

JORGE PATRÍCIO

acústica

nos

edifícios

7.^a EDIÇÃO
REVISTA E AUMENTADA

AUTOR

Jorge Patrício

TÍTULO

Acústica nos Edifícios – 7.ª Edição, Revista e Aumentada

EDIÇÃO

Publindústria, Edições Técnicas

Praça da Corujeira n.º 38 · 4300-144 PORTO · www.publindustria.pt

DISTRIBUIÇÃO

Engebook - Conteúdos de Engenharia e Gestão

Tel. 220 104 872 · Fax 220 104 871 · E-mail: apoiocliente@engebook.com · www.engebook.com

PARCEIRO COMUNICACIONAL

Construção Magazine – Revista Técnica e Científica de Engenharia Civil

APOIO INSTITUCIONAL

Ordem dos Arquitectos – Secção Regional do Norte

APOIO À EDIÇÃO

CDM – making your world a quieter place

dBwave.i – acoustic engineering s.a.

REVISÃO

Rita Vicente Martins

DESIGN

Helder David

IMPRESSÃO

Espanha, Março, 2018

DEPÓSITO LEGAL

433781/17



A **cópia ilegal** viola os direitos dos autores.

Os prejudicados somos todos nós.

Copyright © 2018 | Publindústria, Produção de Comunicação, Lda.

Todos os direitos reservados a Publindústria, Produção de Comunicação, Lda. para a língua portuguesa.

A reprodução desta obra, no todo ou em parte, por fotocópia ou qualquer outro meio, seja eletrónico, mecânico ou outros, sem prévia autorização escrita do Editor, é ilícita e passível de procedimento judicial contra o infrator.

Nenhuma parte desta publicação poderá ser reproduzida, no todo ou em parte, sob qualquer forma ou meio, seja eletrónico, mecânico, de fotocópia, de gravação ou outros sem autorização prévia por escrito do autor.

Por opção do autor, este livro não segue o novo Acordo Ortográfico de 1990.

CDU

69 Indústria da construção. Materiais para construção. Procedimentos e práticas de construção
534.8 Aplicações da acústica (teoria)

ISBN

Papel: 978-989-723-262-6

E-book: 978-989-723-263-3

Engebook – Catalogação da publicação

Família: Engenharia Civil

Subfamília: Acústica

ÍNDICE

PREÂMBULO.....	1
NOÇÕES GERAIS.....	5
1.1 Introdução	5
1.2 Exposição ao ruído e perdas auditivas	5
1.3 O som no ar	8
1.4 Propagação em meio fluido homogêneo, isotrópico e não dissipativo.....	10
1.5 Propagação em meios dissipativos	12
1.6 Ondas em meio sólido	13
1.7 Nível de pressão e de potência sonoras	15
1.8 Nível sonoro.....	17
1.9 Bandas de frequências.....	19
1.10 Modelos de ruído-tipo.....	21
1.11 Equipamento de medição	22
INTEGRAÇÃO URBANÍSTICA E AMBIENTE ACÚSTICO	25
2.1 Introdução	25
2.2 O ruído de tráfego terrestre	26
2.3 Outras instalações	29
2.4 Descrição / identificação de problemas	29
2.4.1 Tráfego rodoviário	29
2.4.2 Tráfego ferroviário.....	31
2.5 Aeroportos (tráfego aéreo)	33
2.6 Instalações industriais, minas, estaleiros etc.	36
2.7 Correção acústica	36
2.7.1 Tráfego terrestre.....	36
2.7.2 Tráfego aéreo	44
2.8 Estaleiros e instalações similares.....	46
2.9 Soluções preventivas e correctivas	48
2.10 Aspectos legais aplicáveis	50
2.10.1 Considerações gerais	50
2.10.2 Artigos relevantes	55
ISOLAMENTO A SONS AÉREOS.....	59
3.1 Introdução	59
3.2 Caracterização do isolamento a sons aéreos	61
3.3 Método de caracterização experimental.....	62
3.4 Método elasto-dinâmico.....	70
3.5 Aplicação dos métodos expostos	74
3.5.1 Considerações gerais	74
3.5.2 Sistemas duplos pesados.....	77
3.5.3 Sistemas duplos aligeirados	78
3.6 Aspectos complementares	82
3.6.1 Influência do efeito de coincidência.....	82

3.6.2	Ressonâncias de sistemas duplos	85
3.6.3	Transmissões parasitas	87
ISOLAMENTO A SONS DE PERCUSSÃO.....		91
4.1	Introdução	91
4.2	Caracterização do isolamento a sons de percussão	92
4.3	Método de avaliação experimental	93
4.4	Método do invariante $R + L_n$	99
4.5	Método de R. Josse	101
4.5.1	Introdução	101
4.5.2	Força alternada e sinusoidal	101
4.5.3	Força impulsiva	104
4.6	Consideração do efeito de revestimentos de piso	106
4.6.1	Considerações gerais	106
4.6.2	Revestimentos resilientes	110
4.6.3	Sistemas flutuantes	111
4.7	Pavimentos de madeira	113
QUALIDADE ACÚSTICA DE ESPAÇOS FECHADOS		115
5.1	Considerações gerais	115
5.2	Noção de tempo de reverberação	121
5.3	Correcção acústica de espaços	124
5.3.1	Introdução	124
5.3.2	Determinação da área de absorção sonora equivalente	125
5.3.3	Materiais porosos	127
5.3.4	Sistemas ressonantes	129
5.3.5	Determinação do índice de absorção sonora α_w	133
5.4	Definição, clareza e inteligibilidade	135
5.4.1	Introdução	135
5.4.2	Definição	136
5.4.3	Clareza	136
5.4.4	Inteligibilidade (STI)	137
5.5	Difusão	141
EQUIPAMENTOS E INSTALAÇÕES.....		145
6.1	Ruído de equipamentos	145
6.1.1	Introdução	145
6.1.2	Equipamentos de carácter colectivo	146
6.1.3	Unidades de comércio e serviços	148
6.2	Ruído de Instalações	152
6.3	Controlo do ruído de equipamentos em edifícios	154
6.3.1	Introdução	154
6.3.2	Enquadramento regulamentar	154
6.3.3	Vias de transmissão do ruído de equipamentos	154
6.3.4	Situações mais frequentes de ruído de equipamentos em edifícios	155
6.4	Linhas orientativas para uma aplicação prática	166

TRANSMISSÃO MARGINAL E VERIFICAÇÃO <i>IN SITU</i>.....	171
7.1 Introdução	171
7.2 Sons aéreos.....	172
7.3 Sons de percussão	174
7.4 Quantificação da transmissão marginal relativa aos sons aéreos.....	174
7.5 Quantificação da transmissão marginal relativa aos sons de percussão	189
7.6 Determinação experimental dos factores da transmissão marginal	196
7.6.1 Velocidade média de vibração	196
7.6.2 Coeficiente de redução de propagação de vibrações.....	196
7.7 Campo de aplicação	197
INTER-RELAÇÃO ENTRE A ACÚSTICA, TÉRMICA E A VENTILAÇÃO	199
8.1 Introdução	199
8.2 Condições térmicas e de ventilação.....	201
8.3 Inter-relação entre os requisitos acústicos e as exigências de conforto higrotérmico e ventilação	210
8.3.1 Considerações gerais	210
8.3.2 Exigências regulamentares e/ou normativas.....	212
8.3.3 Isolamento sonoro dos elementos da envolvente exterior (inter-relação com isolamento térmico e ventilação).....	213
8.4 Isolamento sonoro dos elementos de separação (inter-relação com isolamento térmico e inércia térmica)	222
8.4.1 Isolamento sonoro a sons de condução aérea.....	222
8.4.2 Isolamento sonoro a sons de percussão.....	231
8.4.3 Correção acústica de recintos fechados (inter-relação com a inércia térmica)	243
8.5 Resumo das exigências	244
VIBRAÇÕES DEVIDAS A EQUIPAMENTOS E INSTALAÇÕES*	247
9.1 Introdução	247
9.2 Aspectos teóricos.....	248
9.2.1 O modelo discreto de um grau de liberdade	248
9.2.2 Vibrações em meios contínuos.....	251
9.2.3 Discretização de sistemas em modelos com vários graus de liberdade.....	255
9.2.4 Descrição das vibrações no domínio da frequência	256
9.2.5 Transformada discreta e transformada rápida de Fourier	257
9.3 Isolamento de Vibrações.....	258
9.4 Aspectos práticos.....	262
9.4.1 Tipos de vibrações considerados	262
9.4.2 Intensidade, nível e frequências da vibração	262
9.4.3 Previsão das frequências próprias de um edifício ou de um elemento	263
9.4.4 Ruído estrutural.....	265
9.5 Critérios de avaliação e normas portuguesas e internacionais	266
9.5.1 Grandezas a medir e equipamentos.....	266
9.5.2 Normas portuguesas e critérios nacionais.....	267
9.5.2.1 Vibrações impulsivas.....	267
9.5.2.2 Vibrações continuadas	268
9.5.3 Normas internacionais (referência).....	270
9.6 Recomendações gerais para estaleiros de obras e para explorações ou instalações geradoras de vibrações.....	275

9.6.1	Projecto	275
9.6.1.1	Edifícios com ocupação humana	275
9.6.1.2	Impacto ambiental de grandes instalações e de vias de transportes terrestres	276
9.6.2	Inspeção prévia	276
9.6.3	Construção	277
9.6.4	Exploração.....	278
REGULAMENTO DOS REQUISITOS ACÚSTICOS DOS EDIFÍCIOS ANOTADO		279
10.1	Decreto-Lei n.º 129, de 11 de Maio de 2002 (RRAE), alterado pelo Decreto-Lei n.º 96, de 9 de Junho de 2008	279
10.2	RRAE: avaliação acústica.....	307
10.3	Procedimentos de avaliação típicos	311
SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS E EXERCÍCIOS DE APLICAÇÃO		317
11.1	Soluções construtivas.....	317
11.2	Dados complementares	327
11.3	Exercícios de aplicação.....	336
	Nível sonoro global:	336
	Zona opaca:	340
	Zona translúcida:	340
	Separação de fogos na horizontal.....	341
	Separação de fogos na vertical	341
	Sons aéreos;	341
	Sons de percussão.....	341
	Sons aéreos	343
	Sons de percussão.....	344
	Sons Aéreos.....	353
11.4	Testes apresentados em cursos promovidos pelo autor	361
ANEXO - OUTROS MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO DO ISOLAMENTO SONORO		375
A1	Métodos de Medição.....	375
A.1.1	Método da holografia acústica	375
A.1.2	Método da intensimetria sonora.....	376
A.2	Métodos de Previsão	378
A.2.1	Método de E. Gerretsen	378
A.2.2	Método da análise modal	381
A.2.3	Método dos elementos finitos, FEM.....	383
A.2.4	Método de análise estatística de energia, SEA	387
BIBLIOGRAFIA.....		389

PREÂMBULO

A Acústica, como disciplina que estuda o som devido a vibrações elásticas nos gases, tem o seu início perdido nas páginas da história. Nos seus primórdios, como todas as ciências, a Acústica encontrava-se associada a conceitos filosóficos relativamente próximos da magia e de determinados rituais místicos. O filósofo chinês Fohi, no século 30 A. C., relacionou a altura dos tons aos cinco elementos fundamentais: Terra, Ar, Fogo, Água e Vento. Numa perspectiva estritamente musical os Indus dividiram uma oitava em 22 tons e os Árabes em 17. Segundo se julga, parece que foram os gregos, no tempo de Pitágoras, que desenvolveram a escala harmónica.

Foi Aristóteles quem, nos trabalhos que realizou, procurou estudar com detalhe a música. As ideias e conceitos, nem sempre verdadeiros, que produziu, permaneceram como dogmas até ao fim da Idade Média. E é já no fim do século XVII que aparecem as primeiras ideias de ligar a altura¹ de um som ao número de vibrações por segundo que um corpo, ao actuar como fonte sonora, estabelecia².

O desenvolvimento da Acústica, como ciência, iniciou-se com o trabalho de Chladni, intitulado “Die Akustik” e editado em 1802. Na mesma época é enunciado o princípio de Huyghens enquanto Young realiza trabalhos sobre a teoria ondulatória, sendo mencionadas as semelhanças entre as ondas luminosas e as ondas que aparecem sobre a superfície da água.

Logo a seguir surgem também resultados de trabalhos de Newton e Leibnitz sobre este mesmo assunto. Euler publicou nesta altura a sua teoria das vibrações em cordas; Lagrange, Bernoulli, D’Alambert e Laplace apresentam uma mecânica racional completamente nova e Fourier, a partir do estudo do calor, apresenta as séries que têm o seu nome, estabelecendo com elas a base matemática da Acústica.

No princípio do século XIX Ohm iniciou a sua polémica com Seebeck sobre a sensibilidade do ouvido humano. Para Ohm o ouvido só era sensível às vibrações sinusoidais e todo o som que se percebia era composto por uma série de tons.

Esta concepção de Ohm originou um complexo problema sobre análise harmónica que foi resolvido por Helmholtz e publicado na sua “Teoria de

1 A altura de um som é a propriedade em função da qual os sons se classificam em agudos e graves e traduz, em apreciação auditiva, a frequência fundamental do som considerado: in “Elementos de Acústica Musical”, de P. Martins da Silva (1989).

2 Ideias desenvolvidas por Mersenne (1588/1648) no seu “Harmonicarum Libri” editado em 1636. Foi também Mersenne quem primeiramente determinou um valor de velocidade de propagação do som no ar a partir da contagem dos batimentos cardíacos entre o momento de uma explosão e a chegada do respectivo som. Com esta mesma técnica Gassend (1647) concluiu que a velocidade de propagação do som depende da altura do mesmo. No início do século XVIII Newton determinou o valor de 280 ms^{-1} e, logo a seguir, Laplace o valor de 323 ms^{-1} .

Ressonância do Ouvido”, editada em 1867. Neste período, a Acústica atingiu o seu apogeu com a obra de Rayleigh intitulada “Theory of Sound” e editada em 1877, onde foram estabelecidas as bases científicas da Acústica.

A partir dos trabalhos de Rayleigh, o desenvolvimento da Acústica ficou relativamente estagnado. O seu progresso posterior deve-se ao aparecimento das telecomunicações (telefones e aparelhos de áudio), no final do século XIX e início do século XX.

Foi devido ao aparecimento dos transdutores electromecânicos (microfone e altifalante) que começaram a dar-se os primeiros passos para o progresso mais acelerado da Acústica.

Também a reprodução e gravação, tanto na indústria discográfica como cinematográfica, contribuíram para esse progresso. Sabine, em 1925, desenvolveu alguns estudos sobre acústica arquitectónica, os quais tiveram posteriormente continuidade em Morse, Newman, Hunt, Beranek e Cremer.

Pode, todavia, considerar-se que foi a partir da segunda Guerra Mundial que a Acústica teve o grande incremento no seu desenvolvimento.

São muitas as aplicações da Acústica nos dias de hoje, nomeadamente no estudo das características dos sólidos, na resposta dos transdutores, na avaliação de qualidade ambiental, na medicina e nos locais de espectáculo.

A Acústica, como uma parte da Física, pode ser entendida como o capítulo onde se estudam as vibrações e as ondas mecânicas nos meios materiais.

As vibrações de frequência muito baixa (inferiores a 20 Hz) são conhecidas como infra-sons (ou, tão simplesmente, vibrações), as de frequências situadas no intervalo 20 Hz a 20 kHz como sons (faixa de audio-frequência referida ao ouvido humano, considerado na terminologia ouvido “padrão”, “normal” ou “médio”) e as de frequência superior como ultra-sons.

Toda a acção mecânica que altere os valores das variáveis de estado de um meio material dá origem a oscilações que, propagando-se, vão excitar o sistema auditivo e, dependendo da gama de frequências em causa, traduzir-se em som audível.

Para avaliar a importância da audição no ser humano repare-se que os olhos são sensíveis a ondas electromagnéticas com frequências contidas no intervalo $3,85 \times 10^{14}$ Hz a $7,90 \times 10^{14}$ Hz – correspondendo respectivamente a comprimentos de onda entre $0,78 \mu\text{m}$ e $0,38 \mu\text{m}$ – limitando-se a gama visual a uma relação entre as frequências limite, superior e inferior, de 2:1 (em Acústica, designa-se por oitava o intervalo definido por frequências que verifiquem esta relação).

No caso da audição, esta gama compreende várias oitavas. Apesar da natureza do estímulo ser diferente, o intervalo de frequências percebido pelos olhos sob a forma de cores (ondas electromagnéticas) é muito inferior ao percebido pelos ouvidos sob a forma de som (ondas mecânicas).

O ouvido é sensível a uma faixa de frequências de cerca de 10 oitavas e distingue cerca de 3 a 4 mil tonalidades diferentes.

A gama de intensidades de som que o ouvido pode distinguir é extremamente elevada. O limiar de audição estabelecido para o ouvido “normal” corresponde a uma variação de pressão de 2×10^{-5} Pa, o que equivale a uma intensidade sonora da ordem de 1 pW m^{-2} e a uma amplitude de oscilação da membrana do tímpano de 10^{-11} m (cerca de um décimo do diâmetro da molécula de oxigénio); isto para uma frequência de 1 kHz.

Medições realizadas nesta região do espectro demonstram que as variações de pressão devidas à agitação térmica das moléculas do oxigénio do ar são quase iguais às variações correspondentes ao limiar de audibilidade. Este facto permite indiciar que um ligeiro aumento na sensibilidade auditiva faria com que o sistema auditivo ouvisse um ruído característico da agitação térmica das moléculas do oxigénio no ar.

Há até quem diga que o ouvido humano é sensível ao ruído molecular mas que não o percebe devido ao ruído ambiente.

O limite superior de audição, expresso em termos de nível³, de acordo com dados estatísticos referentes a estudos desenvolvidos sobre a percepção do ouvido “normal” a estímulos sonoros, é de 130 dB (referência: 2×10^{-5} Pa) sendo estabelecido como a pressão diferencial máxima que o tímpano pode suportar sem que ocorram lesões físicas permanentes.

Este limite corresponde, *grosso modo*, a uma pressão sonora de 100 Pa e a uma relação entre as intensidades sonoras, máxima e mínima, também de 130 dB (isto é 10^{13} vezes o valor da intensidade de referência, a qual é identificativa do limiar de audição).

Além disto, a análise harmónica que o sistema auditor (ouvido) executa é tão perfeita e rápida que permite distinguir milhares de sons diferentes e caracterizar cada um deles com uma precisão impressionante, podendo distinguir-se com facilidade o estado emocional de uma pessoa pela forma como pronuncia algumas palavras.

É por tudo isto que o estudo do som, nas suas múltiplas vertentes e consagrado na disciplina de Acústica, assume uma importância cada vez maior nos dias de hoje, e que a perda de audição não pode, em qualquer circunstância, ser encarada como um acontecimento de somenos importância, quando comparada com a perda de visão.

As preocupações sociais respeitantes à qualidade do meio ambiente, entendido, no seu sentido mais abrangente, como a realidade que envolve

3 Os valores das grandezas sonoras são expressas em termos dos seus níveis relativamente a um valor de referência e não nas unidades correspondentes às suas fórmulas dimensionais. A razão para este facto reside na constatação de que a escala logarítmica é a que permite traduzir de forma mais realista o poder resolvente do ouvido humano. Por outro lado, o facto de ser possível, com o recurso à utilização desta escala, compactar a elevada extensão da escala linear expressa em termos de pressões, torna o recurso a este género de representação mais adequado.

os indivíduos, têm sido objecto de um crescimento muito acentuado. A consciencialização das sociedades para a preservação da qualidade do seu “habitat” aprofunda-se, alastra-se e generaliza-se de tal forma que as preocupações emergentes deixaram já de ser só privilégio das classes sociais mais informadas, passando também a ser assunto de interesse para o cidadão comum.

Entre as componentes que podem constituir a análise integrada do meio ambiente, o ruído começa a ser considerado, hoje em dia, como algo muito importante para o bem estar físico e psíquico dos indivíduos.

A elevação dos valores dos níveis sonoros, especialmente nos meios urbanos e suburbanos, com todas as consequências negativas para a saúde, tem dado origem ao desenvolvimento de acções de avaliação e correcção, por parte de várias entidades (públicas e privadas) envolvidas na problemática do meio ambiente.

À parte a necessidade de avaliação da exposição de trabalhadores ao ruído em locais de trabalho com o fim de quantificar possíveis riscos para a sua saúde, é, por norma, no interior dos edifícios que a componente ambiental relativa ao ruído assume um carácter mais importante.

As exigências essenciais a considerar no âmbito da qualidade acústica dos edifícios prendem-se fundamentalmente com os seguintes aspectos: integração urbanísticas; isolamento sonoro a sons aéreos; isolamento sonoro a sons de percussão; ruído de equipamentos e de instalações; e qualidade acústica de espaços fechados.

Neste contexto, afigura-se, assim, de interesse proporcionar, relativamente aos princípios em causa, um apoio técnico-científico que facilite a apreensão de todos os conceitos envolvidos, e que contribua para a sua compreensão, tanto de forma individualizada como inter-relacionada.

É este o objectivo principal deste livro, o qual tem por intenção fornecer ferramentas e elementos considerados fundamentais para o estabelecimento de condições adequadas de usufruto de conforto ambiental nos edifícios, tanto na fase de projecto como na de verificação de conformidade com legislação aplicável ou com objectivos programáticos pertinentes.

NOÇÕES GERAIS

1.1 Introdução

A título introdutório e com a finalidade de conferir, a quem se encontre menos familiarizado com a acústica, uma integração e compreensão mais facilitada das matérias abordadas ao longo da presente publicação, apresentam-se algumas noções gerais, de índole teórica, consideradas essenciais para uma melhor apreensão dos aspectos técnicos e científicos relacionados com a área temática em questão.

As noções físicas e teóricas complementares, que sejam, consideradas necessárias são sempre apresentadas nos capítulos respectivos.

Optou-se por algum sintetismo nos conceitos expostos, sem descurar, obviamente, as necessidades decorrentes do objectivo desta apresentação, dado entender-se que, para além da complexidade de cada conceito, importa fundamentalmente referenciar as bases para a compreensão do texto apresentado.

A Acústica é a ciência que estuda o som, a sua propagação tanto em meio fluido como sólido, e as suas inter-relações com o ser humano numa perspectiva de efeitos causados, tenham eles carácter de agradabilidade (música, voz) ou não (ruído).

O som sempre fez parte da vida quotidiana. Todavia, nas sociedades modernas, grande parte do som é entendido desagradavelmente pelo auditor, ou seja como incomodativo e sem conteúdo informativo, sendo definido nesta circunstância como ruído. Por esta evidência se constata que o ruído, como “subconjunto” do som, não depende somente das suas características físicas (amplitude, frequência e duração) mas também da atitude que o ser humano tem relativamente à sua percepção.

1.2 Exposição ao ruído e perdas auditivas

O ouvido é um mecanismo complexo e muito delicado, e conseqüentemente bastante frágil, conforme se ilustra na Figura 1.1.

Quando uma parte do ouvido perde a sua funcionalidade há uma degradação da audição. As perdas auditivas podem ser de condução ou neuro-sensoriais, dependendo tal facto da parte do ouvido em que ocorreu a lesão.

Uma perda auditiva de condução é causada por uma obstrução mecânica à transmissão do som entre o ouvido externo e o ouvido médio. Uma perda auditiva neuro-sensorial é originada por um problema no ouvido interno, normalmente nas células ciliadas da cóclea, mas também no nervo auditivo que faz a ligação ao cérebro.

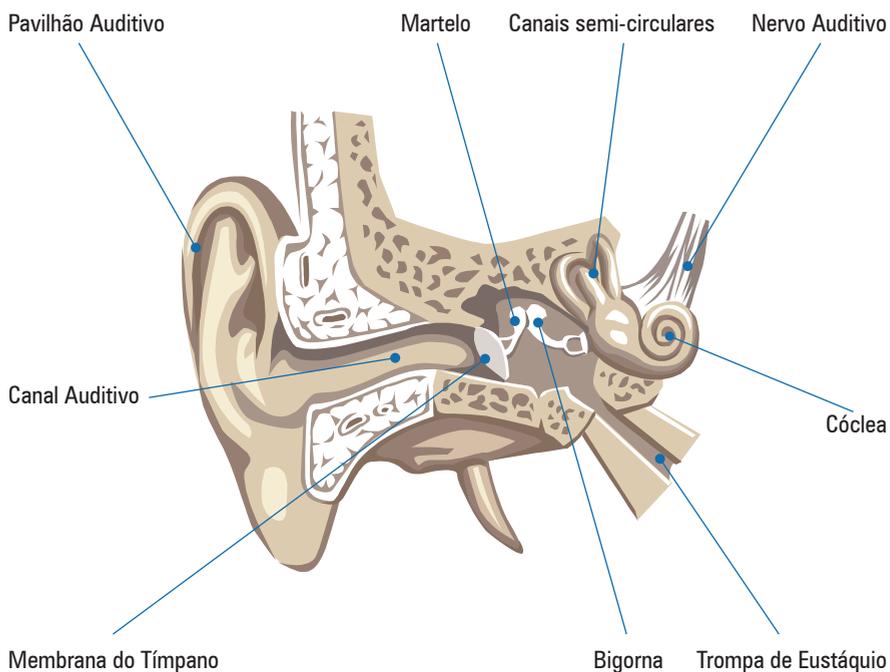


Figura 1.1

Ilustração do ouvido, em corte, com representação dos vários componentes internos

Por vezes, podem ocorrer os dois tipos de perdas auditivas em simultâneo, agravando significativamente a capacidade perceptiva do ser humano.

A maioria das perdas auditivas neuro-sensoriais provêm de problemas nas células ciliadas da cóclea.

As perdas auditivas podem variar desde aquelas consideradas ligeiras até às correspondentes à surdez total. O padrão das perdas de audição pode apresentar diversas características como, por exemplo, com maiores perdas nas frequências¹ altas, e menores nas baixas, ou perdas constantes ao longo da frequência.

Na origem das perdas auditivas podem estar diversas causas, apresentando algumas um padrão típico, como sejam as derivadas da exposição a níveis elevados de ruído, por exemplo, os casos de ruído laboral.

Na Figura 1.2 apresentam-se as evoluções genéricas das perdas auditivas associadas à exposição a níveis sonoros elevados (traço cheio); o traço interrompido corresponde à perda natural.

Cumulativamente, na Figura 1.3. ilustram-se as perdas auditivas com a idade.

¹ A frequência é definida como o número de vezes que um fenómeno periódico se repete na unidade de tempo. É representada por f e expressa-se em Hz, ou ciclos por segundo.

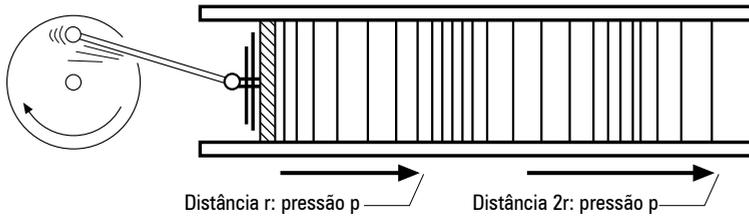


Figura 1.6
Ilustração esquemática de um modelo de onda plana

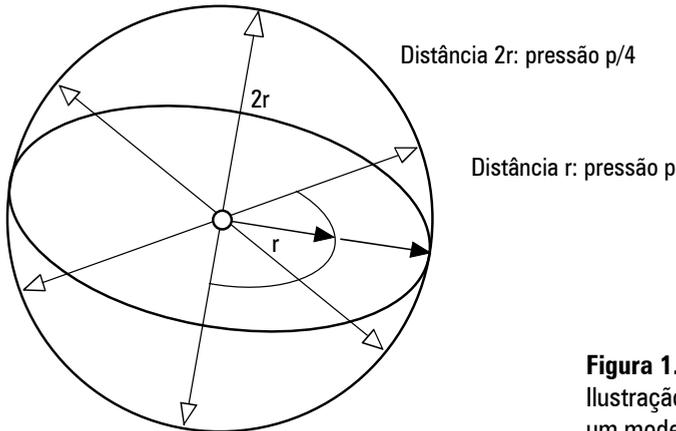


Figura 1.7
Ilustração esquemática de um modelo de onda esférica

1.5 Propagação em meios dissipativos

Com base nas soluções da equação de propagação e sabendo-se que para ondas planas a intensidade sonora no ponto x – fluxo de energia sonora por unidade de superfície – é dada por:

$$I(x) = \frac{P_{ef.(x)}^2}{\rho_0 c} \quad (1.6)$$

verifica-se que, na ausência de qualquer dissipação de energia, a intensidade sonora se mantém constante para ondas planas e decresce segundo o factor $1/r^2$ para ondas esféricas (vd. Figuras 1.6 e 1.7).

Quando se consideram as condições reais de propagação da energia, ocorrem, obviamente, desvios relativamente à propagação em meio homogéneo, os quais se traduzem em processos de dissipação da energia sonora, derivados, no que respeita ao ar, fundamentalmente de:

- Viscosidade do meio (desprezada na modelação usual), mas que é de importância significativa no domínio das frequências altas;
- Condução calorífica, dado que a condição de adiabaticidade não tem correspondência efectiva nas condições de propagação reais;
- Absorção molecular devido a fenómenos de relaxação (fundamentalmente

medir o nível de pressão sonora em bandas diferentes ou os valores de parâmetros descritores, têm que efectuar-se medições independentes – as quais ocorrem, obviamente, num outro período de propagação do sinal –, o que poderá, para ruídos não estacionários, traduzir-se na obtenção de informação diferente consoante a altura da medição.

Relativamente aos analisadores que normalmente se comercializam, estes não são mais do que sonómetros, com configuração física diferente, e, muitas vezes, com mais do que um canal de aquisição de dados, ou mesmo com alguma programação de carácter informático integrada.

De acordo com a normalização em vigor encontram-se estabelecidas várias classes de exactidão para os sonómetros, respectivamente:

Classe 0: correspondente aos padrões de laboratório;

Classe 1: para utilização em laboratório e *in situ* quando o ambiente acústico se encontra controlado;

Classe 2: apenas para medições *in situ*; e

Classe 3: correspondente a um equipamento com muito baixa exactidão.

Na Figura 1.18 apresenta-se uma imagem fotográfica de um analisador de ruído.

Por último refere-se que se encontra disponível, também no mercado, equipamento para medições, na área de acústica de edifícios, recorrendo à técnica de intensimetria sonora.

Este tipo de equipamento não é de muito fácil aplicação no domínio em causa (edifícios), sendo, neste caso, mais dirigido à medição da potência sonora de equipamentos, na medida em que necessita da criação de um campo sonoro semi-infinito para que possa ser correctamente utilizado.



Figura 1.18
Fotografia de um sonómetro (analisador de ruído)

estabelecer-se níveis sonoros relativamente invariáveis em determinadas alturas do dia, destacando-se, apenas, deste nível mais ou menos constante, alguns picos devidos a tipos particulares de veículos: motorizadas e camiões. Esta situação é razoavelmente sentida nas horas de ponta (manhã ou tarde) em algumas vias de circulação.

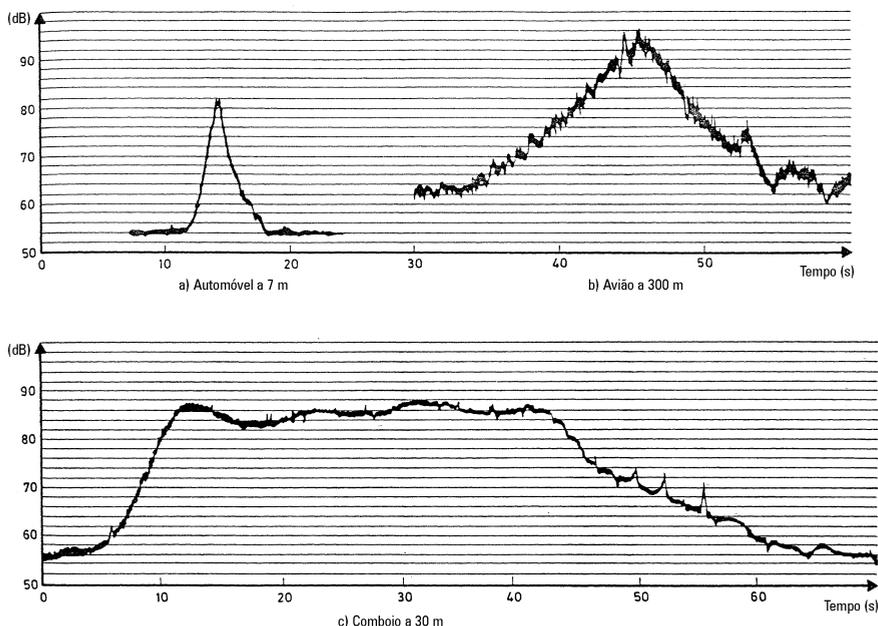


Figura 2.1

Séries cronológicas do nível de ruído associado às fontes sonoras ilustrativas dos diferentes tipos de tráfego

Na Figura 2.2, ilustra-se a evolução do nível de emissão sonora, no domínio da frequência, de veículos ligeiros e pesados.

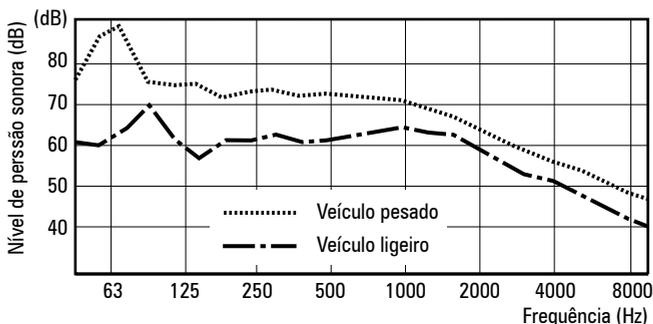


Figura 2.2

Evolução espectral, típica, de ruído de tráfego de veículos ligeiros e pesados [11]

Ainda em relação ao tráfego rodoviário, e visando a análise da distribuição dos níveis de pressão sonora instantâneos ao longo do tempo, é aceitável

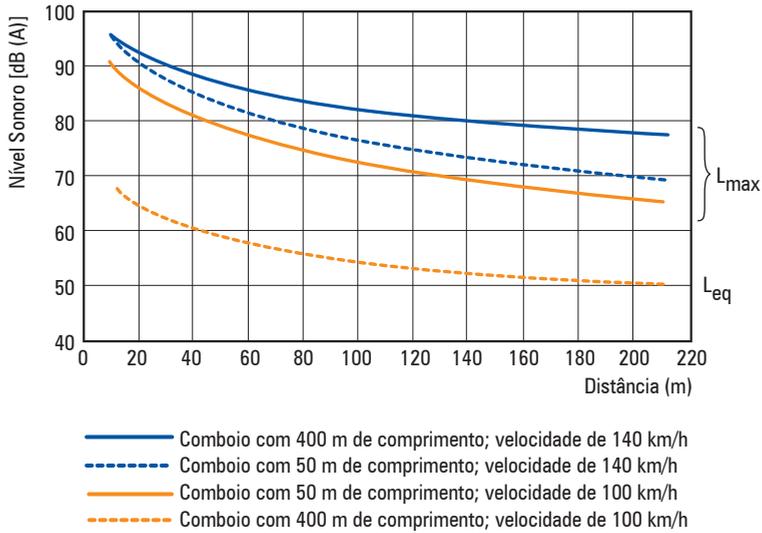


Figura 2.7

Ruído produzido pela circulação de comboios, para várias distâncias ao eixo da via [11]

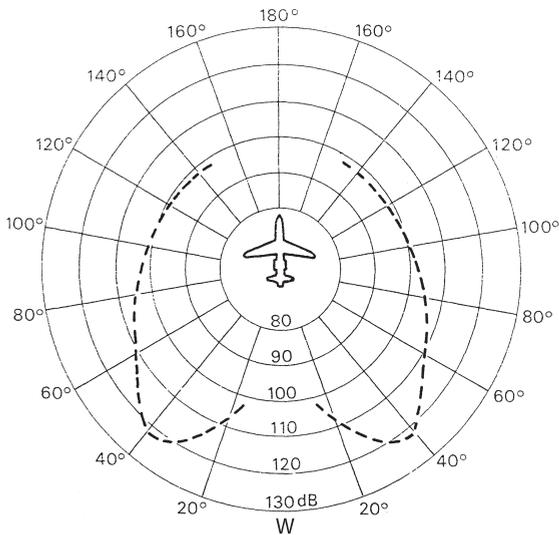


Figura 2.8

Padrão de direccionalidade típico de um avião

Logo que a aeronave descola as condições de propagação tornam-se mais favoráveis dado não existirem obstáculos entre a zona de emissão e o ponto de recepção. Neste sentido, a incomodidade gerada é muito acentuada nas vizinhanças dos aeroportos ou sob determinadas trajectórias de voo.

O ruído associado à passagem de uma aeronave ilustra-se na Figura 2.9.

- quando for tido em consideração os raios difractados sempre que os pontos **E** e **O** não estejam contidos no plano normal à barreira; e
- quando se considerar, para barreiras finitas, a propagação que ocorre pelas extremidades.

O método de Redfearn (Figura 2.12) é também bastante conhecido mas tem o inconveniente de ter sido estudado para uma barreira de comprimento teoricamente infinito. Os parâmetros respectivos são de uso fácil. Todavia, os resultados obtidos não são normalmente tão fidedignos.

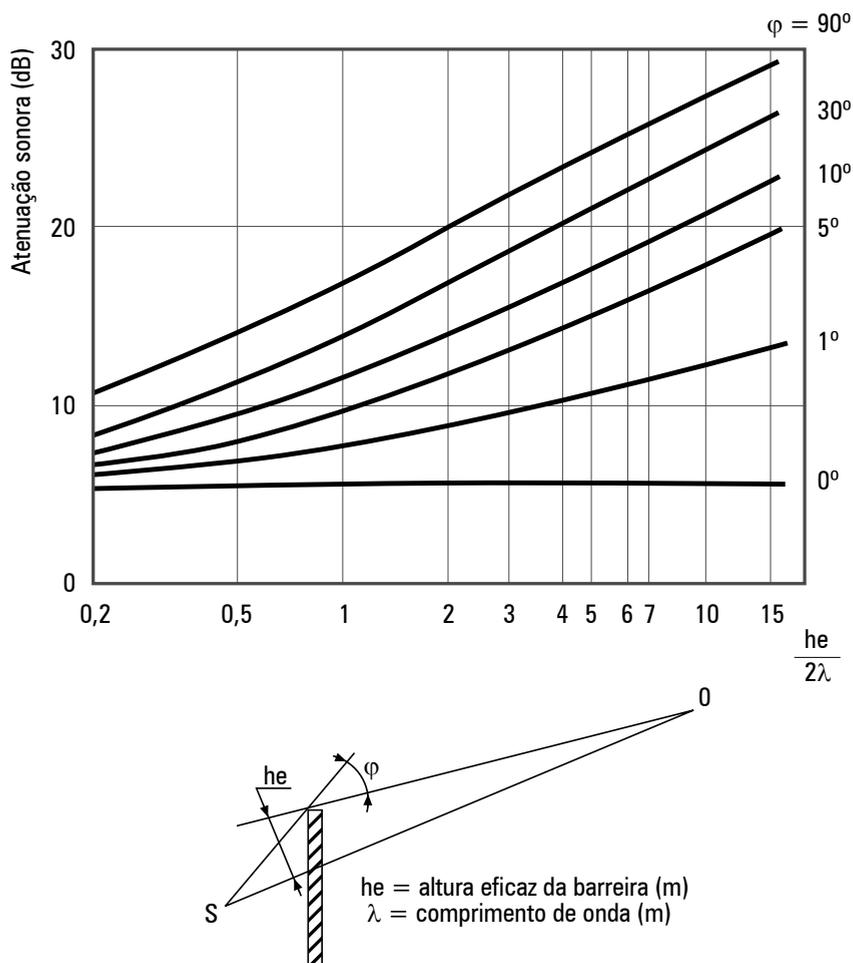


Figura 2.12
Ábaco de Redfearn

Numa linha simplifcativa foi desenvolvido pelo CSTB um ábaco de síntese (Figura 2.13), que aplicável a fontes lineares (por exemplo, tráfego rodoviário em fluxo contínuo) ou pontuais (fonte sonora individual fixa ou móvel), pode ser também utilizado para um prognóstico prévio.

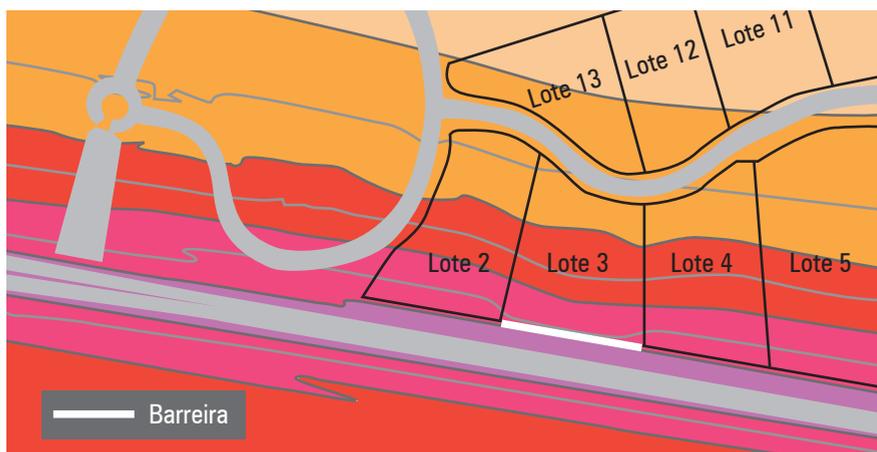


Figura 2.21
Mapa de ruído (exemplo)

Numa perspectiva de harmonização de procedimentos e critérios de elaboração de mapas de ruído, transcreve-se o sentido de algumas linhas de orientação da Agência Portuguesa do Ambiente (APA) sobre esta matéria.

1.º Fontes sonoras

Nos mapas de ruído, elaborados a escalas compatíveis com Planos Directores Municipais e / ou com Planos de Urbanização, devem ser consideradas, pelo menos, as seguintes fontes sonoras:

- Grandes eixos de circulação rodoviária, incluindo os itinerários principais da rede fundamental e os itinerários complementares e todas as rodovias onde o Tráfego Médio Diário Anual (TMDA) ultrapasse 8 000 veículos;
- Os grandes eixos de circulação ferroviária, incluindo as linhas da rede principal e complementar, o metropolitano de superfície e todas as ferrovias com 30 000 ou mais passagens de comboio por ano;
- Os aeroportos e os aeródromos;
- As actividades ruidosas abrangidas pela avaliação de impacte ambiental.

2.º Requisitos nos mapas

Nos mapas de ruído, a representação gráfica deverá ser feita de acordo com metodologia harmonizada.

A escala a considerar não deve ser inferior a:

- 1:25 000, para articulação com os PDMs;
- 1:5 000 para articulação com os PUs / PPs;
- 1:10 000 para mapas estratégicos de aglomerações e de grandes infra-estruturas de tráfego.

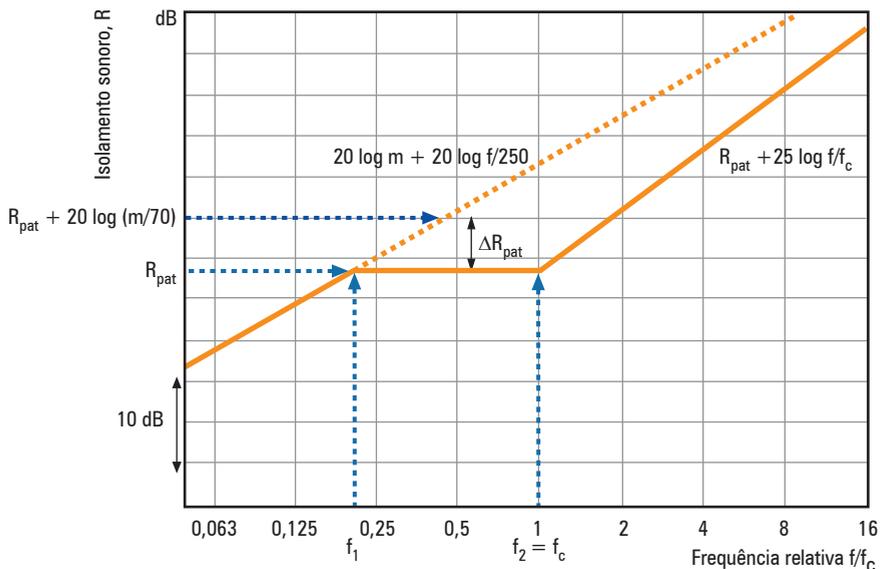


Figura 3.6

Redução da transmissão sonora de elementos de compartimentação homogêneos, simples, em função da frequência [07]

Nesta figura podem denotar-se três especificidades de comportamento:

- Uma primeira zona crescente, à taxa de 6 dB/oct.;
- Um patamar que é incrementado de ΔR_{pat} para elementos com massa superficial superior a 70 kg/m^2 (normal na construção portuguesa), devendo-se, neste caso, seguir-se a configuração da evolução gráfica a ele associada;
- Uma terceira zona, também crescente, à taxa de 7,5 dB/oct..

Para efeitos de “construção” da curva de perdas de transmissão seguindo o modelo da Figura 2.4, deve-se:

- Definir o material constituinte do elemento em causa e calcular a respetiva frequência crítica;
- Obter o valor da frequência auxiliar f_1 : no caso dos materiais correntes utilizados na compartimentação de edifícios, exceptuando as divisórias leves e heterogêneas, pode-se, de acordo com [8], adoptar para a relação f_2/f_1 o valor médio de 5.
- No gráfico, entre f_1 e f_2 é desenhada uma linha horizontal com isolamento sonoro dado por R_{pat} (sendo os valores de R_{pat} iguais a: madeira – 24 dB; betão celular – 26 dB; vidro e betão leve – 27 dB; alumínio, tijolo e argamassa de cimento – 28 dB; betão corrente – 29 dB; e aço 38 dB;
- Para bandas de frequências inferiores a f_1 desenhar-se-á a curva de perdas de transmissão utilizando a expressão $20 \log(m) + 20 \log(f/250)$, e para bandas superiores a f_2 a expressão $R_{\text{pat}} + 25 \log(f/f_c)$.

3.6 Aspectos complementares

3.6.1 Influência do efeito de coincidência

Um aspecto que importa ter em atenção no processo de estimação relaciona-se com o comportamento dos sistemas por efeito do fenómeno de coincidência.

Apesar de já se ter feito referência a este aspecto, importa clarificar melhor, no contexto presente, a sua importância. Este fenómeno ocorre quando a configuração de deformação de um painel devido à propagação de ondas de flexão em regime livre coincide com a da vibração estabelecida nesse mesmo painel por incidência de determinada onda sonora.

A frequência de coincidência, para determinado ângulo de incidência ϕ , é aquela para a qual o número de onda¹⁰ associado à propagação do som no ar iguala o número de onda relativo à propagação das ondas de flexão no elemento sólido onde se processa a incidência das ondas sonoras, correspondendo a esta situação a igualdade entre os comprimentos da onda de flexão no meio sólido, λ_f , e a projecção do da onda sonora, λ , no plano que contém esse meio sólido, conforme permite ilustrar a Figura 3.12.

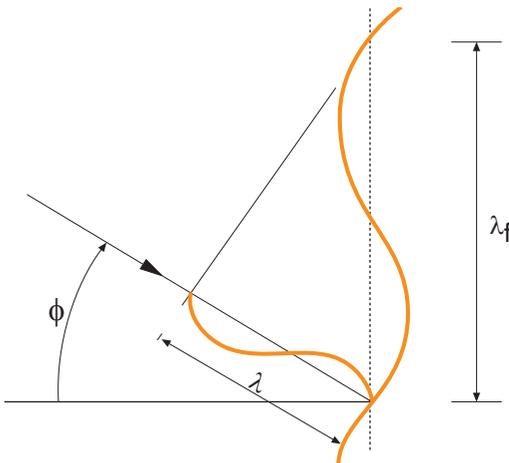


Figura 3.12
Ilustração do conceito de frequência de coincidência

Sendo c a velocidade de propagação do som no ar e ϕ o ângulo de incidência das ondas sonoras, a coincidência estabelece-se quando a velocidade de propagação das ondas de flexão no painel, c_f , for:

$$c_f = \frac{c}{\text{sen } \phi} \quad (3.13)$$

Como se verifica, para cada ângulo de incidência existe uma frequência

¹⁰ O número de onda, k , é dado pela seguinte relação: $k = 2\pi/\lambda$, sendo λ o comprimento de onda da propagação.

Para o efeito, sobrepõe-se esta descrição convencional ao diagrama dos valores do nível de pressão sonora medidos no compartimento receptor, por forma a que seja satisfeita a condição seguinte: o valor médio do desvio em sentido desfavorável (conforme se ilustra na Figura 4.3) calculado por divisão da soma dos desvios nesse mesmo sentido (desfavorável) pelo número total de bandas de frequências, consideradas no processo de medição, deve ser o mais elevado possível, todavia sem ultrapassar o valor de 2 dB.

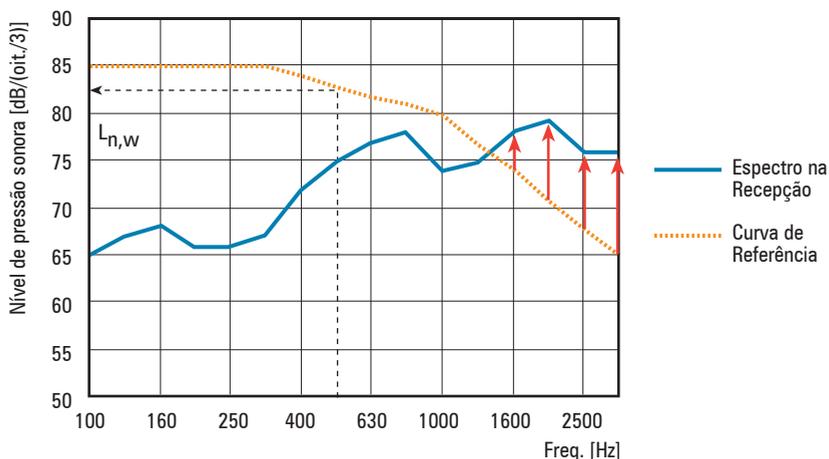


Figura 4.3

Desvios desfavoráveis num processo de medição de sons de percussão em laboratório (no caso: $L_{n,w} = 83$ dB)

Refere-se que a normalização em vigor aponta para a utilização de diagramas de radiação de energia sonora obtidos a partir de medições realizadas por bandas de frequências com a largura de 1/3 de oitava.

Após a consecução deste ajustamento, o índice de isolamento sonoro corresponde ao valor da ordenada da descrição convencional de referência para a frequência de 500 Hz, sendo expresso simplesmente em dB.

Para efeitos de implementação deste processo iterativo em sistema informático, refere-se que os valores da curva de referência no domínio das bandas de frequências de interesse são os que se apresentam na tabela seguinte:

Freq.	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
Ref.	62	62	62	62	62	62	61	60	59	58	57	54	51	48	45	42

Este método tem aplicação generalizada na maior parte dos países europeus⁴. Possibilita, assim, a efectivação de comparações de resultados

⁴ Por exemplo, nos Estados Unidos é utilizado um índice diferente designado por IIC “Impact Insulation Class”, cuja metodologia de cálculo não segue a linha exposta.

O tempo de reverberação adequado para determinado local não deverá ser muito elevado, ou seja a absorção sonora desse local não deve ser demasiado reduzida. Na Figura 5.7 apresentam-se os valores do tempo de reverberação aconselhado para espaços de utilização específicas, em função do volume do recinto respectivo, para a banda de frequências de 500 Hz⁴ [02].

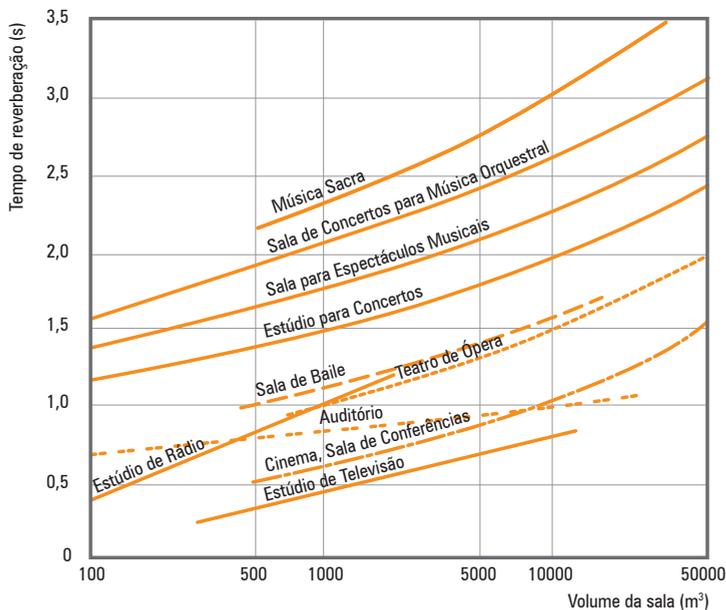


Figura 5.7

Tempos de reverberação aconselhados em função do volume do recinto (para $f = 500$ Hz)

Nas situações em que tenha que haver transmissão de mensagens de voz (por exemplo, salas de aula específicas e auditórios), deve assegurar-se que se estabeleçam boas condições de clareza e inteligibilidade (conceitos a definir mais adiante), caso contrário o auditor terá de fazer um esforço de atenção suplementar para entender a mensagem transmitida. A clareza e a inteligibilidade serão ainda piores se o nível de emissão sonora for elevado e o “débito” de informação muito rápido.

De modo análogo, se o tempo de reverberação for muito baixo, ou seja se a absorção sonora do local for muito elevada, um potencial “orador” encontra-se nas condições de campo livre, tendo que reforçar a sua potência de emissão de voz para se fazer compreender melhor, criando-se com esta situação algum cansaço. Do ponto de vista do auditor, um recinto deste género será apercebido como um espaço “seco”.

Para um dado recinto fechado pode medir-se o tempo de reverberação

4 Os valores de T_r para as bandas de 1 kHz e 2 kHz podem ser considerados iguais ao da banda de 500 Hz. Nas situações correntes, os referentes às bandas de 125 Hz e 250 Hz obtêm-se multiplicando também o da banda de 500 Hz, respectivamente por 1,14 e 1,48.

Os conceitos expostos são instrumentos fundamentais para o projecto de correcção acústica de espaços e para a criação de condições de conforto adequadas no exercício de actividades de divertimento, lazer, ou de trabalho, como sejam, por exemplo, as unidades oficinais ilustradas na figura 5.20.

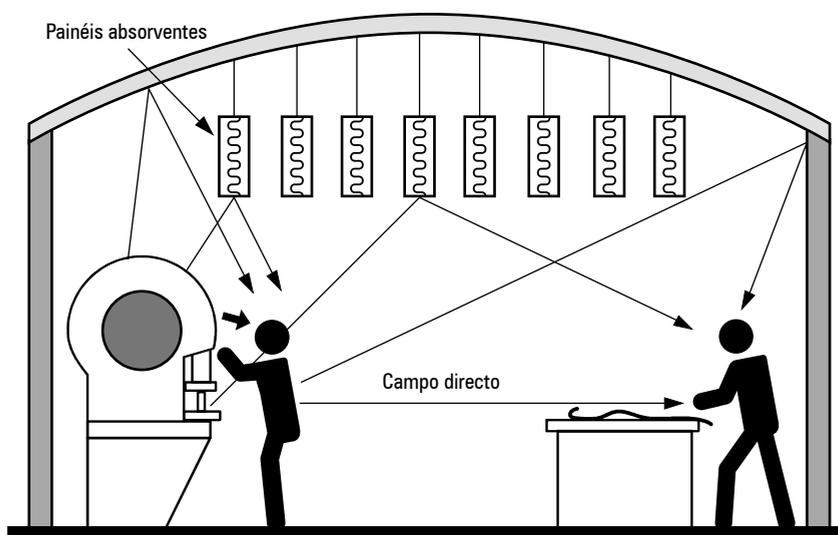


Figura 5.20
Instalação oficinais onde o tratamento acústico é fundamental [02]

5.5 Difusão

Em muitas situações relacionadas com a qualidade acústica de salas (por exemplo em salas de concertos) é necessário que a absorção sonora proporcionada pelos elementos da envolvente não reduza demasiado a energia sonora estabelecida e não torne o campo heterogéneo do ponto de vista de distribuição dessa mesma energia, ou seja, não criando condições para uma boa acústica da sala. Nesse sentido, para garantir essa boa acústica é necessário recorrer ao conceito de difusão (ou reflexão difusa), de modo a que o campo sonoro criado seja envolvente e que a energia do campo reverberante chegue aos receptores, provindo com igual probabilidade de todas as direcções existentes no espaço fechado.

Na Figura 5.21 ilustra-se o conceito de difusão, ou reflexão difusa, comparativamente com o da reflexão tradicional (reflexão especular). Como se pode denotar a reflexão especular segue a Lei de Snell (o ângulo de incidência é numericamente igual ao ângulo de reflexão). No caso da reflexão difusa, esta lei não é aplicável, porquanto a onda incidente numa superfície é reflectida em várias direcções (difusão espacial), chegando ao receptor espaçadas no tempo (difusão temporal).

No que respeita ao valor do ruído ambiente residual $L_{Aeq(r,r)}$ e como estes problemas de incomodidade ocorrem com maior probabilidade durante o período de descanso nocturno, pode, em primeira estimativa, tomar-se para uma zona mista, e como máximo admissível para não causar perturbações de sono, $L_{Aeq(r,r)}$ situado entre 27 a 29 dB(A).

No entanto, será mais aconselhável que, com base nos valores constantes na mapificação do ruído ambiente para a zona e subtraindo-se o isolamento sonoro da fachada da habitação potencialmente incomodada, se determine o valor real do ruído residual estabelecido na fracção habitacional.

Caso estas actividades já decorram e seja necessário efectuar verificação de conformidade regulamentar (avaliação de situação de incomodidade para moradores vizinhos) deve ser desencadeado o respectivo processo de medição. Relativamente às componentes tonais e impulsivas, eventualmente detectadas, deve ter-se em atenção que, caso elas “existam”, numa mesma banda de frequências, tanto para o ruído ambiente como residual, não devem ser, no caso, consideradas.

Cumulativamente ao exposto e no que respeita ao ruído de equipamentos de ar condicionado, pode utilizar-se também como critério de projecto da sua instalação, nomeadamente em estabelecimentos de ensino, auditórios, bibliotecas ou locais similares etc., um outro tipo de indicador, designado por NC – “Noise Comfort”. A determinação deste indicador é feita com base no nomograma da Figura 6.2.

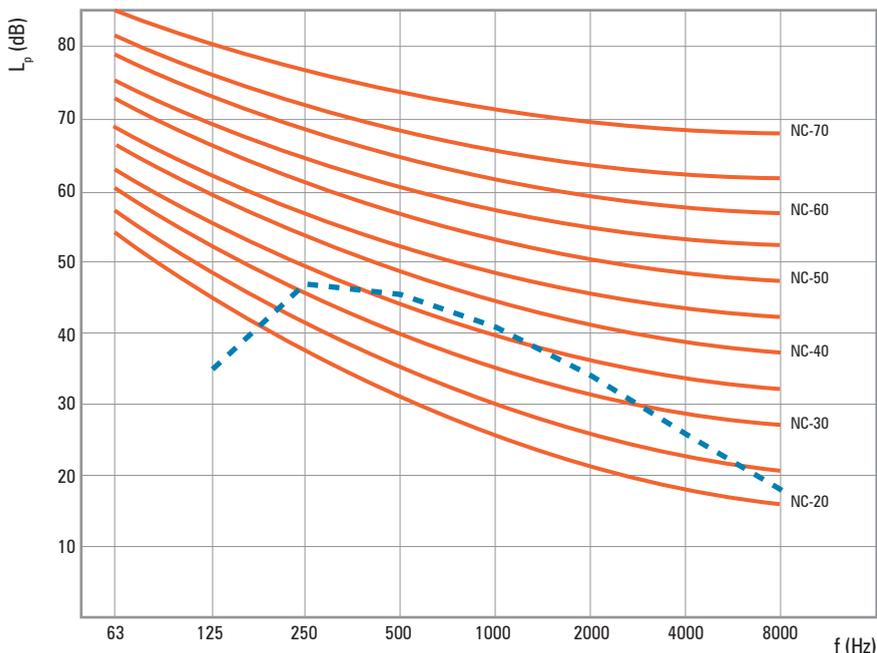
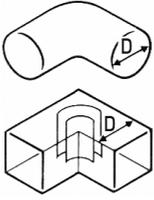


Figura 6.2
Curvas para determinação do parâmetro NC [11]

Quadro 6.7

Atenuação sonora em curvas (secções circulares ou rectangulares com pás variáveis) [dB/oit]

	Largura da conduta D (mm)	Frequência central da banda de oitava (Hz)							
		63	125	250	500	1k	2k	4k	Hz
	150 – 250	-	-	-	-	1	2	3	dB
	250 – 500	-	-	-	1	2	3	3	
	500 – 1000	-	-	1	2	3	3	3	
	1000 – 2000	-	1	2	3	3	3	3	

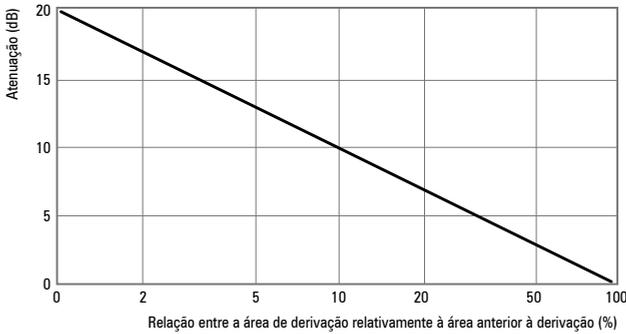


Figura 6.4

Atenuação sonora devida a derivações de circuito [dB]

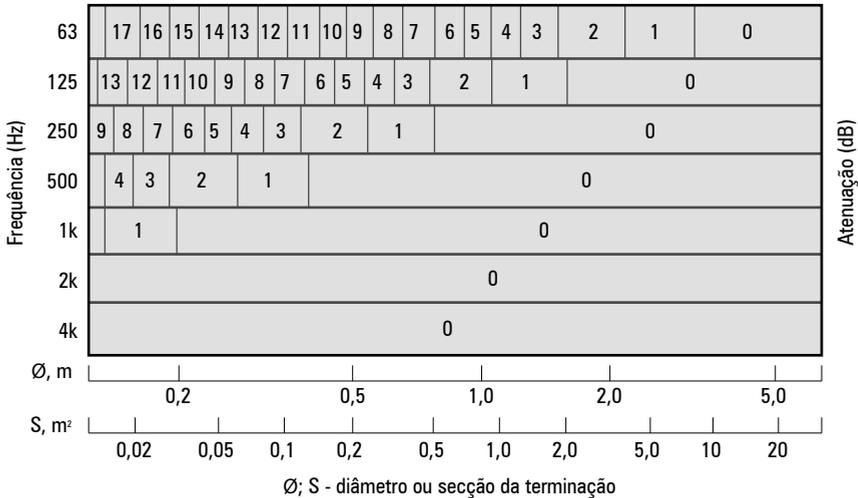


Figura 6.5

Atenuação sonora devida a reflexão terminal [dB/oit]

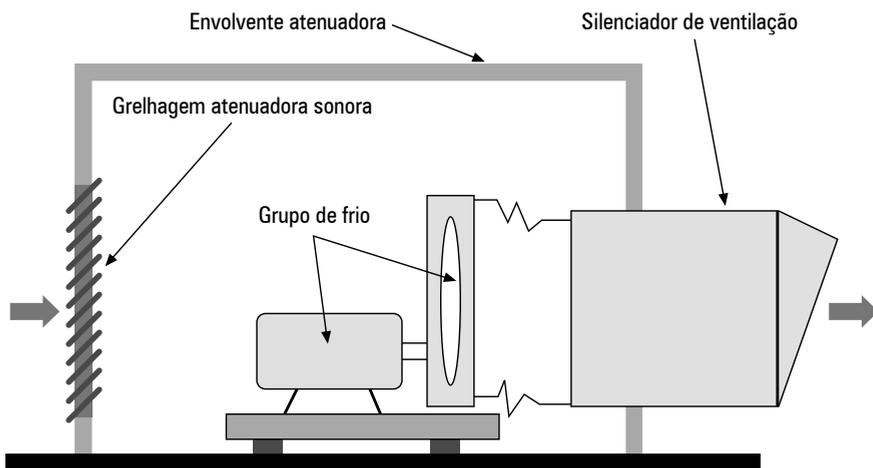


Figura 6.9
Esquema tipo de envolvente atenuadora para grupo de frio

6.4 Linhas orientativas para uma aplicação prática

Exemplo

Para cálculo do nível sonoro associado a um ventilador deve-se primeiro considerar qual o tipo de ventilador em causa (insuflação ou extracção). Do mesmo modo, deve-se verificar se o seu funcionamento se apresenta equilibrado e se, na sua fixação (assentamento), está contemplada protecção anti-vibrática adequada (admite-se que a velocidade de circulação do ar nas condutas é baixa).

Á pergunta, como calcular o nível de avaliação sonora L_p , produzido por um ventilador de extracção (colocado no terraço de um edifício) no interior de um compartimento situado 3 pisos abaixo, deve-se:

- Identificar o valor do nível de potência sonora, L_w , do ventilador. Actualmente, é já comum os fabricantes disponibilizarem esta informação, indicando mesmo as parcelas do nível de potência sonora relativas à descarga, à admissão e à radiação da caixa do ventilador. Portanto, interessará o valor L_w relativo à admissão de ar (no caso de apenas se dispor do nível L_w global, poderá tomar-se este valor subtraído de 3 dB);
- Estimar a atenuação sonora introduzida pelas condutas até ao compartimento receptor. Para tal, pode-se consultar as tabelas dos Quadros 6.4 a 6.7, consoante a situação aplicável;
- Obter o nível de pressão sonora no compartimento receptor (*i.e.*, com o valor do tempo de reverberação de referência, $T_0 = 0,5$ s), com base

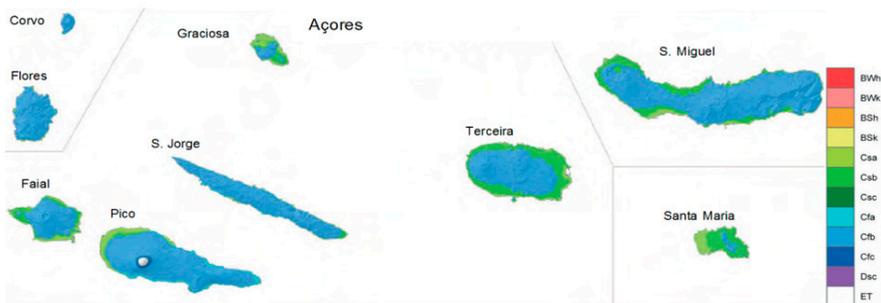


Figura 8.4

Classificação climática do Arquipélago dos Açores de acordo com a classificação KöppenGeiger (adaptado de: AEMET & IM-Portugal, 2011)

A temperatura média anual em Portugal continental varia de 12 °C no interior montanhoso a Norte a mais de 18 °C no Sul e na bacia do rio Guadiana (Figura 8.5). No inverno, a média da temperatura mínima varia entre 2 °C na zona interior montanhosa e 12 °C na zona Sul do Algarve (IPMA, 2014; Santos, Forbes & Moita, 2002).

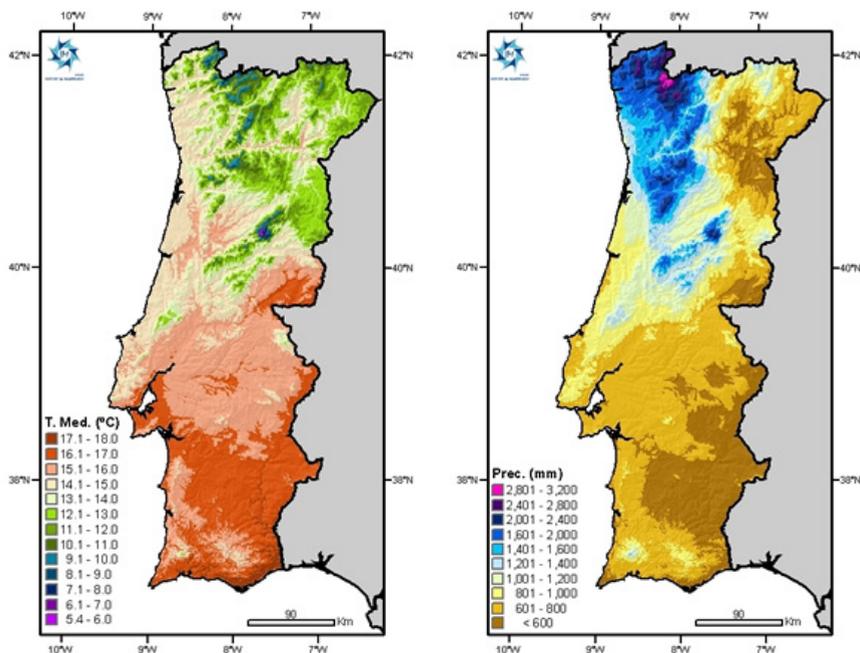


Figura 8.5

Temperatura média anual (esquerda) e precipitação acumulada anual (direita) baseada nas normais de 1961/90

(Fonte: www.ipma.pt/pt/educativa/tempo.clima/index.jsp?page=clima.pt.xml)

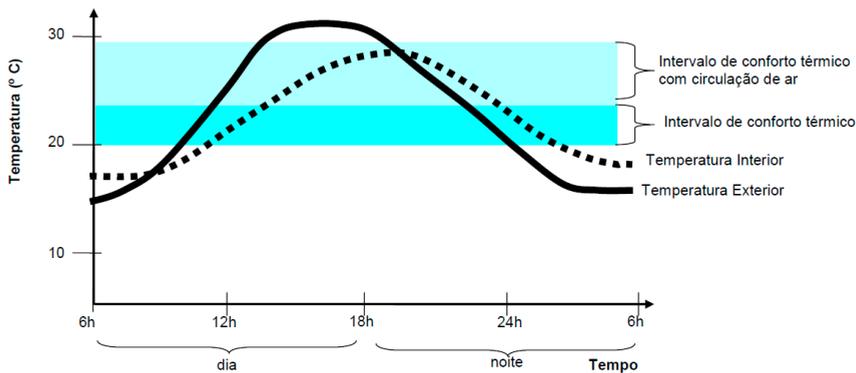


Figura 8.7

Gama de temperaturas de conforto na presença de ventilação natural

(adaptado de: Lambert, 2008)

Um edifício bem adaptado (curva A da Figura) tem bom isolamento, ganhos solares passivos (incluindo sistemas de sombreamento fixos e móveis e eficientes) e sistemas adaptativos. De verão, o edifício está protegido da radiação solar e possui sistemas de arrefecimento passivo. De inverno, utiliza os ganhos solares para aumentar a temperatura interior. O resultado é um edifício que, na maioria dos climas europeus, fornece conforto sem recurso a outra energia que não a do sol durante a maior parte do ano (Roulet, 2005). A energia usada para aquecimento é reduzida de forma substancial como resultado da estação de aquecimento mais curta. Não é necessário arrefecimento se as cargas internas se mantiverem dentro dos limites razoáveis (Roulet, 2005).

Os edifícios mal adaptados (curva B da Figura 8.8) irão necessitar de aquecimento de inverno e de arrefecimento de verão e são o motivo pelo qual existe a ideia de que são necessários consumos energéticos elevados para se obterem condições de conforto (Roulet, 2005).

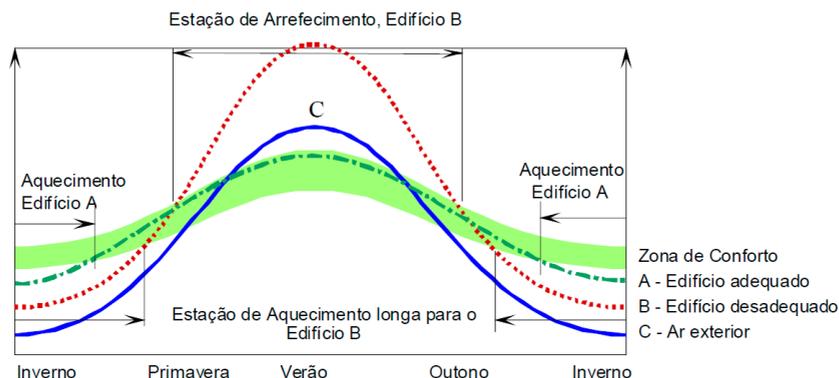


Figura 8.8

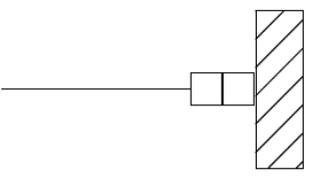
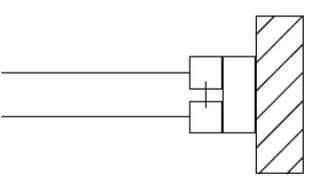
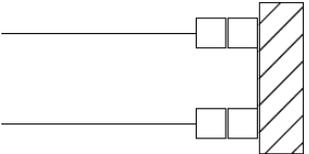
Evolução da temperatura num edifício passivo durante o ano (hemisfério norte)

(adaptado de: Roulet, 2005)

Quadro 8.2

Características da zona transparente dos envidraçados

(adaptado de: (LNEC, IHRU, InCI, ANACOM, & APA, 2014a, 2014b))

Tipo de Vão envidraçado	Descrição	R_w (dB)	U (W/m ² , °C)
	Vidro simples: 4 mm 8 mm 12 mm 15 mm 19 mm	30 32 37 39 39	$U_w = 4,9$ a $6,5$ $U_{wdn} = 3,8$ a $4,8$ (com proteção solar/noturna)
	Vidro duplo: 6 (10) 4 8 (12) 4 3 (15) 5 3 (13) 6 3 (25) 6 3 (50) 6	34 ≥ 35 33 37 39 42	$U_w = 3,3$ a $4,5$ $U_{wdn} = 2,7$ a $3,4$ (com proteção solar/noturna)
	Janela dupla	≥ 40	$U_w = 2,5$ a $3,1$ $U_{wdn} = 2,2$ a $2,6$ (com proteção solar/noturna)

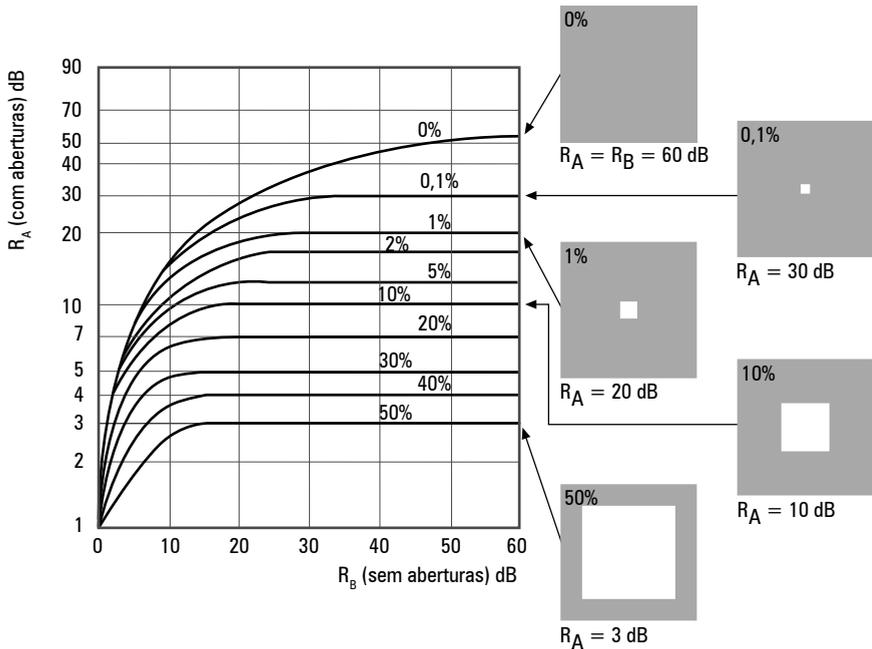


Figura 8.13
Isolamento sonoro / área de fachadas

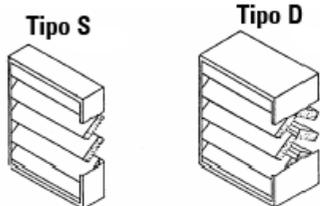
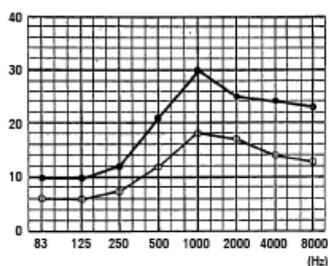
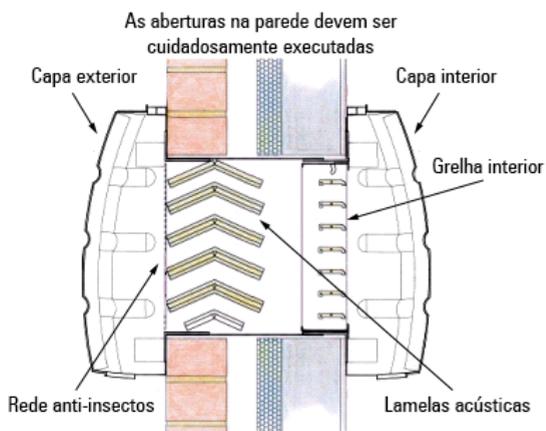
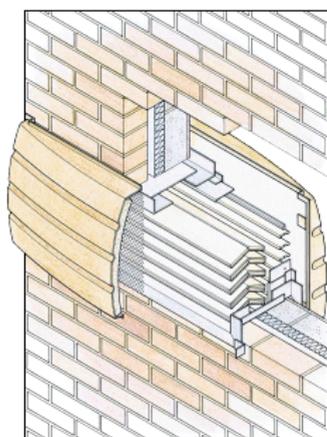


Figura 8.17

Solução de ventilação com isolamento acústico a colocar em paredes (no interior de lâminas das grelhas é colocado um material absorvente, por exemplo lâ mineral)

(Fonte: Renson – www.renson.be)



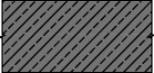
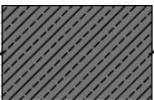
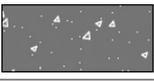
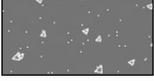
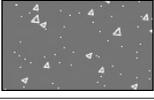
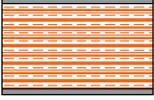
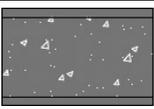
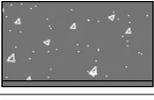
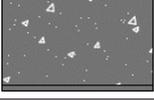
U	2,63 W/m ² .K
R _w	30 dB (para área de ventilação de 100 000 mm ² , segundo teste realizado de acordo com BS EN 20140-10:1992)

Figura 8.18

Ventilação com isolamento acústico a colocar em paredes

(Fonte: Aircool – www.passivent.com)

Quadro 8.3
Características das paredes de alvenaria de tijolo ou betão

Tipo de Parede	Descrição Área de envidraçado em relação à área da parede	Massa (kg/m ²)	U (W/m ² , °C)	R _w (dB)			
				15%	30%	50%	60%
	Granito com 60 cm de espessura	1404	2,60	43	40	37	37
	Granito com 1 m de espessura	2340	1,90	44	40	38	37
	Tijolo cerâmico maciço de 22 cm	410	2,19	44	40	38	37
	Tijolo cerâmico furado de 20 cm, rebocado numa face	250	1,41	43	40	38	37
	Tijolo cerâmico furado de 22 cm, rebocado numa face	330	1,41	43	40	38	37
	Betão armado com 15 cm	350	4,08	44	40	38	37
	Betão armado com 20 cm	470	3,70	44	40	38	37
	Betão armado com 25 cm	595	3,39	44	40	38	37
	Bloco de termoargila furado de 24 cm, estuque com 1,5 cm em ambas as faces	289	0,76	43	40	38	37
	Bloco de termoargila furado de 29 cm, estuque com 1,5 cm em ambas as faces	351	0,61	43	40	38	37
	Blocos de betão com leca com 20 cm, rebocada em ambas as faces (2,5 cm)	350	1,46	43	40	38	37
	Blocos de betão celular de 20 cm, rebocados numa face	145	1,08	42	39	37	37
	Blocos de betão celular de 25 cm, rebocados numa face	180	0,82	43	40	38	37

Os princípios físicos que fundamentam a diminuição da transmissão sonora desta solução, além de se basearem na “Lei da Massa” e na separação elástica das diferentes camadas, baseiam-se também na capacidade de absorção sonora que os materiais porosos e fibrosos possuem para diminuir o nível sonoro dentro da caixa-de-ar.

Normalmente, este tipo de solução é constituída por uma camada do tipo “pesada”, por exemplo, alvenaria de tijolo ou laje de betão, uma caixa-de-ar, parcial ou totalmente preenchida por um material com boa absorção sonora, por exemplo, lã de rocha ou lã de vidro, e uma camada do tipo “leve”, por exemplo de painéis de gesso cartonado ou painéis de aglomerado de madeira.

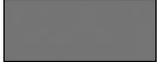
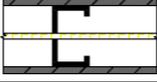
Sob o ponto de vista do isolamento térmico este tipo de solução é melhor do qualquer uma das anteriores, no entanto, o espaço adjacente ao painel leve não beneficia do contributo da massa do elemento de separação para a inércia térmica do espaço.

A título de exemplo apresentam-se nos Quadros 8.5 a 8.6 valores para o isolamento térmico e acústico de alguns tipos de parede.

Quadro 8.5

Isolamento acústico e térmico de paredes

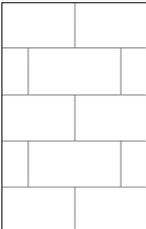
(Adaptado de: www.fermacell.co.uk/en/img/Floors_and_Ceilings_Performance_Details.pdf)

Tipo de Parede	Descrição	R_w (dB)	U (W/m ² , °C)
	Placa de gesso cartonado (12,5 mm) em cada lado de um perfil metálico (espessura total 75 mm)	35	0,41
	Bloco de 75 mm (baixa densidade 52 kg/m ² rebocado (12 mm) em um lado)	35	1,87
	Placa de gesso cartonado (12,5 m) em cada lado de um perfil metálico de 48 mm com fibra de vidro / lã mineral no interior (espessura total 75 mm)	40	0,66
	Blocos de gesso de 100 mm (baixa densidade, 70 kg/m ² de face à vista)	40	1,62
	2 Placas de gesso cartonado (12,5 mm) em cada lado de um perfil metálico de 70 mm (espessura total 122 mm)	45	0,29
	Tijolo face à vista 122 mm (não rebocado)	45	2,42
	Bloco de 100 mm (média densidade, 140 Kg/m ² rebocado (2 mm) em ambas as faces)	45	2,43

Quadro 8.6

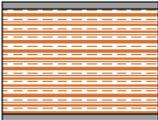
Isolamento acústico e térmico de alguns tipos de paredes (cont.)

(adaptado de: (LNEC et al., 2014a, 2014b))

Tipo de Parede	Descrição	R_w (dB)	U (W/m ² , °C)
	Parede divisória de aglomerado de fibras ou partículas de madeira revestido a melamina (9,8 cm)	52	0,50
	Divisória em madeira, com espessura total de 10 cm, constituída por painéis sandwich em aglomerado de madeira revestida a melamina. A caixa-de-ar integra placas de lã de rocha, com 6 cm de espessura e 70 kg/m ³ , e uma membrana acústica, com 2,8 cm de espessura e 300 kg/m ³ de massa volúmica	44	0,51
	Parede de alvenaria de blocos de betão, com espessura de 32 cm e massa superficial de 226 kg/m ³	44	1,06
	Divisória com espessura total de 14,8 cm, constituída por duas placas de gesso cartonado em cada paramento. A caixa-de-ar com 9,2 cm de espessura, é preenchida por duas mantas de lã de vidro, com espessura de 6,5 cm e 18 kg/m ³ de massa volúmica	52	0,29
	Parede de alvenaria de tijolo furado, assente com argamassa de cimento, com espessura de 22 cm não rebocada	44	1,45

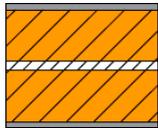
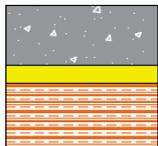
Quadro 8.7

Comportamento acústico de diversos tipos de paredes interiores simples em tijolo cerâmico, betão e bloco de termoargila (cont.)

Tipo de Parede	Descrição	Massa (kg/m ²)	Esp. (cm)	R _w (dB)	U (W/m ² , °C)
	Blocos de betão furados de 15 cm, rebocada numa face	220	16,5	43	2,65
	Blocos de betão furados de 20 cm, rebocada numa face	275	21,5	48	2,09
	Bloco de termoargila furado de 14 cm, estuque com 1,5 cm em ambas as faces	202	17	44	0,97
	Bloco de termoargila furado de 24 cm, estuque com 1,5 cm em ambas as faces	289	27	46	0,76

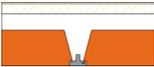
Quadro 8.8

Comportamento acústico de diversos tipos de paredes interiores duplas

Tipo de Parede	Descrição	Massa (kg/m ²)	Esp. (cm)	R _w (dB)	U (W/m ² , °C)
	Placa de gesso cartonado com 1,3 cm, tijolo cerâmico furado com 7 cm, espuma de poliestireno com 2 cm, tijolo cerâmico furado com 7 cm e placa de gesso cartonado com 1,3 cm	133	23	50	0,89
	Placa de gesso cartonado com 1,3 cm, fibra de vidro com 4 cm, placa de gesso cartonado com 1,3 cm	84	12	47	0,82
	Bloco termoargila 14 cm, caixa-de-ar com 5 cm de lâ mineral com 70 kg/m ³ , bloco de betão leve com 12 cm	417	26,5	50	0,42

Quadro 8.15

Comportamento acústico de diversos tipos de pavimento com lajes aligeiradas como elemento de suporte, com diversos tipos de revestimento de piso

Tipo de Laje	Descrição	Massa (kg/m ²)	R _w (dB)	L' _{n,w} (dB)	U (W/m ² , °C)
	Laje aligeirada com vigotas préesforçadas e blocos cerâmicos com 25 cm, camada de regularização com 5 cm, revestimento de piso de madeira com 0,8 cm e rebocada na superfície inferior	315	52	85	2,405
	Laje aligeirada com vigotas préesforçadas e blocos cerâmicos com 25 cm, camada de regularização com 5 cm, lâmina de espuma de polietileno com 0,5 cm, revestimento de piso de madeira com 0,8 cm e rebocada na superfície inferior	315	52	79	1,860
	Laje aligeirada com vigotas préesforçadas e blocos cerâmicos com 25 cm, camada de regularização com 5 cm, lâmina de espuma de polietileno com 1 cm, lajeta flutuante com 4 cm de betão armado, revestimento de piso de madeira com 0,8 cm e rebocada na superfície inferior	410	52	65	1,471
	Laje aligeirada com vigotas préesforçadas e blocos cerâmicos com 25 cm, camada de regularização com 5 cm, lâmina de espuma de polietileno com 2,5 cm, lajeta flutuante com 4 cm de betão armado, revestimento de piso de madeira com 0,8 cm e rebocada na superfície inferior	411	52	55	0,956
	Laje aligeirada com vigotas préesforçadas e blocos de betão com 26 cm, camada de regularização com 4 cm, lâmina de espuma de polietileno com 0,5 cm, revestimento de piso de madeira com 0,8 cm e rebocada na superfície inferior	565	52	79	1,869

$$E_{\text{efec}} \left(\partial^2 u / \partial x^2 + \partial^2 u / \partial y^2 + \partial^2 u / \partial z^2 \right) = \rho \partial^2 u / \partial t^2 \quad (9.15)$$

cuja solução, considerando apenas a direção x , é:

$$u(x, t) = f_1(x - ct) + f_2(x + ct) \quad (9.16)$$

A procura da solução para um dado problema⁶, leva-nos a descobrir uma infinidade de frequências próprias, sendo as mais baixas, porque mais facilmente excitáveis, as de maior interesse na prática.

Onde

$$c = (E_{\text{efec}} / \rho)^{1/2} \quad (9.17)$$

é a velocidade de propagação das ondas.

Em certas condições, a onda $u(x, t)$ pode ser (ou melhor, tornar-se) estacionária, assumindo a forma (simplificadamente) de uma vibração:

$$u(x, t) = U(x) \cos(\omega t) \quad (9.18)$$

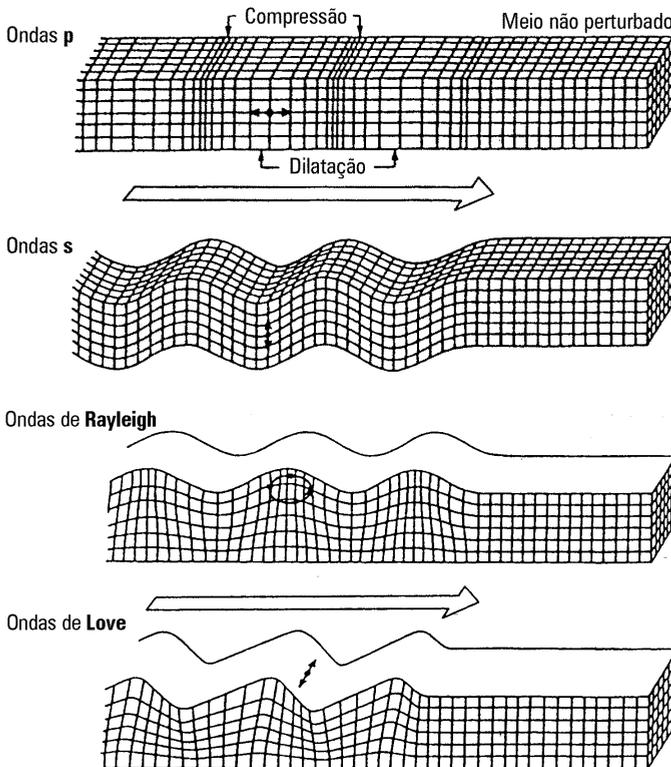
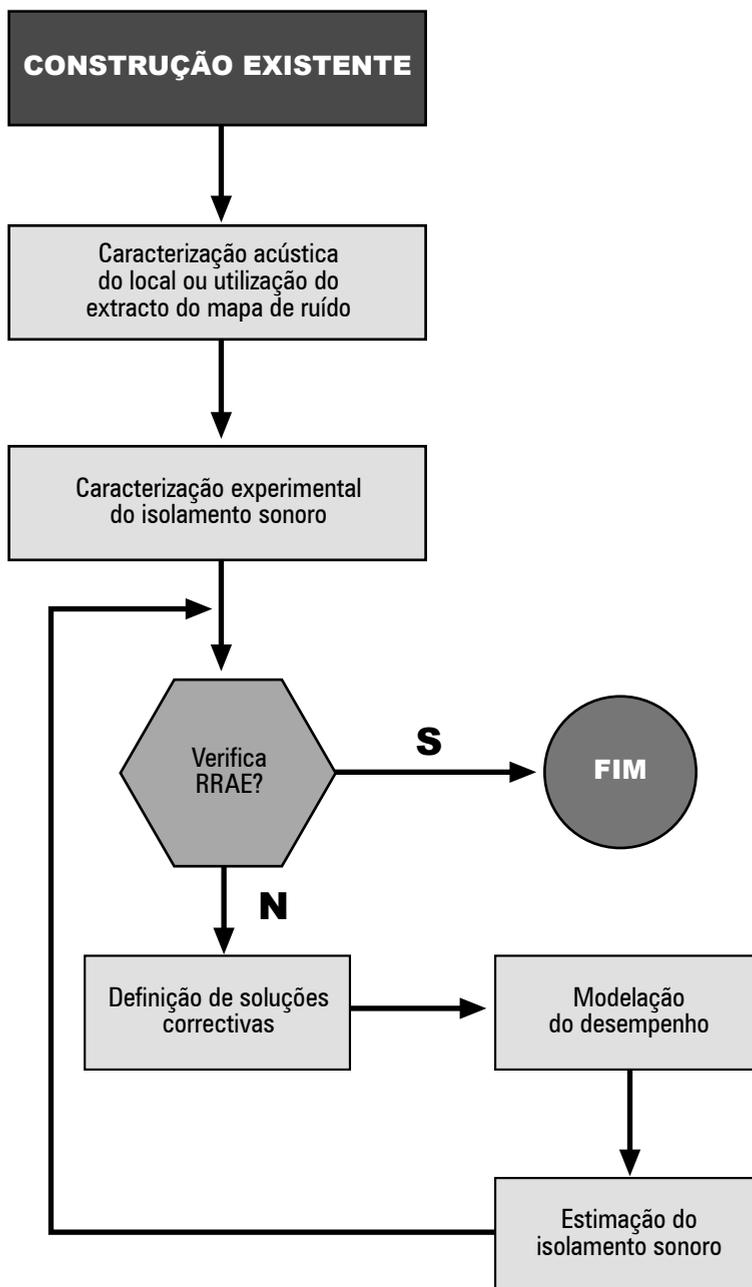


Figura 9.3

Deformações do solo e movimento de uma partícula à passagem das ondas p , s Love e de Rayleigh [07, 08]

6 Disse-se atrás que sólidos, líquidos e gases têm massa, elasticidade e amortecimento. No caso dos líquidos (e também dos gases) a elasticidade (ou rigidez) é evidente quando estão confinados, como no caso do óleo num cilindro, ou da água numa tubagem. Nos líquidos em superfície livre (água em geral), a gravidade funciona como “mola”, podendo também neles ocorrer fenómenos vibratórios.

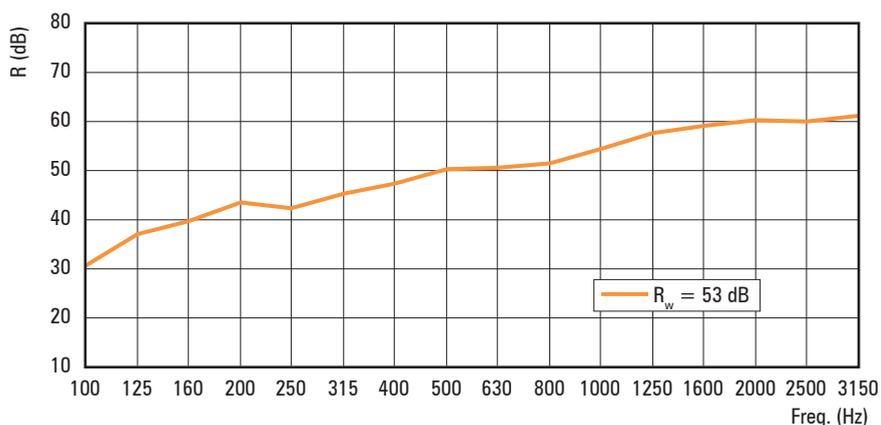
10.3 Procedimentos de avaliação típicos



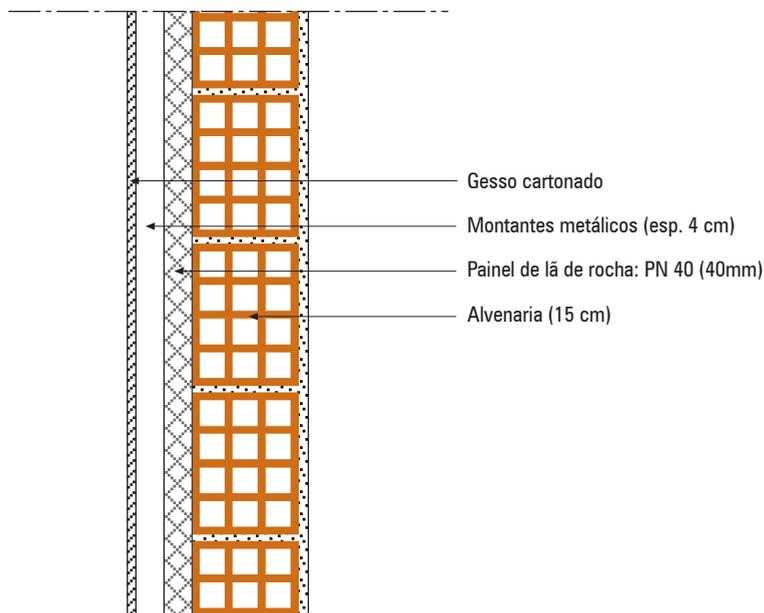
Organograma 10.1
Isolamento sonoro a sons aéreos e de percussão

EXEMPLO DE SOLUÇÕES: SONS AÉREOS

Parede de alvenaria de tijolo, com 15 cm de espessura nominal, revestida com argamassa de reboco, com 1 cm de espessura, rebocada na face virada para o compartimento da recepção. Na face virada para o compartimento emissor estão dispostas placas de gesso cartonado de 13 mm de espessura, formando o conjunto um sistema duplo, com caixa de ar de 11 cm, onde estão colocadas placas rígidas de fibras de lã de rocha aglutinadas com resina sintética termo-endurecida de 40 kg/m³ e espessura de 40 mm.



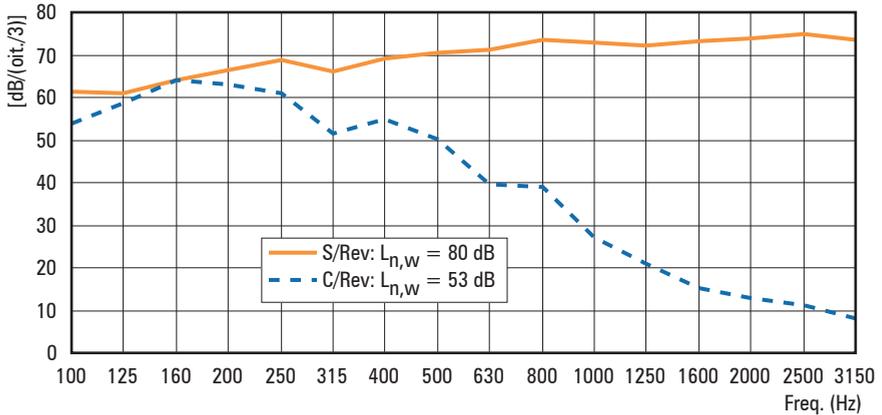
$R_w = 53$ dB (Parede simples: 44-45 dB)



Fonte: imperialum

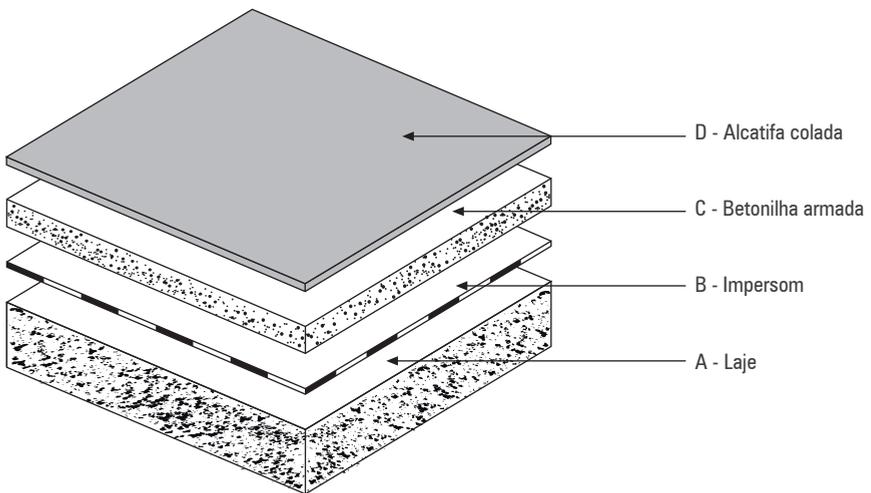
EXEMPLO DE SOLUÇÕES: SONS DE IMPACTO

Sistema flutuante constituído por lajeta de betão de 0,04 m de espessura, armada com malha electrosoldada, integrando revestimento de piso final (alcatifa industrial) com 6 mm de espessura, disposto sobre camada resiliente constituída por feltro de betume oxidado, que integra granulado de cortiça na sua face inferior.



$\Delta L_w = 27$ dB (conforme EN ISO 717-2)

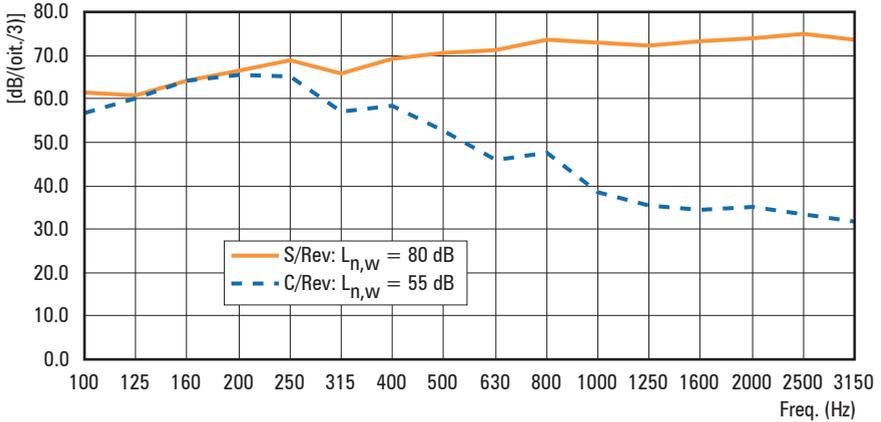
$\Delta L_w = 27$ dB, referido ao pavimento de referência: EN ISO 717-2



Fonte: imperialum

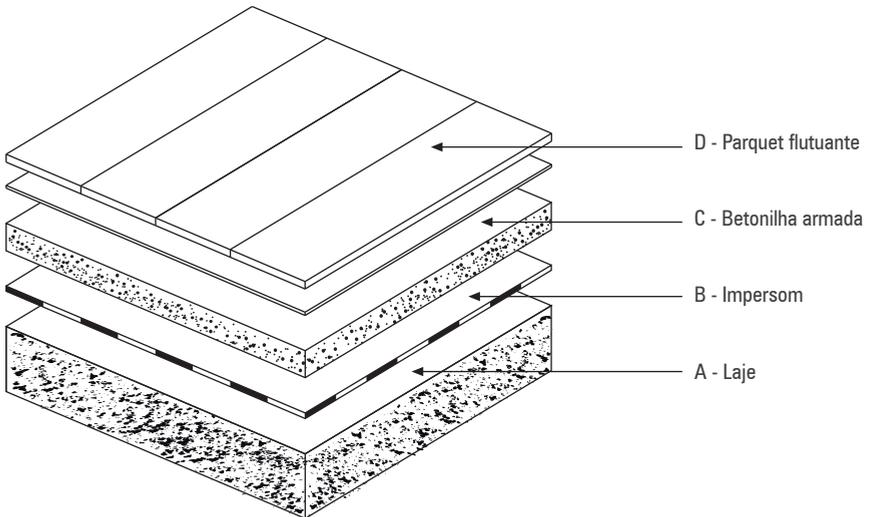
EXEMPLO DE SOLUÇÕES: SONS DE IMPACTO

Sistema flutuante constituído por lajeta de betão de 0,04 m de espessura, armada com malha electrosoldada, integrando revestimento de piso final (piso flutuante) de madeira, constituído por réguas de madeira com um sistema de encaixe nos bordos, com 6 mm de espessura, disposto sobre camada resiliente de feltro de betume oxidado, que integra granulado de cortiça na sua face inferior.



$\Delta L_w = 25$ dB (conforme EN ISO 717-2)

$\Delta L_w = 20$ dB, referido ao pavimento de referência: EN ISO 717-2



Fonte: imperialum

Coeficientes de absorção sonora de materiais e sistemas (cont.)

Tectos Falsos	Coeficientes de absorção sonora α , para as frequências indicadas, expressas em Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
Argamassa armada, com pequena caixa de ar posterior	0,30	0,15	0,10	0,05	0,04	0,04
Forro de madeira em vigamento, com grande caixa de ar posterior	0,30	0,20	0,10	0,10	0,10	0,05
Painéis semi-rígidos de fibras minerais de 1,5 cm de espessura, pintados e microperfurados, caixa de ar no tardo de altura superior a 10 cm	0,45	0,60	0,67	0,75	0,80	0,72
Painéis semi-rígidos de fibras minerais aglutinadas com revestimentos antidesagregantes diversos (esp. 2 cm), caixa de ar no tardo de altura superior a 10 cm	0,40	0,65	0,65	0,75	0,85	0,85
Idem, com esp. de 4 cm	0,40	0,55	0,65	0,90	0,90	0,90
Painéis metálicos perfurados (área aberta 25 % da área total), com manta de lã mineral de 2,5 cm de espessura aplicada no tardo	0,37	0,66	0,75	0,85	0,85	0,77

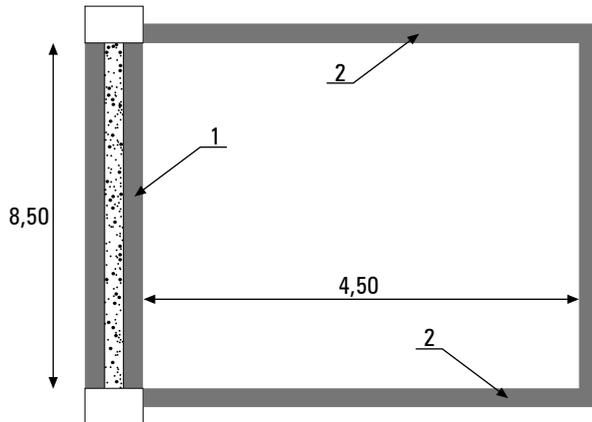
Coeficientes de absorção sonora de materiais e sistemas (cont.)

Diversos	Coeficientes de absorção sonora α para as frequências indicadas, expressas em Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
Porta de madeira (maciça), pintada ou envernizada (4 cm de espessura)	0,12	0,10	0,09	0,08	0,04	0,04
Porta com faces em contraplacado de 8 mm, com 4 cm de espessura	0,25	0,22	0,17	0,09	0,06	0,06
Janela de vidro de dimensões correntes	0,35	0,25	0,18	0,12	0,05	0,02
Plano envidraçado de, pelo menos, 6 mm de espessura, com funções de divisória	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
Abertura de insuflação ou exaustão de condutas de ventilação	0,16	0,20	0,30	0,35	0,29	0,21
Abertura de balcão	0,25 a 0,80					
Vão aberto para o exterior	1,0					
Espelho de água de uma piscina	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03

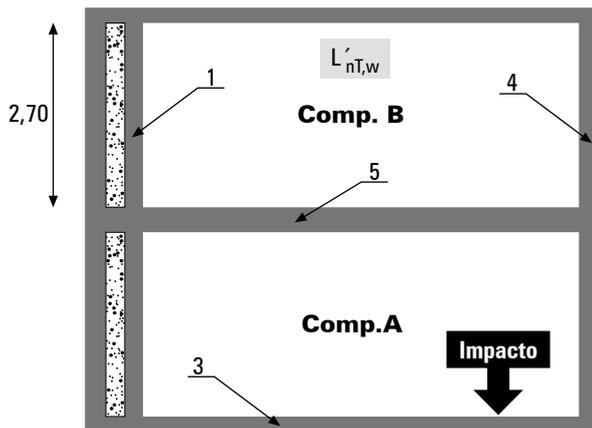
EXERCÍCIO 9

Considere-se um edifício misto – URBE – em que o piso inferior tem um espaço comercial, ilustrados pela planta esquemática e pelo corte vertical exposto, a que se referem as figuras seguintes. As dimensões encontram-se expressas em metros.

Planta esquemática parcial do edifício URBE



Corte esquemático parcial do edifício URBE



As características dos elementos de construção são as seguintes:

1. Parede dupla, construída com alvenaria de tijolo de espessura nominal igual a 0,11 m, integrando material absorvente sonoro na caixa de ar, e tendo cada pano a massa superficial de 140 kgm^{-2} ;
2. Parede simples, construída com alvenaria de tijolo de espessura nominal igual a 0,15 m, e massa superficial de 170 kgm^{-2} ;
3. Pavimento em betão armado, revestido com ladrilho cerâmico;
4. Parede simples, com características idênticas às da parede 2;

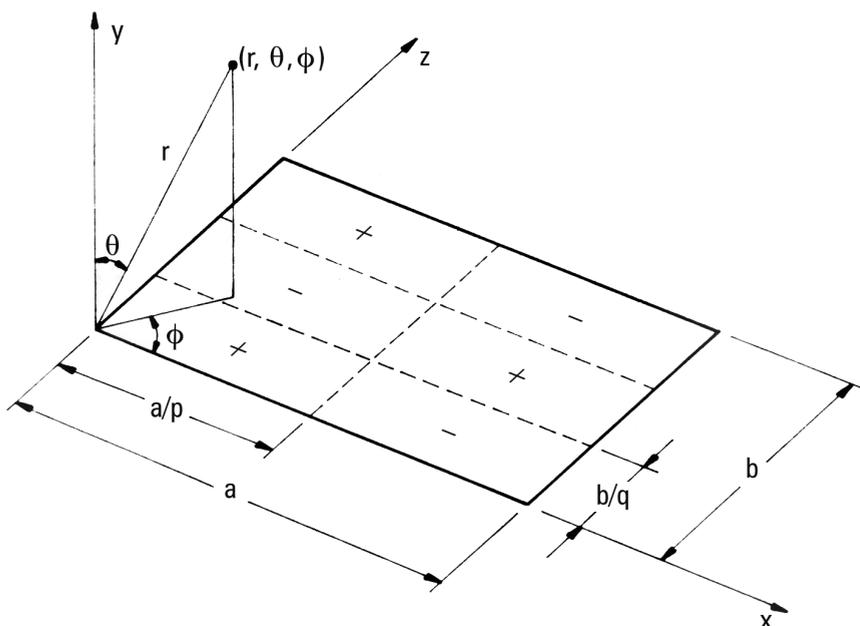


Figura A3
Exemplo de uma configuração modal num painel

Pelo facto não se afigura estritamente correcto considerar os mesmos modos de vibração para casos em que os painéis se encontram totalmente isolados, simplesmente apoiados, acoplados a outros elementos estruturais, ou que possam exibir algum grau de encastramento.

Todavia, para painéis simplesmente apoiados, rectangulares (de dimensões \mathbf{axb}), a distribuição da velocidade normal de vibração define-se por:

$$v_n(x, z) = \tilde{v}_{pq} \sin\left(\frac{p\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{p\pi z}{b}\right)$$

Onde,

$$- 0 \leq x \leq a$$

E,

$$- 0 \leq z \leq b$$

em que \mathbf{p} e \mathbf{q} representam números inteiros naturais e \tilde{v}_{pq} a amplitude complexa da velocidade de vibração para o modo de vibração \mathbf{pq} , cuja frequência natural de vibração é dada pela equação seguinte:

$$\omega_{pq} = (D/m)^{1/2} \left[\left(\frac{p\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{q\pi}{b}\right)^2 \right]$$

Onde:

D rigidez de flexão do elemento;

JORGE PATRÍCIO

acústica nos edifícios

7.ª EDIÇÃO

REVISTA É AUMENTADA

Sobre o Livro

O presente livro aborda os vários aspectos associados ao condicionamento acústico de edifícios, proporcionando metodologias para efectuar a avaliação do condicionamento em causa, tanto em fase de projecto como em fase referente a caracterização de situações já existentes, de acordo com os requisitos legais e normativos em vigor.

Do mesmo modo, pretende contribuir para o reforço da consciencialização da comunidade técnica e científica para a necessidade de dar atenção aos aspectos de condicionamento acústico dos edifícios nos processos de verificação de conformidade dos edifícios já construídos, assim como em novas construções ou reconversão e remodelação de instalações.

Sobre o Autor

Jorge Viçoso Patrício é licenciado e doutorado em Engenharia Civil (IST).

É Investigador do LNEC e autor de diversos livros e publicações sobre Acústica. Tem participado em numerosas conferências e encontros científicos nacionais e internacionais. Tem ministrado e organizado múltiplas acções de formação avançada em Acústica do Ambiente e da Edificação, e faz parte do corpo de oradores convidados em cursos de Mestrado de várias universidades nacionais. É representante português no CEN (Comité Europeu de Normalização) sobre Acústica de Edifícios, sendo membro de vários grupos de trabalho. É Presidente da Sociedade Portuguesa de Acústica e Presidente da Associação Europeia de Acústica (EAA). É também membro da Especialização em Engenharia Acústica da Ordem dos Engenheiros, assim como membro Conselheiro desta Ordem.

Apoio Institucional



Parceiro de Comunicação



Apoio à Edição



Também disponível em formato papel



ISBN E-Book

978-989-723-263-3

www.engebook.com