequência da onda sonora incidente, pelo que os resultados de uma avaliação laboratorial são obtidos em bandas de frequências de 1/3 oitava (para uma utilização corrente admite-se também uma caracterização em bandas de 1/1 oitava – mas não em ensaios laboratoriais – por exemplo no caso de se utilizarem modelos de previsão).

No entanto desta imposição resulta que qualquer elemento construtivo seria caracterizado por um conjunto de valores de índice de redução sonora (R) distintos em função da banda de frequências em questão, o que embora rigoroso (e nalguns casos necessário), se revela pouco prático para o utilizador corrente.

Por conseguinte foi criado um índice único que pondera o desempenho de isolamento sonoro para as diversas bandas de frequências (1/1 oitava ou 1/3 oitava), de acordo com uma situação padrão (que se designa por “curva” de referência) definida na ISO 717-1 (Figura 3.10 e Figura 3.11, Tabela 3.1).

Na Figura 3.10 e na Figura 3.11 (e também na Tabela 3.1) os diversos valores de referência correspondem a um exemplo de uma curva de referência iniciada nas bandas de 1/1 oitava ou de 1/3 oitava centradas respectivamente nas frequências de 125 Hz e de 100 Hz, sendo que o seu valor inicial pode ser qualquer inteiro (e não só 36 ou 33). Apenas se mantém sempre constante a variação relativa dos valores da curva de referência entre bandas de frequências, correspondente ao declive dos vários troços que a compõem.

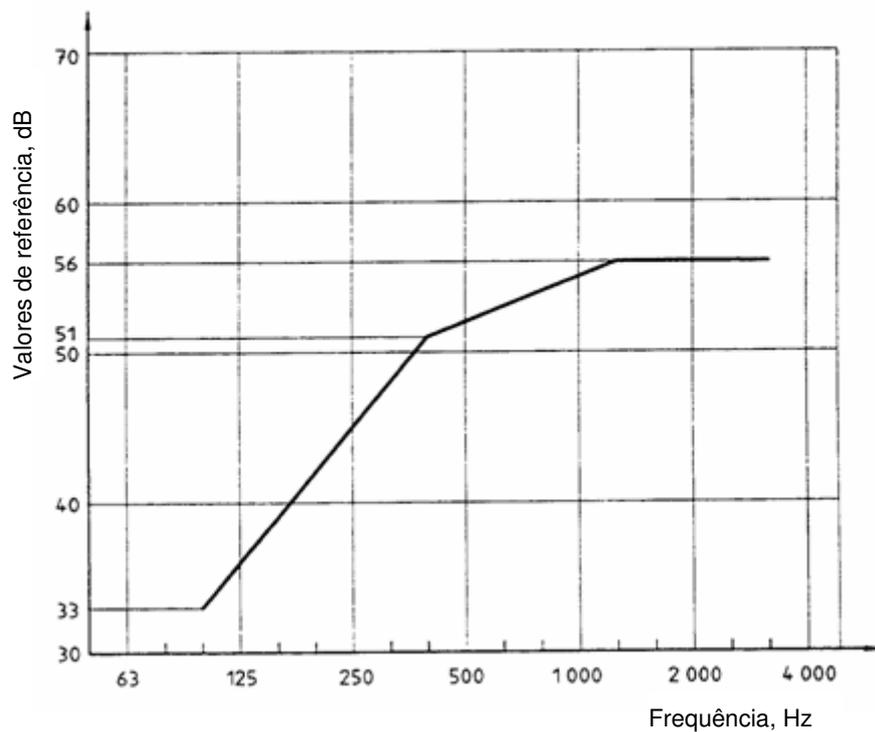


Figura 3.10 – Curva de referência definida na ISO 717-1 para a avaliação do isolamento sonoro a sons de condução aérea por bandas de 1/3 oitava (16 bandas entre 100 e 3150 Hz)

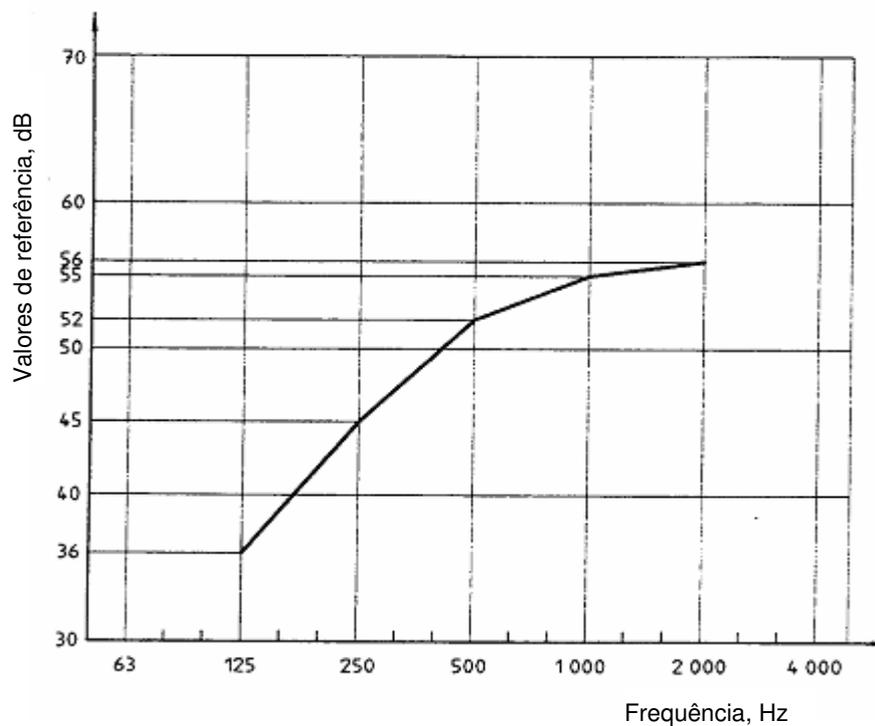


Figura 3.11 – Curva de referência definida na ISO 717-1 para a avaliação do isolamento sonoro a sons de condução aérea por bandas de 1/1 oitava (5 bandas entre 125 e 2000 Hz)

Tabela 3.1 – Descrição paramétrica das curvas de referência (ISO 717-1) para a avaliação do isolamento sonoro a sons de condução aérea por bandas de 1/3 oitava e de 1/1 oitava

Frequência	Valores de referência	
	Bandas 1/3 oitava	Bandas 1/1 oitava
100	33	
125	36	36
160	39	
200	42	
250	45	45
315	48	
400	51	
500	52	52
630	53	
800	54	
1000	55	55
1250	56	
1600	56	
2000	56	56
2500	56	
3150	56	

A comparação entre os valores de isolamento sonoro referentes ao elemento construtivo em análise (curva real) e os valores de referência definidos na ISO 717-1 (curva de referência) efectua-se por um processo de ajuste entre ambas, utilizando como critério a limitação do somatório das diferenças aritméticas dos valores relevantes. Visto que o objectivo deste processo é passar a representar a curva real através da curva de referência, só quando o valor medido do isolamento sonoro é inferior ao valor de referência é que a diferença é relevante – conceito de desvio desfavorável para sons aéreos (Figura 3.12).

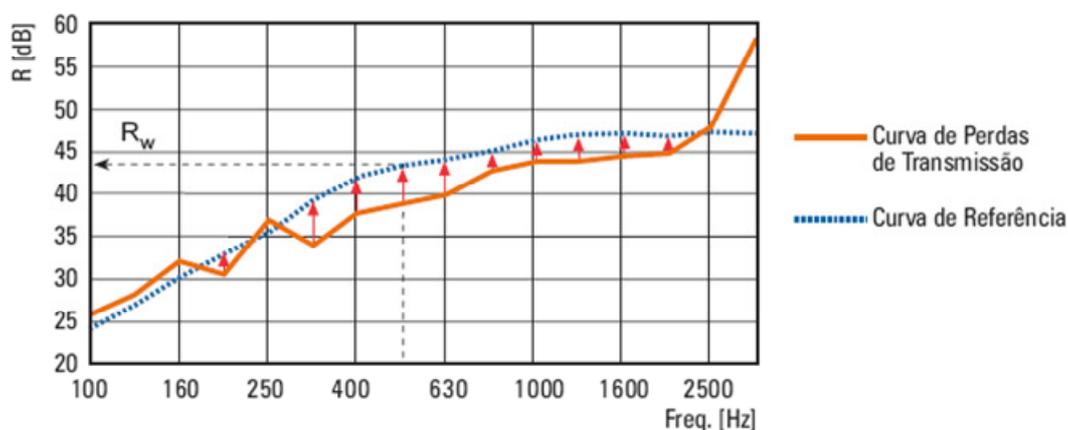


Figura 3.12 – Desvios desfavoráveis num processo de ajuste entre valores de isolamento sonoro medidos (índice de redução sonora) e valores de referência (Patrício 2003)

Na prática começa-se por se arbitrar um valor (inteiro) para uma dada banda de frequências da curva de referência, a partir do qual é possível construir toda a curva e calcular os desvios desfavoráveis face à curva real. Considera-se que o ajuste está terminado (trata-se de um processo iterativo) quando o somatório dos desvios desfavoráveis a dividir pelo número total de bandas de frequências envolvidas (5 no caso de 1/1 oitava, 16 no caso de 1/3 oitava) seja o valor mais próximo possível de 2, sem o ultrapassar (mas podendo igualá-lo), ou seja, o somatório dos desvios desfavoráveis deve ser inferior a 10 ou a 32 para bandas de 1/1 oitava ou de 1/3 de oitava, respectivamente.

O índice único proveniente deste processo de ajuste corresponde ao valor da banda centrada nos 500 Hz, passando a adoptar para além do nome do descritor de isolamento sonoro em causa (por exemplo D, R, ...), a designação w (“weighted” – ponderado) – D_w , R_w , ... – tal como se pode observar na Figura 3.12 (no caso R_w).

3.2.2 Situação Real – Com Influência da Transmissão Marginal

No caso da existência de transmissão marginal, não faz sentido falar no isolamento sonoro a sons de condução aérea de um elemento construtivo, uma vez que o que passa a estar em causa é o isolamento sonoro entre dois espaços. Este é em geral o caso de um edifício real para o qual o desempenho de isolamento não depende apenas do elemento de separação mas também (em alguns casos até em maior medida) dos elementos construtivos de contorno.

No caso do projecto de acústica de edifícios ou de uma avaliação prática do isolamento sonoro é então necessário considerar o efeito da transmissão marginal. Quando esta é considerada, os parâmetros descritores de isolamento sonoro a sons de condução aérea (com a excepção do índice D, que se aplica em regra a situações com transmissão marginal¹⁵) passam a utilizar na sua designação uma “plica” (’), de modo a indicar a existência de transmissão marginal (por exemplo τ' , R' ; no caso do parâmetro D não existe a designação D').

A medição do isolamento sonoro a sons de condução aérea entre dois espaços interiores de um edifício processa-se de forma similar à avaliação laboratorial, ainda que com um conjunto de directrizes técnicas específicas definidas na norma ISO 140-4.

Índices de transmissão sonora (τ') e de redução sonora (R') aparentes

No caso da existência de transmissão marginal no processo de transmissão sonora entre dois espaços, embora a potência sonora incidente no elemento construtivo seja sob um ponto de vista conceptual a mesma (W_1), a potência sonora transmitida para o espaço receptor não é igual a W_2 , mas sim ao somatório das potências sonoras radiadas pelos diversos elementos construtivos que separam os dois espaços (W_{tot}). Assim, os índices de transmissão sonora e de redução sonora passam a ter a designação de índices aparentes.

⁵ Apesar de em teoria ser correcto recorrer-se ao conceito de isolamento sonoro bruto D para uma situação sem transmissão marginal (laboratório), só no caso de medições “in situ” é que o conceito possui efectivamente sentido (estando neste caso implícita a existência de transmissão marginal).

$$\tau' = \frac{W_{tot}}{W_1} \quad (3.9)$$

Onde:

τ' – índice de transmissão sonora aparente (-)

W_1 – potência sonora incidente no elemento construtivo (dB)

W_{tot} – potência sonora transmitida pelos diversos elementos construtivos (dB)

$$R' = 10 \log\left(\frac{1}{\tau'}\right) = -10 \log(\tau') \quad (3.10)$$

Onde:

R' – índice de redução sonora aparente (dB)

τ' – índice de transmissão sonora aparente (-)

Isolamento sonoro a sons de condução área normalizado ou padronizado

Embora o valor do isolamento sonoro a sons de condução aérea bruto (D) seja dependente da área de absorção sonora equivalente do espaço receptor (A), interessa (por vezes) definir um espaço receptor com características de absorção sonora constantes de forma a ser possível comparar valores de isolamento sonoro garantidos por configurações construtivas distintas sem ter que analisar sempre as suas características de absorção. Foi assim definido um termo de correcção que permite “normalizar” o isolamento sonoro bruto entre dois espaços para um dado valor de área de absorção sonora equivalente (Equação (3.11)).

$$D_n = D + 10 \log\left(\frac{A_0}{A}\right) \quad (3.11)$$

Onde:

D_n – isolamento sonoro a sons de condução aérea normalizado (dB)

D – isolamento sonoro a sons de condução aérea bruto (dB)

A_0 – área de absorção sonora equivalente de referência (m^2), tomando um valor igual a $10 m^2$ no caso de edifícios residenciais e situações análogas

A – área de absorção sonora equivalente real do espaço receptor (m^2), obtida através da medição do tempo de reverberação

Refira-se a propósito que a utilização de um índice normalizado possui também a vantagem de permitir efectuar ensaios em locais não mobilados, bem como prevenir a hipótese de criação de condições de absorção sonora superiores às reais durante um ensaio de avaliação com o intuito de aumentar artificialmente o isolamento sonoro (bruto) medido.

Por vezes é também utilizado, como alternativa ao parâmetro isolamento sonoro normalizado D_n , o parâmetro isolamento sonoro padronizado D_{nT} (Equação (3.12)), que possui desde logo uma vantagem para ensaios “in situ” – ao contrário do parâmetro D_n , não é necessário medir o volume do espaço receptor e aplicar posteriormente a equação de Sabine para estimar o valor de área de absorção sonora equivalente (A).

$$D_{nT} = D + 10 \log \left(\frac{T}{T_0} \right) \quad (3.12)$$

Onde:

D_{nT} – isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado (dB)

T – tempo de reverberação no espaço receptor, medido (s)

T_0 – tempo de reverberação de referência (s), tomando um valor igual a 0,5 s no caso de edifícios residenciais e situações análogas

Índices de isolamento sonoro a sons de condução aérea

Quando se considera a existência de transmissão marginal contínua a ser válido o conceito de descritor único. Aplicando este conceito aos parâmetros de isolamento sonoro normalizado ou padronizado, obtêm-se os dois índices de isolamento sonoro a sons de condução aérea mais utilizados na legislação europeia:

- $D_{n,w}$ – índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea normalizado;
- $D_{nT,w}$ – índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado.

O índice $D_{n,w}$ foi adoptado pela regulamentação Portuguesa (Decreto-Lei n.º 129/2002) para a quantificação do isolamento sonoro a sons aéreos entre dois espaços interiores de um edifício.

Saliente-se de igual modo a utilização em alguns países do índice de redução sonora aparente ponderado (R'_w) para o mesmo efeito.

É também comum serem ainda adicionados a estes índices dois termos de correcção (C e C_{tr}) que permitem corrigir o valor do índice ponderado para o caso de uma fonte sonora com um conteúdo espectral típico de um ruído rosa ou de tráfego, respectivamente (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 – Termo de adaptação (C ou C_{tr}) em função do tipo de fonte sonora (ISO 717-1)

Ruído Rosa – Adaptação C	Ruído de Tráfego – Adaptação C_{tr}
- Actividades humanas (palavra, música, rádio, TV)	- Tráfego rodoviário urbano
- Brincadeiras de crianças	- Tráfego ferroviário a velocidade reduzida
- Tráfego ferroviário a velocidade média ou elevada	- Avião a hélice
- Tráfego rodoviário (< 80 km/h)	- Avião a reacção a grande distância
- Aviação a reacção a curta distância	- Música de discoteca
- Oficinas (ruído médias e altas frequências)	- Oficina (ruído baixas e médias frequências)

Sempre que se utilizam estes termos de correcção os valores de isolamento sonoro resultantes correspondem a um valor global incluindo todas as bandas de frequências (e não a um valor ponderado), sendo os resultados expressos em dB(A). É também comum a sua utilização no caso da caracterização laboratorial de um elemento construtivo – por exemplo admitindo que uma parede apresenta um índice de redução sonora ponderado R_w (C ; C_{tr}) = 64 (-2 ; -7) dB significa então que R_w (+ C) = 62 dB(A) e que R_w (+ C_{tr}) = 57 dB(A) (Figura 3.8).

Quantificação da transmissão marginal

Para a quantificação da componente marginal no processo de transmissão sonora aérea entre dois espaços interiores de um edifício deve recorrer-se à metodologia de cálculo definida na normalização europeia aplicável (EN 12354-1). No entanto, e face à sua complexidade, é possível recorrer-se a um procedimento simplificado de análise (embora menos fiável) que visa alertar para a problemática associada à sua ocorrência.

Se se designar a influência da transmissão marginal pela sigla ΔTM , então a sua influência no valor do índice de redução sonora ponderado (R_w) será:

$$R'_w = R_w - \Delta TM \quad (3.13)$$

Onde:

R'_w – índice de redução sonora ponderado aparente (dB)

R_w – índice de redução sonora ponderado (dB)

ΔTM – factor de correcção relativo à influência da transmissão marginal (dB)

Ainda que de forma simplificada, podem-se definir alguns valores para os factores de correcção relativos à influência da transmissão marginal (Patrício 2003), admitindo que as soluções construtivas do elemento de separação entre os espaços e dos elementos adjacentes são da mesma natureza (Figura 3.13), sendo, portanto, possível assumir que o isolamento sonoro será tanto maior quanto mais elevada for a massa por unidade de superfície (kg/m^2) dos elementos:

- Se a massa superficial do elemento de separação é semelhante às dos elementos adjacentes, a transmissão que ocorre por via marginal (W_i) é equivalente à directa (W_d), podendo-se assumir um valor de $\Delta TM = 3$;
- Se a massa superficial do elemento de separação é muito inferior às dos elementos adjacentes, a propagação da energia sonora ocorre fundamentalmente pelo elemento de separação (W_d), podendo-se assumir um valor de $\Delta TM = 0$;
- Por último, quando a massa superficial do elemento de separação é muito superior às dos elementos adjacentes então a propagação da energia sonora dar-se-á sobretudo por via marginal (W_i); neste caso, o valor de ΔTM pode variar de 3 dB a um máximo da ordem de 10 dB para casos particulares, sendo prudente a consideração de 5 dB para as situações e soluções construtivas típicas em edifícios correntes.

Trata-se de um procedimento muito simplificado de análise, devendo apenas servir para a quantificação da ordem de grandeza do isolamento sonoro entre dois espaços, mas podendo não ser suficiente para a elaboração de um projecto de condicionamento acústico por exemplo de um edifício habitacional (a não ser que seja adoptado um valor muito conservativo para a influência da transmissão marginal, naturalmente em prejuízo da relação custo/benefício das soluções construtivas a implementar).

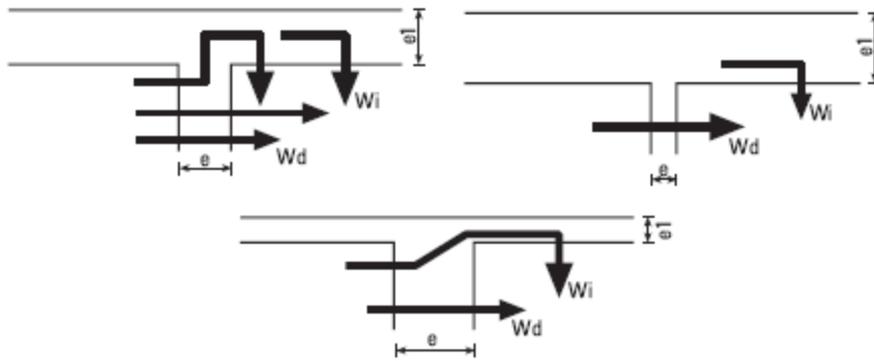


Figura 3.13 – Avaliação simplificada da influência da transmissão marginal no caso dos vários elementos que definem a envolvente serem da mesma natureza (Patrício 2003)

Relação entre redução sonora aparente e isolamento sonoro normalizado ou padronizado

Para a previsão do desempenho de isolamento sonoro a sons de condução aérea em edifícios é fundamental relacionar o parâmetro que é obtido em situação de projecto (R' ou R'_w) com o índice utilizado como exigência regulamentar (no caso Português, o índice $D_{n,w}$).

Atendendo a que as Equação (3.4) pode ser considerada válida numa situação “in situ”, através da sua conjugação com as Equações (3.11) e (3.12), é possível deduzir as Equações (3.14) e (3.15) (de grande utilidade para a actividade de projecto).

$$D_n = R' + 10 \log \left(\frac{A_0}{S} \right) \quad (3.14)$$

Onde:

D_n – isolamento sonoro a sons de condução aérea normalizado (dB)

R' – índice de redução sonora aparente (dB)

A_0 – área de absorção sonora equivalente de referência (m^2), tomando um valor igual a $10 m^2$ no caso de edifícios residenciais e situações análogas

S – área do elemento construtivo (m^2)

$$D_{nT} = R' + 10 \log \left(\frac{0,16 V}{T_0 S} \right) \quad (3.15)$$

Onde:

D_{nT} – isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado (dB)

R' – índice de redução sonora aparente (dB)

V – volume do compartimento receptor (m^3)

T_0 – tempo de reverberação de referência (s), tomando um valor igual a 0,5 s no caso de edifícios residenciais e situações análogas

S – área do elemento construtivo (m^2)

Ambas as equações ((3.14) e (3.15)) podem, ainda que de forma aproximada, ser também formuladas a partir dos índices de isolamento sonoro ponderados R'_w , $D_{n,w}$ e $D_{nT,w}$.

3.2.3 Situação Real – Entre o Exterior e um Espaço Interior

Um caso particular de isolamento sonoro a sons aéreos entre dois espaços ocorre quando o espaço de emissão corresponde ao ambiente exterior, embora ao nível da quantificação do isolamento sonoro conferido pela envolvente exterior o procedimento seja similar.

A principal diferença é que neste caso o nível de pressão sonora característico do espaço emissor (designado nos pontos anteriores por L_1) corresponde ao nível médio de pressão sonora exterior, medido a 2 m da fachada ($L_{1,2m}$) (Figura 3.14), pelo que o isolamento sonoro bruto entre o exterior e o interior se passa a designar D_{2m} (Equação (3.16)).

$$D_{2m} = L_{1,2m} - L_2 \quad (3.16)$$

Onde:

D_{2m} – isolamento sonoro bruto a sons de condução aérea entre o exterior e o interior (dB)

$L_{1,2m}$ – nível médio de pressão sonora exterior medido a 2 m da fachada do edifício (dB)

L_2 – nível médio de pressão sonora no espaço receptor (dB)

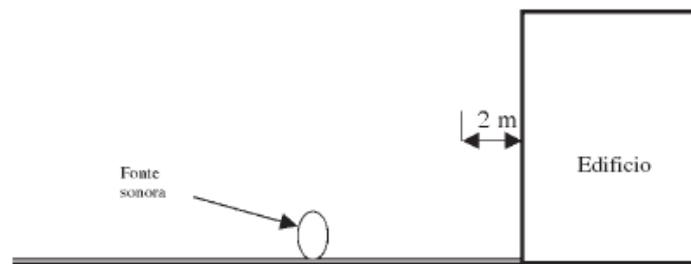


Figura 3.14 – Representação esquemática do processo de avaliação do isolamento sonoro a sons de condução aérea provenientes do exterior (Patrício 2004)

Tal como no caso geral atrás apresentado, poderão obter-se neste caso valores de isolamento sonoro normalizados/padronizados, mantendo-se válidas as Equações (3.11) e (3.12). Se estes valores forem combinados com o conceito de descritor único, é possível definir os dois índices de isolamento sonoro a sons de condução aérea mais utilizados na legislação europeia para quantificar o isolamento entre o exterior e um espaço interior de um edifício:

- $D_{2m,n,w}$ – índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre o exterior e o interior, normalizado;
- $D_{2m,nT,w}$ – índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre o exterior e o interior, padronizado.

O índice $D_{2m,n,w}$ foi adoptado pela regulamentação Portuguesa (Decreto-Lei n.º 129/2002) para a quantificação do isolamento sonoro a sons de condução aérea entre o exterior e um espaço no interior de um edifício.

Quantificação da transmissão marginal

Para a quantificação da componente marginal (já incluída no parâmetro D_{2m}) no processo de transmissão sonora aérea entre o exterior e um espaço interior deve recorrer-se à metodologia de cálculo definida na normalização europeia aplicável (EN 12354-3).

No entanto, e dado que normalmente o efeito da transmissão marginal no caso do isolamento a sons aéreos provenientes do exterior é, para sistemas construtivos correntes, inferior ao que se verifica entre dois espaços interiores, a EN 12354-3 aconselha a que se considere um valor $\Delta TM = 2$ dB para a quantificação do índice R'_w a partir do índice R_w .

Relação entre redução sonora aparente e isolamento sonoro normalizado ou padronizado

Neste caso continuam a ser válidas as equações (3.14) e (3.15), embora tenham que ser afectadas de um factor de correcção devido à forma da fachada – ΔL_{fs} . Os valores deste factor para diversas situações de referência são definidos na EN 12354-3 (Figura 3.15), em função da absorção média da superfície de reflexão exterior, e da altura da linha visível entre a fonte de ruído e o espaço interior em estudo (Equação (3.17) e Equação (3.18)).

$$D_{2m,n} = R' + 10 \log \left(\frac{A_0}{S} \right) + \Delta L_{fs} \quad (3.17)$$

Onde:

$D_{2m,n}$ – isolamento sonoro a sons de condução aérea entre o exterior e o interior normalizado (dB)

R' – índice de redução sonora aparente (dB)

A_0 – área de absorção sonora equivalente de referência (m^2), tomando um valor igual a $10 m^2$ no caso de edifícios residenciais e situação análogas

S – área do elemento construtivo (m^2)

ΔL_{fs} – factor de correcção devido à forma da fachada (dB)

$$D_{2m,nT} = R' + 10 \log \left(\frac{0,16 V}{T_0 S} \right) + \Delta L_{fs} \quad (3.18)$$

Onde:

$D_{2m,nT}$ – isolamento sonoro a sons de condução aérea entre o exterior e o interior padronizado (dB)

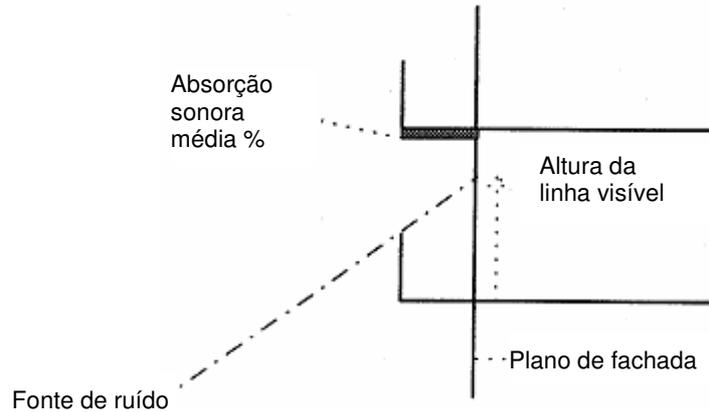
R' – índice de redução sonora aparente (dB)

V – volume do compartimento receptor (m^3)

T_0 – tempo de reverberação de referência (s), tomando um valor igual a $0,5$ s no caso de edifícios residenciais e situações análogas

S – área do elemento construtivo (m^2)

ΔL_{fs} – factor de correcção devido à forma da fachada (dB)



ΔL_{fs} (dB)	L			+			+			+			+		
	L			+			+			+			+		
Absorção α_w	Não se aplica			$\leq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$	$\leq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$	$\leq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$	$\leq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$
Altura <1,5 m	0	-1	-1	0	-1	-1	0	0	0	1	Não se aplica				
Altura (1,5-2,5) m	0	Não se aplica			-1	0	2	0	1	2					
Altura >2,5 m	0	Não se aplica			1	1	2	2	2	3	3	4	6		

Figura 3.15 – Exemplos de valores definidos na EN 12354-3 para o factor de correcção ΔL_{fs}

3.2.4 Critérios de Desempenho Acústico

Tal como havia sido já enfatizado no capítulo anterior, os critérios de desempenho acústico a especificar numa dada situação (por exemplo num edifício de habitação) devem abranger quer as exigências regulamentares aplicáveis, quer critérios complementares que assegurem as condições de conforto acústico compatíveis com a situação em causa.

A regulamentação Portuguesa relativa às exigências acústicas (mínimas) em edifícios (Decreto-Lei n.º 129/2002) define um conjunto de valores de isolamento sonoro a sons de condução aérea, em função do tipo de edifício e da natureza dos espaços emissor/receptor.

Apresentam-se de seguida, como referência, os valores referentes a edifícios habitacionais e mistos¹⁶ (Tabela 3.3 e Tabela 3.4).

Tabela 3.3 – Requisitos regulamentares de isolamento sonoro a sons aéreos entre espaços interiores de edifícios habitacionais e mistos (Decreto-Lei n.º 129/2002)

Índice de Isolamento Sonoro a Sons de Condução Aérea, $D_{n,w}$	
<i>Entre o espaço abaixo indicado (emissão) e quartos ou zonas de estar dos fogos (recepção)</i>	
Compartimentos de um fogo	≥ 50 dB
Locais de circulação comum do edifício	≥ 48 dB
Garagem de estacionamento automóvel	≥ 50 dB
Caminho de circulação vertical (edifício com elevadores)	≥ 40 dB
Locais de comércio, indústria, serviços ou diversão	≥ 58 dB

Tabela 3.4 – Requisitos regulamentares de isolamento sonoro a sons aéreos entre o exterior e quartos ou zonas de estar de edifícios habitacionais e mistos (Decreto-Lei n.º 129/2002)

Índice de Isolamento Sonoro a Sons de Condução Aérea, $D_{2m,n,w}$	
<i>Entre o exterior (emissão) e quartos ou zonas de estar dos fogos (recepção)</i>	
Zonas Sensíveis ¹⁷	≥ 28 dB
Zonas Mistas ¹⁷	≥ 33 dB

A definição de critérios complementares de isolamento sonoro a sons de condução a depende da relação entre a produção de ruído no espaço emissor e do nível ruído de fundo expectável no espaço receptor, não sendo portanto fácil definir valores de referência, recomendando-se a análise de cada caso em particular.

Note-se que estes critérios podem ser apenas baseados em valores mais exigentes do que os constantes na regulamentação (que como referido exige apenas valores mínimos de conforto), e/ou propondo requisitos nela não contemplados.

Apenas a título de exemplo, indica-se de seguida um critério de conforto que poderá ser desejável garantir em edifícios de habitação: $D_{n,w} \geq 40$ dB entre quartos do mesmo fogo (situação que não está contemplada no Decreto-Lei n.º 129/2002).

¹⁶ Edifícios que para além do uso habitacional integram também comércio, indústria, serviços ou diversão.

¹⁷ De acordo com a classificação do Decreto-Lei n.º 9/2007.

3.3 Sons de Condução Sólida (ou de Percussão)

Os principais descritores de isolamento sonoro a sons de percussão são também baseados nas seguintes situações-tipo:

- Situação ideal – sem influência da transmissão marginal (avaliação em laboratório);
- Situação real – com influência da transmissão marginal (avaliação num edifício).

Note-se que pelas razões já expostas se limitará a análise dos sons de percussão a elementos horizontais (lajes), pelo que nos pontos seguintes, e desde que nada seja dito em contrário, sempre que se aludir ao termo elemento construtivo deverá subentender-se que se trata de uma laje de separação entre dois espaços interiores.

3.3.1 Situação Ideal – Sem Influência da Transmissão Marginal

No caso das transmissão sonora por percussão, e ao contrário do que acontecia no caso de sons aéreos, já não se verifica a incidência de uma onda sonora no elemento construtivo mas sim a solicitação directa da fonte de ruído (por exemplo passos) originando a sua vibração, cuja energia será em parte dissipada no seio do elemento, e a restante transmitida para o espaço receptor onde, tal como no caso dos sons aéreos, fará vibrar o ar contido no espaço e assim determinará a sensação sonora ao nível do receptor.

Nível de pressão sonora de percussão – conceito e caracterização experimental

Considere-se uma fonte sonora de percussão normalizada (também designada por máquina de percussão normalizada, Figura 3.16) actuando em laboratório (câmaras reverberantes) sobre um elemento construtivo. Trata-se de um equipamento que percute o pavimento à razão de 10 choques por segundo, produzidos por 5 martelos de 500 g (cada) que caem de uma altura de 4cm sobre o elemento construtivo a ensaiar. O procedimento de ensaio deverá obedecer às directrizes técnicas definidas na ISO 140-6.

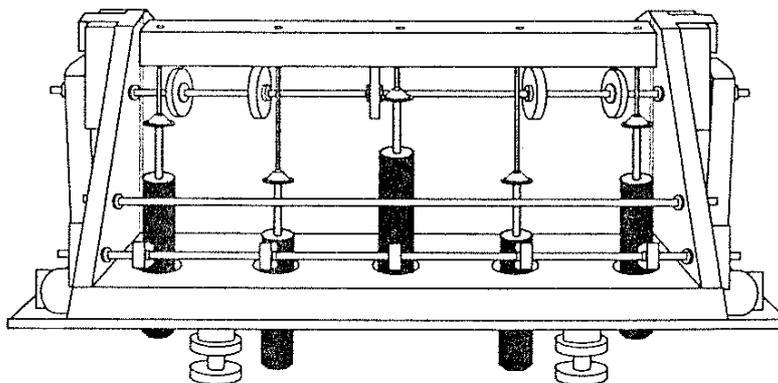


Figura 3.16 – Ilustração de uma máquina de percussão normalizada (Hamayon 1996)

Medindo no espaço receptor o nível médio de pressão sonora resultante da solicitação no espaço emissor obtém-se o designado nível de pressão sonora de percussão (L , medido em dB), normalmente avaliado por bandas de frequências de 1/3 oitava (para as mesmas bandas que no caso dos sons aéreos) (Figura 3.17).

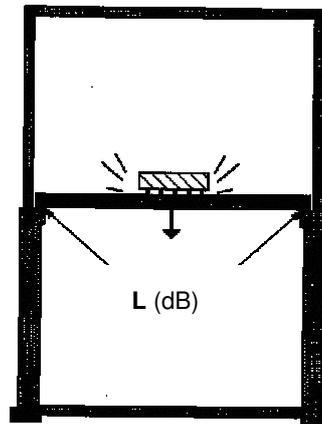


Figura 3.17 – Conceito de nível de pressão sonora de percussão (condições laboratoriais) (Hamayon 1996)

Um aspecto fundamental em toda a análise dos sons de percussão assenta no facto de que, atendendo a que o desempenho medido para uma solução construtiva é o nível de pressão sonora no espaço receptor (L), quanto menor for o seu valor melhor será o isolamento sonoro a sons de percussão, pois a energia sonora que atinge o espaço receptor é menor.

Influência das características de absorção sonora do espaço receptor

O valor do nível de pressão sonora de percussão depende das características de absorção sonora do espaço receptor. Assim, e tal como no caso do isolamento sonoro a sons aéreos, utiliza-se em geral um parâmetro de avaliação normalizado (Equação (3.19)) ou padronizado (Equação (3.20)), consoante o valor característico da absorção sonora do espaço receptor seja a área de absorção equivalente ou o tempo de reverberação.

$$L_n = L + 10 \log \left(\frac{A}{A_0} \right) \quad (3.19)$$

Onde:

L_n – nível de pressão sonora de percussão normalizado (dB)

L – nível de pressão sonora de percussão (dB)

A_0 – área de absorção sonora equivalente de referência (m^2), tomando um valor igual a $10 m^2$ no caso de edifícios residenciais e situações análogas

A – área de absorção sonora equivalente real do espaço receptor (m^2), obtida através da medição do tempo de reverberação

$$L_{nT} = L + 10 \log \left(\frac{T_0}{T} \right) \quad (3.20)$$

Onde:

L_{nT} – nível de pressão sonora de percussão padronizado (dB)

L – nível de pressão sonora de percussão (dB)

T_0 – tempo de reverberação de referência (s), tomando um valor igual a 0,5 s no caso de edifícios residenciais e situações análogas

T – tempo de reverberação no espaço receptor, medido (s)

Refira-se que os parâmetros normalizados e padronizados são igualmente utilizados em situações de avaliação “in situ”.

Caracterização experimental da redução de transmissão de sons de percussão

O tipo de revestimento do elemento construtivo possui um efeito normalmente não desprezável no nível de pressão sonora de percussão medido no espaço receptor. Deste modo, importa definir um parâmetro que permita quantificar a eficácia de um dado revestimento na redução da transmissão de sons de percussão (Equação (3.21)).

$$\Delta L = L_{n,0} - L_n \quad (3.21)$$

Onde:

ΔL – redução da transmissão sonora a sons de percussão conferida por um revestimento de piso (dB)

$L_{n,0}$ – nível de pressão sonora de percussão, normalizado, do pavimento não revestido (dB)

L_n – nível de pressão sonora do percussão, normalizado, do pavimento revestido (dB)

No entanto, e uma vez que a redução da transmissão sonora conferida pelo revestimento de piso depende até certo ponto da laje de pavimento não revestida utilizada em laboratório (a solução pode variar), é necessário reportar os valores de ΔL medidos a um pavimento de referência (ISO 717-2), permitindo assim obter valores comparáveis entre laboratórios.

Conceito de valor ponderado (índice único)

Pelas mesmas razões mencionadas para os sons de condução aérea, também para os sons de percussão se recorre na prática a um índice único de avaliação que pondera o desempenho de isolamento sonoro para as diversas bandas de frequências (1/1 oitava ou 1/3 oitava), de acordo com uma situação padrão (que se designa por “curva” de referência) definida na ISO 717-2 (Figura 3.18, Figura 3.19, Tabela 3.5).

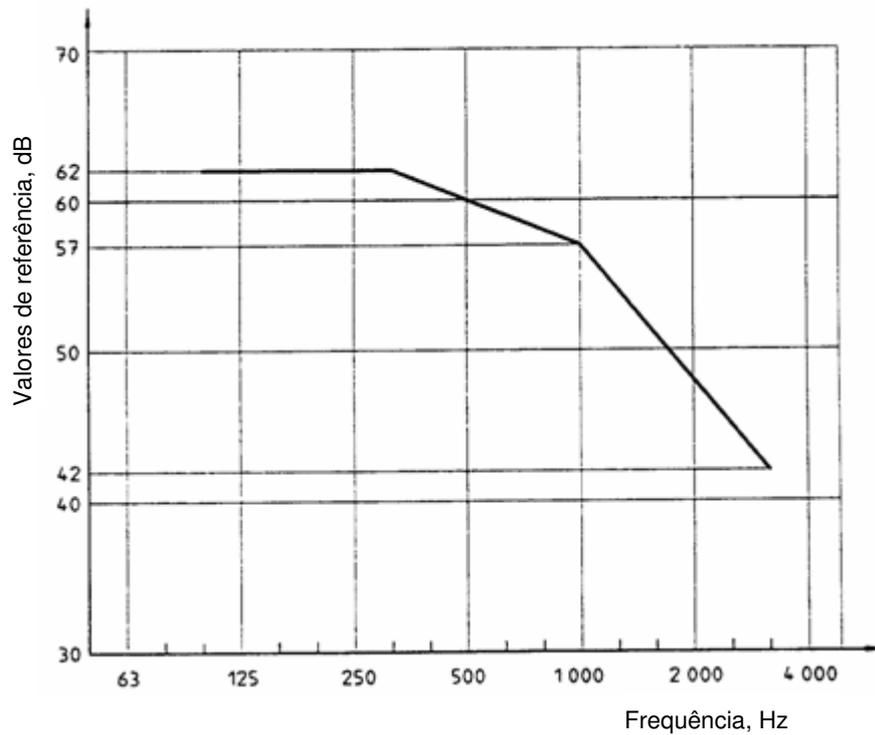


Figura 3.18 – Curva de referência definida na ISO 717-2 para avaliação do isolamento sonoro a sons de percussão por bandas de 1/3 oitava (16 bandas entre 100 e 3150 Hz)

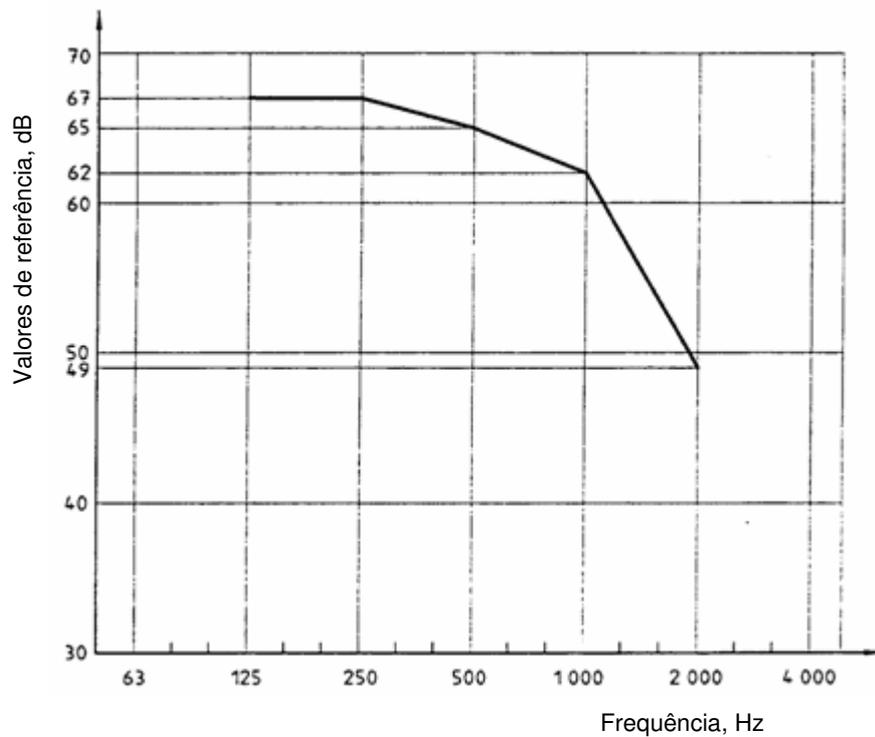


Figura 3.19 – Curva de referência definida na ISO 717-2 para avaliação do isolamento sonoro a sons de percussão por bandas de 1/1 oitava (5 bandas entre 125 e 2000 Hz)

Tabela 3.5 – Descrição paramétrica das curvas de referência (ISO 717-2) para a avaliação do isolamento sonoro a sons de percussão por bandas de 1/3 oitava e de 1/1 oitava

Frequência	Valores de referência	
	Bandas 1/3 oitava	Bandas 1/1 oitava
Hz		
100	62	
125	62	67
160	62	
200	62	
250	62	67
315	62	
400	61	
500	60	65
630	59	
800	58	
1000	57	62
1250	54	
1600	51	
2000	48	49
2500	45	
3150	42	

Na Figura 3.18 e na Figura 3.19 (e também na Tabela 3.5) os diversos valores de referência correspondem a um exemplo de uma curva de referência iniciada nas bandas de 1/1 oitava ou de 1/3 oitava centradas respectivamente nas frequências de 125 Hz e 100 Hz, sendo que o seu valor inicial pode ser qualquer inteiro (e não só 67 ou 62). Apenas se mantém sempre constante a variação relativa dos valores da curva de referência entre bandas de frequências, correspondente ao declive dos vários troços que a compõem.

A comparação entre os valores de nível de pressão sonora referentes ao elemento construtivo em análise (curva real) e os valores de referência definidos na ISO 717-2 (curva de referência) efectua-se por um processo de ajuste entre ambas, utilizando como critério a limitação do somatório das diferenças aritméticas dos valores relevantes. Visto que o objectivo deste processo é passar a representar a curva real através da curva de referência, só quando o valor medido do nível de pressão sonora de percussão é superior ao valor de referência é que a diferença é relevante – conceito de desvio desfavorável para sons de percussão (Figura 3.20).

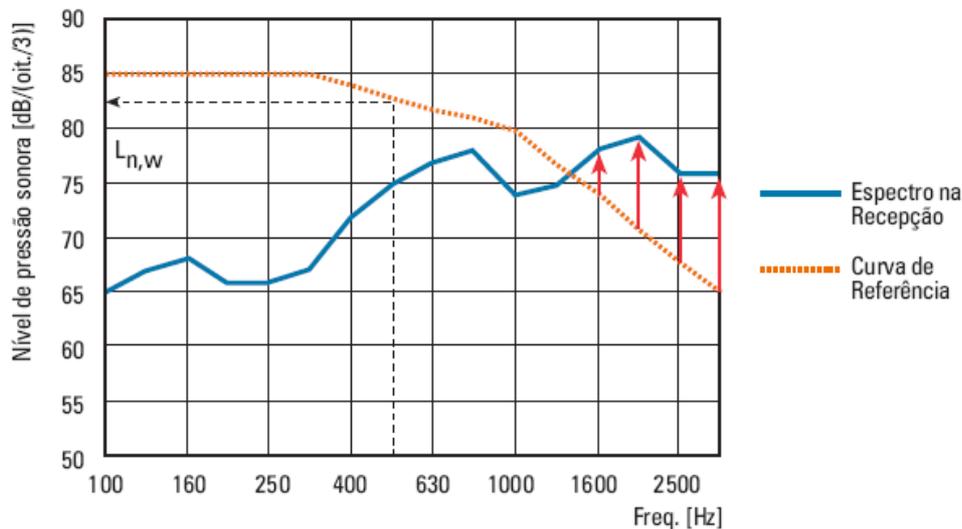


Figura 3.20 – Desvios desfavoráveis num processo de ajuste entre valores de níveis de pressão sonora de percussão medidos e valores de referência (Patrício 2003)

Na prática começa-se por se arbitrar um valor (inteiro) para uma dada banda de frequências da curva de referência, a partir do qual é possível construir toda a curva e calcular os desvios desfavoráveis face à curva real. Considera-se que o ajuste está terminado (trata-se de um processo iterativo) quando o somatório dos desvios desfavoráveis a dividir pelo número total de bandas de frequência envolvidas (5 no caso de 1/1 oitava, 16 no caso de 1/3 oitava) seja o valor mais próximo possível de 2, sem o ultrapassar (mas podendo igualá-lo, ou seja, o somatório deve ser inferior a 10 ou a 32 caso se utilizem bandas de 1/1 oitava ou de 1/3 oitava, respectivamente (o processo de ajuste é equivalente ao caso dos sons aéreos, exceptuando apenas o conceito de desvio desfavorável).

O índice único proveniente deste processo de ajuste corresponde ao valor da banda centrada nos 500 Hz, passando a adoptar para além do nome do descritor de isolamento sonoro em causa (por exemplo L, L_n, ...), a designação w (“weighted” – ponderado) – L_w, L_{n,w}, ... – tal como se pode observar na Figura 3.20 (no caso L_{n,w}).

Em anexo apresentam-se valores característicos do isolamento sonoro a sons de percussão de algumas soluções construtivas (EN 12354-2), recomendando-se sempre para uma aplicação prática a consulta de boletins laboratoriais de ensaio das soluções a utilizar.

Importa ainda explicar o processo associado à avaliação da redução de transmissão de sons de percussão conferida por um revestimento de piso, após correcção para um pavimento de referência (índice ΔL_w).

Trata-se apenas de estimar o nível de pressão sonora de percussão normalizado do pavimento de referência revestido (Equação (3.22)), e de seguida aplicar a Equação (3.23) (diferença aritmética entre valores ponderados).

$$L_{n,r} = L_{n,r,0} - \Delta L \quad (3.22)$$

Onde:

$L_{n,r}$ – nível de pressão sonora de percussão, normalizado, do pavimento de referência revestido (utilizando o valor de ΔL determinado no laboratório onde se realizou o ensaio) (dB)

$L_{n,r,0}$ – nível de pressão sonora de percussão, normalizado, do pavimento de referência não revestido (valores definidos na ISO 717-2) (dB)

ΔL – redução de transmissão sonora a sons de percussão conferida por um revestimento de piso (dB)

$$\Delta L_w = L_{n,r,0,w} - L_{n,r,w} \quad (3.23)$$

Onde:

ΔL_w – redução da transmissão sonora (valor ponderado) a sons de percussão conferida por um revestimento de piso (dB)

$L_{n,r,0,w}$ – nível de pressão sonora de percussão, normalizado e ponderado, do pavimento de referência não revestido (valor definido na ISO 717-2) (dB)

$L_{n,r,w}$ – nível de pressão sonora de percussão, normalizado e ponderado, do pavimento de referência revestido (dB)

Na Figura 3.21 apresenta-se um exemplo de um boletim de ensaio relativo ao parâmetro ΔL_w para um material a integrar numa solução de revestimento de pavimento (neste caso um elemento resiliente a colocar sob o revestimento). Refira-se a propósito que a utilização deste parâmetro apenas é válida para lajes de massa superficial elevada.

3.3.2 Situação Real – Com Influência da Transmissão Marginal

Tal como para os sons de condução aérea, não faz sentido para uma situação real num edifício falar no isolamento sonoro a sons de percussão de um elemento construtivo, mas sim do isolamento a sons de percussão entre dois espaços.

Quando se considera a transmissão marginal no caso dos sons de percussão, os parâmetros descritores de isolamento sonoro passam a utilizar na sua designação uma “plica” (´) (por exemplo $L´$, $L´_n$, $L´_{nT}$, entre outros).

A medição do isolamento sonoro a sons de percussão entre dois espaços interiores de um edifício processa-se de forma similar à avaliação laboratorial, ainda que com um conjunto de directrizes técnicas específicas definidas na norma ISO 140-7.

Nível de pressão sonora de percussão (in situ)

Neste caso o nível de pressão sonora de percussão não é originado apenas pela vibração da laje de pavimento, mas também pelos elementos construtivos a ele ligados, sendo que no caso geral (avaliação no espaço subjacente ao local emissor) estes correspondem às paredes da envolvente entre os dois espaços em análise (Figura 3.22).

Date de l'essai : 23/12/99
Poste d'essai : Rouge
Volume salle récept. : 72 m³
Surface testée : 12 m²
Température du plancher : 19 °C
Température de l'air salle d'émission : 20 °C
Humidité relative salle d'émission : 65 %

Fréquence (Hz)	L _{p,r} (dB)	ΔL (dB)
100	62,4	2,2
125	64,5	1,5
160	67,3	3,0
200	67,1	2,6
250	68,1	3,8
315	68,7	6,8
400	70,4	13,5
500	70,4	15,9
630	70,7	24,6
800	71,9	30,4
1000	72,9	36,6
1250	73,5	42,3
1600	73,0	44,9
2000	71,7	45,7
2500	70,3	47,2
3150	68,4	49,7 *
4000	65,2	52,1 *
5000	60,8	54 *

* Valeurs corrigées

ΔL	20 dB(A)
ΔL _w	20 dB
C _{L,S}	-11 dB

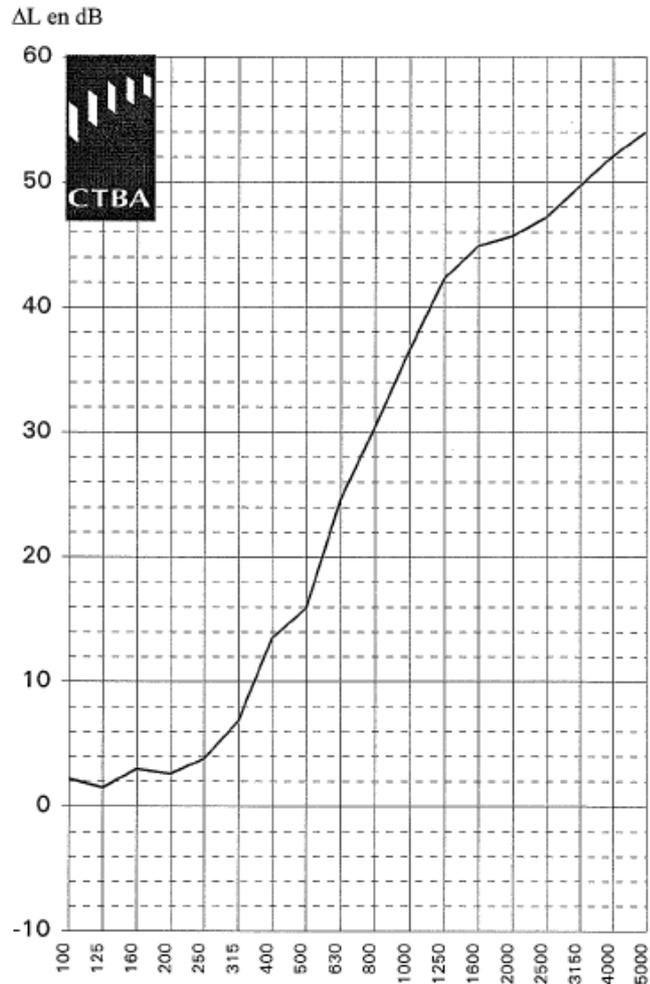


Figura 3.21 – Excerto de um boletim de ensaio laboratorial relativo à redução sonora a sons de percussão de um material a integrar numa solução de revestimento de pavimento (descrição dos valores de ΔL por bandas de frequências de 1/3 oitava), com um $\Delta L_w = 20$ dB (Velophone)

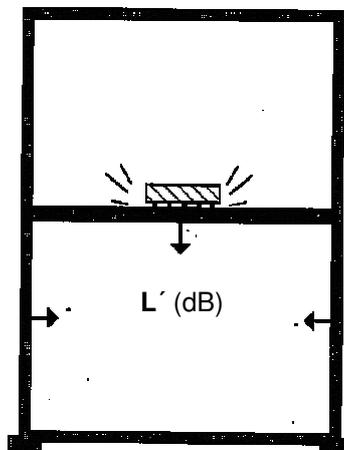


Figura 3.22 – Conceito de nível de pressão sonora de percussão (medido "in situ") (Hamayon 1996)

Por conseguinte a avaliação no espaço receptor do nível médio de pressão sonora de percussão passa a realizar-se através do parâmetro L' – nível de pressão sonora de percussão (medido “in situ”). Note-se que na prática não é necessário referir que o parâmetro L' diz respeito a uma medição num edifício, visto que tal como já explicado, a “plica” utilizada na denominação do parâmetro permite identificar imediatamente a situação em causa.

Nível de pressão sonora de percussão (“in situ”) normalizado ou padronizado

Refira-se novamente que para situações de avaliação “in situ” continuam a ser aplicáveis os parâmetros normalizado e padronizado atrás referidos (Equações (3.19) e (3.20)), passando neste caso a apresentar a designação L'_{n} e L'_{nT} .

Índices de isolamento sonoro a sons de percussão

Tal como explanado no caso dos sons de condução aérea, quando se considera a existência de transmissão marginal continua naturalmente a ser válido o conceito de parâmetro descritor único. Aplicando de novo este conceito aos parâmetros de isolamento sonoro normalizado ou padronizado, obtêm-se os dois índices de isolamento sonoro a sons percussão mais utilizados na legislação europeia:

- $L'_{n,w}$ – índice de isolamento sonoro a sons percussão normalizado;
- $L'_{nT,w}$ – índice de isolamento sonoro a sons percussão padronizado.

O índice $L'_{n,w}$ foi adoptado pela regulamentação Portuguesa (Decreto-Lei n.º 129/2002) para a quantificação do isolamento sonoro a sons de percussão entre dois espaços interiores.

No caso dos sons de percussão há que referir se a avaliação é efectuada em bandas de 1/1 oitava ou de 1/3 oitava pois, como o que está em causa é apenas um nível de pressão sonora (e não a diferença entre dois níveis como no caso dos sons aéreos), caso se utilizem bandas de 1/1 oitava o valor medido excederá normalmente em cerca de 5 dB o respectivo valor em bandas de 1/3 oitava (o mesmo se mantém válido para uma situação de avaliação laboratorial).

Quando nada é referido em contrário assume-se que o índice $L'_{n,w}$ (ou outro) corresponde ao valor medido em bandas de 1/3 oitava. Caso se pretenda exprimir um resultado em bandas de 1/1 oitava então os resultados deverão aparecer expressos em dB/oit. – por exemplo $L'_{n,w} = 65$ dB/oit (que corresponde aproximadamente a um $L'_{n,w} = 60$ dB).

Quantificação da transmissão marginal

Para a quantificação da componente marginal no processo de transmissão sonora de percussão entre dois espaços interiores de um edifício deve recorrer-se à metodologia de cálculo definida na normalização europeia aplicável (EN 12354-2). A aplicação da metodologia simplificada da referida norma permite escrever a Equação (3.24).

$$L'_{n,w} = L_{n,w} - \Delta L_w + \Delta TM \quad (3.24)$$

Onde:

$L'_{n,w}$ – índice de isolamento sonoro a sons de percussão normalizado (dB)

$L_{n,w}$ – nível de pressão sonora de percussão ponderado (dB)

ΔL_w – redução da transmissão sonora (valor ponderado) a sons de percussão conferida por um revestimento de piso (dB)

ΔTM – influência da transmissão marginal (dB)

Note-se que uma vez que quanto maior for o índice de isolamento sonoro a sons de percussão pior é o desempenho, a influência da transmissão marginal ΔTM afecta positivamente o valor relativo à caracterização laboratorial da solução construtiva.

Para uma situação específica é possível através da consulta da EN 12354-2 obter o valor do parâmetro ΔTM em função da massa superficial da laje de pavimento e da massa superficial média dos vários elementos marginais (paredes) não revestidos, sendo que para soluções construtivas tradicionais um valor de $\Delta TM = 3$ pode ser considerado conservativo (o seu valor pode variar na prática de 0 a 6 dB – método simplificado da EN 12354-2).

Visto que a metodologia de quantificação da transmissão marginal apresentada apenas diz respeito ao índice ponderado ($L'_{n,w}$), importa apresentar a relação entre o valor obtido e o do índice padronizado ($L'_{nT,w}$) correspondente (Equação (3.25)).

$$L'_{nT,w} = L'_{n,w} + 10 \log \left(\frac{30}{V} \right) \quad (3.25)$$

Onde:

$L'_{nT,w}$ – índice de isolamento sonoro a sons de percussão padronizado (dB)

$L'_{n,w}$ – índice de isolamento sonoro a sons de percussão normalizado (dB)

V – volume do espaço receptor (m^3)

Por último deve notar-se que a metodologia apresentada apenas é válida para o caso em que a avaliação do isolamento sonoro a sons de percussão se efectua no espaço subjacente àquele em que actua a máquina de impactos. Caso não seja esta a situação (o que na prática é um caso vulgar, atendendo às exigências regulamentares – ver §3.3.3) (Figura 3.23) devem utilizar-se métodos de previsão mais detalhados.



Figura 3.23 – Exemplo de transmissão de sons de percussão para um caso em que o espaço receptor não se encontra subjacente ao espaço emissor (Patrício 2003)

3.3.3 Critérios de Desempenho Acústico

A regulamentação Portuguesa referente aos requisitos acústicos (mínimos) em edifícios (Decreto-Lei n.º 129/2002) define um conjunto de valores de isolamento sonoro a sons de percussão, em função do tipo de edifício e da natureza dos espaços emissor/receptor.

Apresentam-se de seguida, como referência, os valores referentes a edifícios habitacionais e mistos (Tabela 3.6).

Tabela 3.6 – Requisitos regulamentares de isolamento sonoro a sons de percussão entre espaços interiores de edifícios habitacionais e mistos (Decreto-Lei n.º 129/2002)

Índice de Isolamento Sonoro a Sons de Percussão, $L'_{n,w}$	
<i>Entre o espaço/situação abaixo indicada (emissão) e quartos ou zonas de estar dos fogos (recepção)</i>	
Pavimentos de outros fogos ou locais de circulação comum *	≤ 60 dB
Locais de comércio, indústria, serviços ou diversão	≤ 50 dB

* Exceptuando se o local emissor for um caminho de circulação vertical, num edifício servido por ascensores.

A definição de critérios complementares de isolamento sonoro a sons de percussão depende, tal como no caso dos sons aéreos, da relação entre a produção de ruído no espaço emissor e do nível de ruído de fundo expectável no espaço receptor, não sendo por isso fácil definir valores de referência, recomendando-se a análise de cada caso em particular.

Apenas a título de exemplo, indica-se de seguida um critério de conforto que poderá ser desejável garantir em edifícios de habitação: $L'_{n,w} \leq 60$ dB entre qualquer compartimento de um fogo e um escritório de outro fogo.

Anexos

Valores indicativos do índice de redução sonora R_w para alguns elementos construtivos, de acordo com a EN 12354-1

Elemento Construtivo	m' Kg/m ²	Índice de redução sonora (R) em bandas de frequências de 1/1 oitava (dB)							$R_w (C;C_{tr})$ (dB)
		63	125	250	500	1k	2k	4k	
Betão armado 120 mm	276	35	34	36	46	54	62	69	49 (-2;-6)
Betão armado 260 mm	598	43	42	51	59	67	74	75	61 (-1;-7)
Betão leve 120 mm	156	33	36	34	35	44	53	56	42 (-1;-3)
Betão leve 300 mm	390	37	37	42	51	58	58	58	54 (-2;-6)
Betão autoclavado 100 mm	65	26	30	31	27	32	41	45	32 (0;-1)
Betão autoclavado 200 mm	130	30	30	29	34	43	46	46	39 (-1;-3)

Valores indicativos do nível de pressão sonora de percussão (normalizado e ponderado) $L_{n,w}$ para alguns elementos construtivos, de acordo com a EN 12354-2

Elemento Construtivo	m' Kg/m ²	Nível de pressão sonora de percussão (L) em bandas de frequências de 1/1 oitava (dB / oit.)							$L_{n,w} (C_i)$ (dB.)
		63	125	250	500	1k	2k	4k	
Betão armado 100 mm + 20 mm de revestimento	268	65	73	78	78	78	78	76	80 (-11)
Betão armado 180 mm + 50 mm de revestimento	509	64	60	65	66	67	68	66	69 (-11)
Betão leve 200 mm	260	65	72	78	77	77	76	70	77 (-9)
Betão leve 300 mm	390	64	68	70	70	70	70	64	71 (-9)

Nota: o índice C_i corresponde a um termo de correcção que tem em conta o nível de ruído de percussão, não ponderado, característico de um espectro derivado de um ruído de passos, com objectivo de identificar potenciais situações de incomodidade sentidas pelos ocupantes dos edifícios (ISO 717-2).

Referências Bibliográficas

- Arau, Higini (1999). ABC de la Acustica Arquitectónica. Ediciones CEAC, Espanha.
- Bies, D.; Hansen C. (2003). Engineering Noise Control – Theory and Practice. Spon Press.
- Carvalho, A.P. (2004). Acústica Ambiental e de Edifícios. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Cavanaugh, W.; Wilkes, J. (eds.) (1999). Architectural Acoustics. John Wiley & Sons.
- Hamayon, L. (1996). Réussir l'Acoustique d'un Bâtiment. Le Moniteur, França.
- Henrique, Luís (2002). Acústica Musical. Fundação Calouste Gulbenkian.
- Jacobsen, F. et al. (2006). Fundamentals of Acoustics and Noise Control. Technical University of Denmark (DTU).
- Long, Marshall (2006). Architectural Acoustics. Elsevier Academic Press.
- Meisser, Mathias (1994). L'Acoustique du Bâtiment par l'Exemple. Le Moniteur, França.
- Patrício, Jorge (2003). Acústica nos Edifícios. Edição de autor.
- Patrício, Jorge (2004). Acústica de Edifícios: índices de isolamento a sons aéreos utilizados no espaço europeu, Revista de Acústica SEA (Sociedad Acustica Española), Vol. 35. n.ºs 3 e 4.
- Souza, Lea; Guedes de Almeida, Manuela; Bragança, Luís (2003). Bê-á-bá da Acústica Arquitectónica – Ouvindo a Arquitectura. 1ª Edição, Bauru, São Paulo, Brasil.
- Tadeu, António; Mateus, Diogo (1995). Comportamento Acústico de Edifícios. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Regulamentos e Normas

- Decreto-Lei n.º 9/2007 de 17 de Janeiro. Regulamento Geral do Ruído.
- Decreto-Lei n.º 129/2002 de 11 de Maio. Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios.

EN 12354-1:2000. Building acoustics. Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements. Part 1: Airborne sound insulation between rooms.

EN 12354-2:2000. Building acoustics. Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements. Part 2: Impact sound insulation between rooms.

EN 12354-3:2000. Building acoustics. Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements. Part 3: Airborne sound insulation against outdoor sound.

EN 12354-6: 2003. Building acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements — Part 6: sound absorption in enclosed spaces.

EN ISO 11654:1997. Acoustics. Sound absorbers for use in buildings. Rating of sound absorption.

NP EN 20354:1993. Acústica. Determinação em câmara reverberante do coeficiente de absorção sonora e da área de absorção sonora equivalente.

NP EN ISO 140-1:2001. Acústica. Medição do isolamento sonoro de edifícios e de elementos de construção. Parte 1: Especificações para laboratórios sem transmissão marginal.

NP EN ISO 140-3:1998. Acústica. Medição do isolamento sonoro de edifícios e de elementos de construção. Parte 3: Medição em laboratório do isolamento sonoro a sons de condução aérea de elementos de construção.

NP EN ISO 140-4:2000. Acústica. Medição do isolamento sonoro de edifícios e de elementos de construção. Parte 4: Medição in situ do isolamento sonoro a sons aéreos entre compartimentos.

NP EN ISO 140-5:2000. Acústica. Medição do isolamento sonoro de edifícios e de elementos de construção. Parte 5: Medição, in situ, do isolamento sonoro a sons aéreos de fachadas e de elementos de fachada.

NP EN ISO 140-6:2000. Acústica. Medição do isolamento sonoro de edifícios e de elementos de construção. Parte 6: Medição, em laboratório, do isolamento sonoro de pavimentos a sons de percussão.

NP EN ISO 140-7:2000. Acústica. Medição do isolamento sonoro de edifícios e de elementos de construção. Parte 7: Medição, in situ, do isolamento sonoro de pavimentos a sons de percussão.

NP EN ISO 140-8:1997. Acústica. Medição do isolamento sonoro de edifícios e de elementos de construção. Medição em laboratório da redução de transmissão sonora de revestimentos de piso em pavimento normalizado.

NP EN ISO 140-9:1996. Acústica. Medição do isolamento sonoro de edifícios e de elementos de construção. Parte 9: Medição em laboratório do isolamento sonoro a sons aéreos de tectos falsos com caixa de ar, comuns a compartimentos adjacentes.

NP EN ISO 140-10:1996. Acústica. Medição do isolamento sonoro de edifícios e de elementos de construção. Parte 10: Medição do isolamento sonoro a sons aéreos de elementos de construção de pequenas dimensões.

NP EN ISO 717-1:2002. Acústica: Determinação do isolamento sonoro em edifícios e de elementos de construção. Parte 1: Isolamento sonoro a sons de condução aérea.

NP EN ISO 717-2:2002. Acústica: Determinação do isolamento sonoro em edifícios e de elementos de construção. Parte 2: Isolamento sonoro a sons de percussão.

Norma Portuguesa NP 4361-1:1997. Acústica. Atenuação do som na sua propagação ao ar livre. Parte 1: Cálculo da absorção sonora atmosférica.

Norma Portuguesa NP 4361-2:2001. Acústica. Atenuação do som na sua propagação ao ar livre. Parte 2: Método de cálculo.

Catálogos Técnicos

Acústica Integral
Brüel & Kjær
Hawaphon
BPB Placoplatre
Anjos Ventilation
Gustafs