

CARACTERIZAÇÃO DO CONFORTO ACÚSTICO EM ESCOLAS

Joana Maria Figueiredo Mota de Andrade

Relatório de Projecto submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientador: Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho

FEVEREIRO DE 2009

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2008/2009

Departamento de Engenharia Civil

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2008/2009 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

A meus Pais

Conhecimento é Poder

Francis Bacon

AGRADECIMENTOS

Ao concluir este trabalho gostaria de mostrar a minha gratidão a todos os que contribuíram para a sua realização.

Desejo, contudo, destacar em especial o Professor António Pedro de Oliveira Carvalho pela sua orientação e apoio prestado sempre que necessário.

À Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto pelos recursos disponíveis ao longo deste percurso.

E por fim a toda a minha família e amigos, em especial aos meus pais, irmã e Álvaro Barquinha pelo apoio constante prestado.

RESUMO

O presente trabalho pretende analisar e caracterizar a qualidade acústica em escolas do 1º, 2 e 3º ciclo do Ensino Básico.

Foi dada especial atenção a escolas destinadas a crianças entre os 6 e os 11 anos de idade por se tratar da etapa mais importante e primordial da aprendizagem obrigatória. A fadiga e o stress vocal dos professores provocado pela má qualidade do ambiente sonoro em salas de aula também foram objectivo de análise.

As principais características acústicas relacionadas com o tema são o tempo de reverberação, o ruído de fundo, a transmissão sonora entre espaços e a relação sinal/ruído respeitante à voz do professor face ao ruído de fundo.

O tempo de reverberação ideal para que a inteligibilidade da palavra seja óptima deve estar no intervalo entre 0,4 e 0,6 segundos para salas de aula onde o diálogo, exposição de matérias e leitura são necessários.

O ruído de fundo das salas de aula deve ser controlado para evitar o desgaste vocal dos professores e a distração dos alunos, uma vez que a relação sinal/ruído necessária para cumprir os objectivos deve ser superior ou igual a 10 dB. Assim o nível sonoro do ruído de fundo deve ser inferior a 35 dB(A).

A transmissão sonora entre espaços adjacentes depende das características e funções que cada sala requer. Assim o isolamento sonoro a ruídos de condução aérea ($D_{nT,w}$) entre duas salas de aula deve ser superior ou igual a 40 dB enquanto que entre um espaço ruidoso (ex: corredor) e uma sala de aula deve ser maior ou igual 55 dB.

No que respeita ao isolamento sonoro a ruídos de percussão ($L'_{nT,w}$) devem ser tidas considerações especiais nos pormenores de união e separação de elementos e o valor máximo a obter é de 60 dB no caso de salas de aula.

É abordado um caso concreto de análise a duas tipologias de salas de aula. Uma das tipologias abordadas refere-se a uma sala de aula num edifício escolar tipo, fixo e perpétuo. A outra tipologia diz respeito a um edifício pré-fabricado amovível normalmente apelidado de “contentor”. Dada a evolução das soluções adoptadas para fazer face às novas exigências para que as escolas devam estar preparadas é muito importante a segunda análise, pois edifícios pré-fabricados são ainda actualmente uma solução corrente em Portugal e raramente abordados como tal.

Palavras chave: Acústica, escolas, inteligibilidade da palavra, tempo de reverberação, ruído de fundo

ABSTRACT

The present work intends to analyze and characterize the acoustical quality in schools of Primary and Secondary Education.

A special attention was given to schools aimed at children between 6 and 11 years old, because it is the most important and primordial stage of the mandatory learning. Teacher's vocal exhaustion and stress caused by the bad quality of the sound environment in classrooms was also object of analysis.

The main acoustical characteristics linked to the theme are the reverberation time, background noise, the sound transmission between spaces and the relation signal/noise concerning the teacher's voice towards the background noise.

The ideal reverberation time, so that the speech intelligibility becomes perfect, must be in the interval between 0.4 and 0.6 seconds for classrooms where dialogue, presentation of subjects and reading are needed.

The classrooms, background noise must be controlled to avoid the teacher's vocal wearing and the pupils' distraction, since the relation signal/noise needed to fulfil the objectives must be not less than 10 dB. So, the sound level of the background noise level must be inferior to 35 dB(A).

The sound transmission between adjacent spaces depends on the characteristics and functions that each classroom requires. This way, the sound insulation to air born noises ($D_{nT,w}$) between two classrooms must be not less than 40 dB, while that between a noisy area (e.g. corridor) and a classroom, must be not less than 55 dB.

In what concerns the sound insulation of impact noises, some special consideration must be taken regarding the details of union and separation of elements and the maximum value to obtain is 60 dB.

A specific analysis of two different types of classrooms is studied. One of the typologies which are considered in this work refers to a classroom in a school-type building, fixed and perpetual. The other refers to a removable pre-fabricated building usually named as "container". Considering the evolution of the adopted solutions to face the new exigencies that schools must be prepared for, is important the second analysis. Pre-fabricated buildings are still current solution in Portugal and are almost never regarded as that.

Key-words: Acoustics, schools, speech intelligibility, reverberation time, background noise.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO.....	iii
ABSTRACT.....	v
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 O QUE SE ENTENDE POR QUALIDADE ACÚSTICA NUMA SALA DE AULA?	3
3 CONCEITOS E DEFINIÇÕES ACÚSTICAS	5
3.1 PROPRIEDADES BÁSICAS DO SOM.....	5
3.2 ABSORÇÃO SONORA.....	10
3.3 TEMPO DE REVERBERAÇÃO	15
3.4 REFLEXÕES E GEOMETRIA DO ESPAÇO.....	18
3.5 ISOLAMENTO SONORO	19
3.5.1 A IMPORTÂNCIA DO ISOLAMENTO SONORO.....	19
3.5.2 RUÍDOS AÉREOS	22
3.5.3 RUÍDOS DE PERCUSSÃO	25
4 A INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA	27
4.1 PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DA INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA.....	29
4.2 DIFICULDADE DE APRENDIZAGEM.....	32
4.3 FONTES DE RUÍDO.....	34
4.3.1 RUÍDO INTERNO	34
4.3.2 RUÍDO EXTERNO	35
4.3.3 RUÍDO DE EQUIPAMENTOS.....	35
4.4 A AMPLIFICAÇÃO SONORA.....	39
5 A QUALIDADE ACÚSTICA NOUTROS ESPAÇOS DA ESCOLA.....	41
5.1 CARACTERIZAÇÃO DA ESCOLA	41
5.2 SALAS COM FUNÇÕES ESPECIAIS.....	42
5.3 BIBLIOTECAS E SALAS DE ESTUDO	44

5.4	ESPAÇOS RUIDOSOS	45
6	LEGISLAÇÃO E NORMALIZAÇÃO APLICÁVEL	51
6.1	PORTUGAL	51
6.2	OUTROS PAÍSES	54
7	PARQUE ESCOLAR EM PORTUGAL	59
7.1	CARACTERIZAÇÃO	59
7.2	VALORES IDEAIS PARA PROJECTO	62
8	CASOS DE ESTUDO	65
8.1	SALA AMOVÍVEL	65
8.2	SALA TRADICIONAL	69
9	CONCLUSÕES	71
10	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 3.1 – Espectro da zona audível para sons típicos [4]	8
Fig. 3.2 - Distribuição das ondas sonoras para dois grupos de frequências [4].....	9
Fig. 3.3 – Transmissão sonora.....	10
Fig. 3.4 - Reflexão e Difusão (da esq. para a dir.).....	11
Fig. 3.5 - Manta de lã de rocha [38]	11
Fig. 3.6 - Panel com taxa de furação de 18% [32]	11
Fig. 3.7 – Exemplos de membrana [67]	12
Fig. 3.8 - Curva de referência para determinação do coeficiente de absorção ponderado [6]	13
Fig. 3.9 - Comparação de diferentes sistemas de absorção [adaptado de 4]	14
Fig. 3.10 - Representação gráfica do tempo de reverberação [4].....	17
Fig. 3.11 - Representação gráfica do efeito do TR na inteligibilidade da palavra "Back" [4]	17
Fig. 3.12 - Efeito das ondas sonoras directas e reflectidas [4]	18
Fig. 3.13 - Fotografia da Escola Básica de Vila Verde - Vinhais [foto da autora].....	19
Fig. 3.14 - Estudo da envolvente da escola [2]	20
Fig. 3.15 - Transmissão de ruído por via directa e marginal [2]	20
Fig. 3.16 - Transmissão sonora	23
Fig. 3.17 - Solução através da duplicação de panos.....	23
Fig. 3.18 - Solução através do aumento da massa.....	24
Fig. 3.19 - Valores típicos da redução sonora em elementos de construção [2]	24
Fig. 4.1 - Direcionalidade frontal da voz [2]	28
Fig. 4.2 - Unidade emissora para emissão do RASTI [58].....	29
Fig. 4.3 - Influência da relação sinal/ ruído numa sala de aula [23].....	31
Fig. 4.4 – Exemplos de fontes de ruído internas [adaptado de 2]	34
Fig. 4.5 - Diferentes formas de protecção do ruído de tráfego [2]	35
Fig. 4.6 - Nova ferramenta de aprendizagem - Computador portátil "Magalhães" [10].....	36
Fig. 4.7 - Curvas de incomodidade NC – "Noise Criterion"	37
Fig. 4.8 - Curva de incomodidade NR – "Noise Rating"	38
Fig. 4.9 – Exemplo de equipamento de amplificação sonora utilizado por professor [69].....	39
Fig. 4.10 - Arranjo de um sistema de amplificação numa sala de música [61].....	40
Fig. 5.1 - Posição correcta do aluno com deficiência auditiva e dos altifalantes numa sala de aula para crianças pequenas [adaptado de 2]	42
Fig. 5.2 - Resultados de estudo elaborado pela LIFE UK a uma sala de aula [adaptado de 2].....	43

Fig. 5.3 - Aplicação de materiais absorventes suspensos ou <i>baffles</i> [63].....	44
Fig. 6.1 - Zona de tolerância para o tempo de reverberação segundo a DIN 18041 [43].....	56
Fig. 6.2 - Zona incorrecta para aplicação de material absorvente [43].....	57
Fig. 6.3 - Zona correcta para aplicação de material absorvente [43].....	57
Fig. 7.1 - Escola em edifício histórico [60]	60
Fig. 7.2 - Escola edificada no <i>Estado Novo</i> [60]	60
Fig.7.3 - Escola posterior a 1970 [60]	60
Fig.7.4 - Escola edificada a partir de diversos contentores [66].....	61
Fig.7.5 - Infantário em edifícios pré-fabricados [33]	61
Fig. 8.1 - Módulo pré-fabricado simples [68]	66
Fig. 8.2 - Sala de aula amovível na Escola Básica Joaquim Nicolau Almeida [foto da autora].....	67
Fig. 8.3 – Colocação do material absorvente no tecto [imagem da autora].....	68
Fig. 8.4 - Complexo de salas de aula amovíveis [foto da autora].....	68
Fig. 8.5 - Salas de aula de construção tradicional [fotos da autora]	70

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 - Valores da velocidade da propagação do som em diferentes meios e materiais [4]	6
Quadro 3.2 - Classificação do coeficiente de absorção sonora ponderado segundo EN ISO11654 [6]	12
Quadro 3.3 - Absorção sonora por pessoa [adaptado de 4].....	14
Quadro 3.4 - Valores indicativos do efeito do isolamento sonoro nas condições de audibilidade [5]..	21
Quadro 4.1 - Variabilidade da emissão da voz entre vogais e consoantes [5]	28
Quadro 4.2 - Parâmetros de avaliação da inteligibilidade.....	29
Quadro 4.3 - Método de avaliação subjectivo AI – Índice de articulação [5].....	30
Quadro 4.4 - Classificação subjectiva do AI [8]	30
Quadro 4.5 - Relação entre os valores do <i>AL Cons</i> e o STI/ RASTI face à inteligibilidade. [8]	30
Quadro 4.6 - Valores máximos do ruído de fundo e do tempo de reverberação [adaptado de 1]	32
Quadro 5.1 - Recomendações da BATOD e da ASHA para salas de aula [2]	43
Quadro 5.2- Parâmetros Acústicos Recomendados para Bibliotecas [1,2].....	45
Quadro 5.3 - Resultados da avaliação dos níveis sonoros na Escola São Bernardo em Aveiro [12]....	46
Quadro 5.4 – Coeficiente de Absorção Sonora [adaptado de 65]	48
Quadro 6.1 - Isolamento sonoro mínimo a sons de condução aérea ($D_{nT,w}$) entre locais do edifício, segundo RRAE [7]	52
Quadro 6.2 - Isolamento sonoro máximo a ruídos de percussão ($L'_{nT,w}$), segundo RRAE [adaptado de 7]	52
Quadro 6.3 - Tempo de reverberação ($T_{500\text{ Hz} - 2\text{ kHz}}$), segundo o RRAE [adaptado de 7]	53
Quadro 6.4 - Nível sonoro contínuo equivalente ($L_{Ar, nT}$), segundo o RRAE [adaptado de 7].....	53
Quadro 6.5 - Exigências acústicas na Suíça [43]	56
Quadro 6.6 - Valores para o tempo de reverberação segundo a legislação Francesa [44]	58
Quadro 7.1 - Classificação cronológica das tipologias de escolas [16]	59
Quadro 7.2 – Alunos e Estabelecimentos de Ensino em Portugal no ano de 2006/2007 [72]	61
Quadro 7.3 - Isolamento sonoro mínimo a ruídos aéreos segundo o BB93 [adaptado de 2]	64
Quadro 7.4 - Isolamento sonoro máximo a ruídos de percussão segundo o BB93 [adaptado de 2]	64
Quadro 9.1 – Principais parâmetros a seguir para obter conforto acústico em salas de aula.....	71
Quadro 9.2 – Valores ideais e valores do RRAE para obter conforto acústico.....	72
Quadro 9.3 – Anomalias e soluções detectadas	73

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

r.f.- Ruído de fundo [dB]

L_{Aeq} - Nível de pressão sonora equivalente, ponderada A [dB(A)]

$D_{2m,nT,w}$ – Índice de isolamento sonoro de fachada, padronizado [dB]

$D_{nT,w}$ – Índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea, padronizado [dB]

$L_{nT,w}$ – Índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão, padronizado [dB]

R_w – Índice de redução sonora

R'_w – Índice de redução sonora aparente

TR – Tempo de reverberação [s]

S/R – Relação sinal/ruído [dB]

α – Coeficiente de absorção sonora

α_w – Coeficiente de absorção sonora ponderado

I – Intensidade sonora [W/m^2]

W – Potência sonora [W]

c – celeridade [m/s]

ρ – Massa volúmica [kg/m^3]

p_0 - Pressão de referência [Pa]

T – Temperatura [°C]

L_p – Nível de pressão sonora [dB]

L_I - Nível de intensidade sonora [dB]

L_w - Nível de potência sonora

$E_{absorvida}$ – Energia absorvida

$E_{recebida}$ – Energia recebida

NRC – *Noise reduction coefficient*

NC – *Noise coefficient*

NR – *Noise Rating*

RRAE – Regulamento de requisitos acústicos em edifícios

RGR – Regulamento geral do ruído

ANSI S12.60 – *American National Standard Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools*

BB93 – *Building Bulletin 93; Acoustic Design of Schools*

1

INTRODUÇÃO

O objectivo principal deste trabalho é analisar os critérios e as soluções relativas à acústica das salas de aula, quer no que diz respeito a novas construções, quer para a renovação acústica das escolas existentes. Com a crescente importância política e social da educação em Portugal e no resto do Mundo, pretende-se com este estudo analisar a acústica arquitectónica que trata dos problemas inerentes à construção de diversos tipos de edifícios, bem como caracterizar parâmetros acústicos fundamentais para a construção e reabilitação de salas de aula com elevada qualidade acústica.

A acústica de edifícios vem contribuir para a crescente melhoria da qualidade de vida das pessoas fornecendo elementos estipulados como desejáveis para diferentes tipos de edifícios. Os locais destinados à instrução, educação ou aprendizagem devem ser projectados de uma forma especial, aliada à funcionalidade de todas as componentes do espaço. O conforto visual, térmico e acústico e até a salubridade no caso de refeitórios, recreios, balneários ou sanitários devem obedecer a requisitos mínimos disponíveis em vários estudos, para que a escola dê uso ao nome grego “scholé” – local de lazer, onde a aprendizagem e o conhecimento se criam e desenvolvem. A qualidade acústica de um espaço pode ser obtida de duas formas: através de correcções acústicas num espaço, para que os sons aí emitidos sejam perceptíveis de uma forma adequada; ou através do isolamento sonoro que evita que determinado ruído passe para outro espaço.

Nas escolas, como espaços de aprendizagem que são, a fala e a audição são as bases para toda a comunicação, o que torna impossível providenciar uma educação apropriada com excesso de ruído ou reverberação nas salas de aula. Para a concepção de salas de aula com a devida qualidade acústica, é fundamental seguir determinadas directrizes acústicas, tais como, o estudo cuidadoso do tempo de reverberação, das reflexões indesejáveis e das fontes de ruído internas e externas. Todos estes factores contribuem directamente para a inteligibilidade da palavra, que pode ser definida como a percentagem de fonemas entendidos correctamente pelo ouvinte. A inteligibilidade da palavra depende fundamentalmente dos factores tempo de reverberação e ruído de fundo da sala, e pode ser quantificada através de métodos subjectivos e objectivos. A tradução quantitativa da qualidade acústica de um espaço destinado à palavra permite avaliar a conformidade entre o espaço e a função que deve desempenhar.

O processo de planeamento prévio aquando da concepção dos espaços e aplicação dos materiais de construção, evitam futuros problemas acústicos e reduzem substancialmente o investimento quando comparado com a renovação de salas mal projectadas. Em relação à questão monetária inerente à

construção ou renovação de espaços com soluções aplicadas para a resolução de problemas acústicos, nem sempre a falta de recursos é a explicação para a falta de qualidade.

Este trabalho está dividido por capítulos, que se passam a descrever: no Capítulo 2 pretende-se de uma forma resumida explicar o que se entende por qualidade acústica numa sala de aula; no Capítulo 3 apresentam-se os principais conceitos e definições acústicas; no Capítulo 4 aborda-se os principais parâmetros para a avaliação da inteligibilidade da palavra, bem como consequências na aprendizagem em salas com má qualidade acústica; o Capítulo 5 refere e caracteriza outros espaços da escola, tais como salas com funções especiais, bibliotecas e espaços ruidosos; relativamente ao Capítulo 6 indica-se a legislação e normalização aplicável em Portugal e noutros países; no Capítulo 7 caracteriza-se o parque escolar e apresentam-se valores ideais a seguir em projecto para que o conforto acústico seja atingido; no Capítulo 8 apresentam-se dois tipos de salas de aula comuns em Portugal, sendo elas, salas temporárias e salas tradicionais; no Capítulo 9 são apresentadas as conclusões; por fim no capítulo 10 são indicadas as referências bibliográficas.

2

O QUE SE ENTENDE POR QUALIDADE ACÚSTICA NUMA SALA DE AULA?

A qualidade acústica é uma característica fundamental para espaços em que a comunicação verbal é utilizada com o objectivo de ensinar e por isso torna-se especialmente influente e importante para o processo de aprendizagem. Desta forma a qualidade acústica depende de dois diferentes factores: a função do espaço, para o qual deverá haver diferentes considerações de forma a garantir conforto acústico e as características acústicas do espaço.

Nos últimos anos a problemática do incómodo causado pelo ruído, foi alvo de investigações e trabalhos, de forma a alertar a sociedade e as autoridades dos diferentes danos possíveis e irremediáveis. A questão “O que se entende por qualidade acústica numa sala de aula?” acaba por confrontar a actual situação das salas, para que seja possível chegar a soluções correntes e obter um ambiente saudável do ponto de vista da acústica.

A capacidade de ouvir é um instrumento fundamental na instrução das pessoas [3]. Participar em conversas, ouvir música, dialogar são actos que fazem com que as competências e o conhecimento do indivíduo aumentem. Ouvir torna as relações sociais possíveis e tem influência no estado de espírito das pessoas.

Uma vez que a audição é uma característica fundamental para o acto da instrução, é importante que esta funcione nas melhores condições, de forma a que o processo de aprendizagem se torne mais fácil. O ruído afecta as capacidades intelectuais necessárias para a aprendizagem, especialmente quando se trata de crianças. A capacidade que um indivíduo adulto tem em ignorar palavras soltas, bem como em subentender através de poucas palavras o contexto do que está a ser transmitido, não é aplicável linearmente às crianças, uma vez que estas ainda não possuem um vocabulário suficiente para que tal seja possível. Outro grupo de indivíduos susceptível de atenção é aquele em que a língua ensinada não é a materna, tal como acontece na aprendizagem de línguas estrangeiras.

A responsabilidade em criar bons locais de estudo, onde as palavras se percebam com clareza é essencial e pertence a toda a sociedade. A aprendizagem funciona como o ajuste dos sentidos, a transformação da consciência, a adaptação e interpretação do mundo [3]. Os autores de um estudo efectuado a crianças entre os 7 e os 11 anos, levado a cabo em Londres [50] apresentam os valores de 65 dB(A) e 72 dB(A) para o nível sonoro em creches e salas do ensino básico, respectivamente. Os autores também concluem que as fontes de ruído externo pontuais são mais prejudiciais para as

crianças, provocando a sua distração e o conseqüente insucesso escolar. Também se conclui neste estudo que a capacidade de ler é a mais influenciada pelo ruído, comparativamente com a matemática e a escrita [50]. Os autores dividem as crianças em três grupos: crianças com deficiências auditivas; crianças com uma língua mãe diferente da ensinada; crianças com carências económicas. A divisão das crianças em diferentes grupos demonstra preocupação com as diferenças sociais, económicas e culturais e torna-se uma mais valia para que a problemática esteja identificada a todos os níveis.

Para se garantir uma boa qualidade acústica é necessário considerar parâmetros objectivos, possíveis de medir e aplicar em fase de projecto. O conhecimento dos requisitos mínimos a cumprir para que o som numa sala se propague de forma clara, deve englobar duas vertentes da acústica de edifícios: o isolamento sonoro e a correcção acústica. A correcção acústica resulta da consideração de parâmetros fundamentais na acústica de salas tais como, o tempo de reverberação, o ruído de fundo, a absorção sonora, os sistemas e materiais absorventes.

É importante lembrar e alertar as pessoas para a constante exposição à poluição sonora provocada por diferentes fontes de ruído. A atenção necessária a ter para que o ambiente sonoro onde a aprendizagem se inicia seja o correcto, tem de partir dos pais, professores, funcionários e responsáveis pela criação e manutenção de todo o espaço. Para concluir podemos dizer que a qualidade acústica consiste na combinação de parâmetros objectivos com parâmetros de carácter mais subjectivo e na relação dos mesmos de uma forma global e o mais perfeita possível.

3

CONCEITOS E DEFINIÇÕES ACÚSTICAS

3.1 PROPRIEDADES BÁSICAS DO SOM

A intensidade (I) é uma medida vectorial, definida pela quantidade média de energia que atravessa uma área de 1m^2 por segundo, expressa-se em W/m^2 . Esta característica define o campo de intensidade sonora criado por um determinado som ao contrário da pressão sonora (p) que é escalar e definida matematicamente para um meio ilimitado, homogêneo e não dissipativo. A potência sonora (W) caracteriza a fonte e é dada pela energia total que atravessa uma esfera fictícia centrada na fonte num segundo. As três características do som apresentadas estão relacionadas através da expressão apresentada:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{p^2}{\rho c} \quad (3.1)$$

Com:

I – Intensidade sonora (W/m^2);

W – Potência sonora (W);

r – distância (m);

p – Pressão sonora (Pa);

ρ – Massa volúmica (ar $\approx 1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$);

c – Celeridade ($\approx 340 \text{ m}/\text{s}$).

A massa volúmica indicada é respeitante ao ar, uma vez que a propagação do som na acústica de edifícios é geralmente o ar. A celeridade é uma grandeza que depende da temperatura do meio e calcula-se através da expressão (3.2):

$$c = 20,045\sqrt{T} \quad (3.2)$$

Com T (K) = $273,15 + \theta$ (°C)

Quadro 3.1 - Valores da velocidade da propagação do som em diferentes meios e materiais [4]

Meio	c (m/s)
Ar	344 (21°C)
Água do mar	1500
Madeira	3800
Aço	5050
Placas de gesso	6800

A audibilidade humana comporta-se aproximadamente de uma forma exponencial o que fez com que a escala linear em pascal fosse posta de parte adoptando-se uma medida que permite avaliar um nível face a um de referência. A unidade que descreve essa variabilidade do som é o decibel (dB) que é 1/10 do bel. As fórmulas (3.3) e (3.4) permitem assim converter pressões (p) em pascal para níveis de pressão sonora (L_p) em dB.

$$L_p = 20 \log \frac{P}{P_0} \quad (3.3)$$

ou, através de relações matemáticas:

$$L_p = 10 \log \frac{P^2}{P_0^2} \quad (3.4)$$

Neste caso a pressão sonora de referência é 2×10^{-5} Pa. É também de referir que o limiar da dor é provocado por uma variação de pressão de área de cerca de 100 Pa e o limiar da audição é cerca de 10^{-5} Pa para um ser humano jovem e com audição normal.

A adição de níveis processa-se de uma forma particular. Não se somam níveis da mesma forma que se somam números reais, isto é, não se somam algebricamente. A escala utilizada não é linear e portanto aplicam-se as regras de adição de logaritmos. A título de exemplo, a sequência das expressões 3.5 a 3.10 representa o nível de pressão sonora resultante (L_{soma}) de duas fontes sonoras iguais a emitir simultaneamente.

$$L_{soma} = L_1 + L_1 \quad (3.5)$$

$$L_1 = 10 \log \left(\frac{p_1^2}{p_0^2} \right) \quad (3.6)$$

$$L_{soma} = 10 \log \left(\frac{p_1^2}{p_0^2} + \frac{p_1^2}{p_0^2} \right) \quad (3.7)$$

$$L_{soma} = 10 \log \left(\frac{2p_1^2}{p_0^2} \right) \quad (3.8)$$

$$L_{soma} = 10 \log 2 + 10 \log \left(\frac{p_1^2}{p_0^2} \right) \quad (3.9)$$

$$L_{soma} = 3 + L_1 \text{ (dB)} \quad (3.10)$$

Caso os níveis a somar sejam diferentes e de número N, o nível médio de pressão sonora resultante é dado pela expressão 3.11.

$$L_{soma} = 10 \log \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_i}{10}} \text{ (dB)} \quad (3.11)$$

Também se pode caracterizar um estímulo sonoro através do níveis de intensidade e potência sonora, dados por:

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \text{ (dB)} \quad (3.12)$$

Com $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} \text{ (dB)} \quad (3.13)$$

Com $W_0 = 10^{-12} \text{ W}$

Uma curiosidade é o facto de L_I e L_p serem, nas situações correntes, idênticas, com um erro máximo de 0,2 dB que depende da temperatura [5]. Outra curiosidade está na adição de dois ou mais níveis que variem mais de 10 dB entre eles. O valor do nível de pressão sonora resultante é aproximadamente igual ao maior dos níveis, esta curiosidade tem especial interesse para se entender o ruído numa sala de aula provocado por um determinado número (N) de alunos. Quando passamos a menos um aluno ($N-1$), o nível sonoro total continua quase inalterado. Tal só não acontece se o aluno que parou de falar tiver um nível sonoro muito superior aos colegas e por isso se fazer notar a diferença.

A frequência é outra característica importante para caracterizar um som, sendo que este pode possuir uma só frequência, denominado som puro. Na generalidade dos casos o som é composto por várias frequências denominado som complexo, como são exemplo a música, a fala e o ruído. A importância da análise em termos de frequência é importante quando se trata a acústica de edifícios. A figura 3.1 representa a zona audível num espectro de frequências.

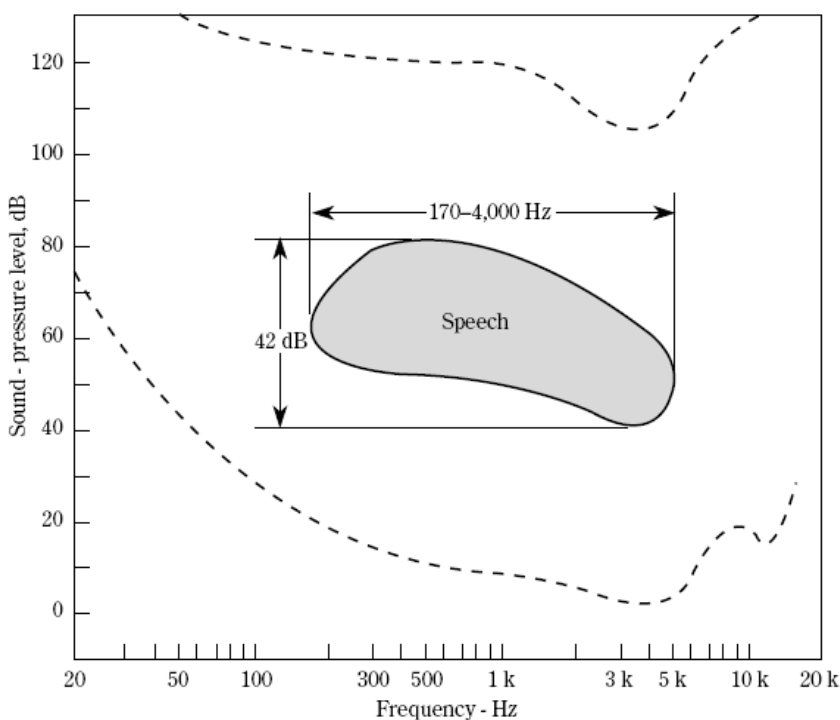


Fig. 3.1 – Espectro da zona audível para sons típicos [4]

No que respeita à direccionalidade tal como será mencionado no Capítulo 4 referente à Inteligibilidade da palavra, a voz humana não se propaga uniformemente, tal como acontece com fontes omnidireccionais utilizadas em diversos ensaios acústicos. A figura 3.2 apresenta um possível arranjo da distribuição das ondas sonoras, para uma dada frequência. A direccionalidade depende da frequência emitida e do ambiente envolvente.

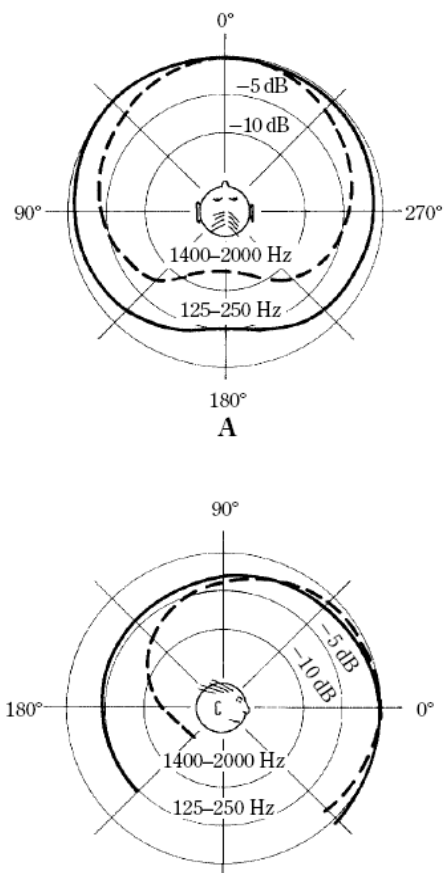


Fig. 3.2 - Distribuição das ondas sonoras para dois grupos de frequências [4]

3.2 ABSORÇÃO SONORA

A absorção sonora é definida como a dissipação de energia sonora que determinada superfície consegue provocar. A absorção sonora de um material depende da sua estrutura interna, sendo que um material poroso, por exemplo a cortiça, é mais absorvente que uma pedra polida como o mármore. A energia sonora acaba por se transformar em energia calorífica e quanto mais poroso for o material mais intensamente isso acontece. A absorção sonora também varia consoante o ângulo de incidência do som e a sua frequência.

Define-se por coeficiente de absorção sonora (α) a razão entre a energia absorvida num determinado tempo pela energia incidente durante esse tempo (fig. 3.3). A expressão 3.15 define este coeficiente:

$$\alpha = \frac{E_{\text{absorvida}}}{E_{\text{incidente}}} \quad (3.14)$$

O coeficiente de absorção sonora pertence necessariamente ao intervalo entre 0 e 1. Se um material possui um $\alpha = 1$ então ele é totalmente absorvente. Por vezes aparecem valores superiores à unidade o que não é possível teoricamente, esses valores devem-se ao processo de ensaio em que não são contabilizadas, isto é, deduzidas superfícies a mais que absorvem a energia para além do material em estudo. As ondas sonoras podem comportar-se de diferentes formas, consoante as características das superfícies de contacto, como é exemplo a figura 3.4.

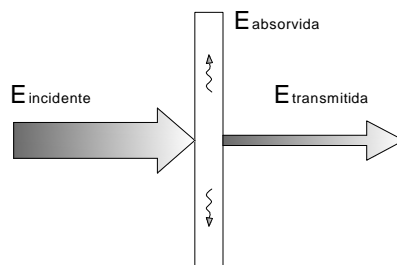


Fig. 3.3 – Transmissão sonora

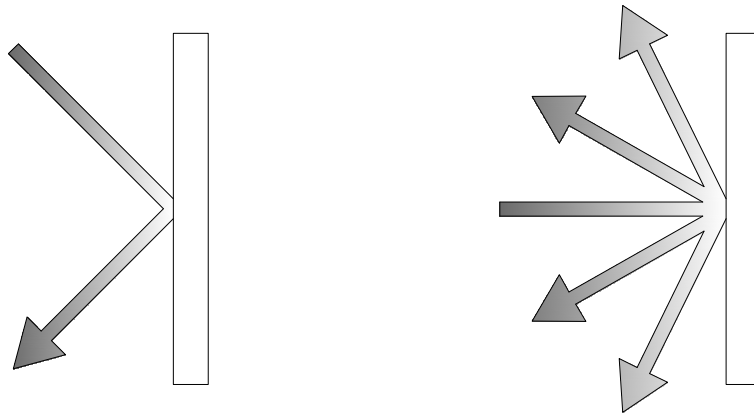


Fig. 3.4 - Reflexão e Difusão (da esq. para a dir.)

Um material pode considerar-se “absorvente” quando o α é superior a 0,5. É possível distinguir três tipos de materiais e sistemas absorventes consoante a gama de frequências que absorvem. Os materiais distinguem-se por: porosos e fibrosos que actuam com mais eficácia na gama das altas frequências; ressoadores que estão associados às médias frequências; membranas que são utilizadas quando se trata de baixas frequências. As Figuras 3.5, 3.6 e 3.7 apresentam exemplos respectivamente de materiais porosos, ressoadores e membranas.



Fig. 3.5 - Manta de lã de rocha [38]

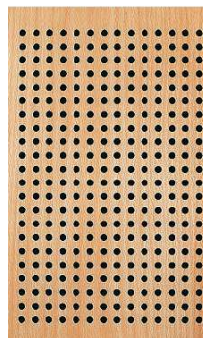


Fig. 3.6 - Painel com taxa de furação de 18% [32]



Fig. 3.7 – Exemplos de membrana [67]

Uma nomenclatura muito utilizada para caracterizar a absorção sonora do material, especialmente nos Estados Unidos é o *NRC*. Este valor corresponde à média aritmética dos valores de α nas bandas de oitava dos 250 aos 2000 Hz, como se representa na seguinte expressão:

$$NRC = (\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2000}) / 4 \quad (3.15)$$

NRC – Noise Reduction Coefficient – deve ser arredondado para o múltiplo mais próximo de 0,05.

Outro parâmetro muito utilizado é o α_w , que se obtém através de um ajuste à curva de referência EN ISO 11654. O ajuste dá-se por concluído quando a soma dos desvios no sentido desfavorável for inferior ou igual a 0,10. O coeficiente de absorção sonora ponderado é o valor ajustado à banda de frequência dos 500 Hz.

O quadro 3.2 apresenta as classes de absorção sonora para os diferentes valores de coeficientes ponderados e a figura 3.8 representa a curva de referência conforme presente na norma EN ISO 11654.

Quadro 3.2 - Classificação do coeficiente de absorção sonora ponderado segundo EN ISO11654 [6]

Classe de absorção sonora	Coeficiente de absorção sonora ponderado α_w
A	0,90; 0,95; 1,00
B	0,80; 0,85
C	0,60; 0,65; 0,70; 0,75
D	0,30; 0,35; 0,40; 0,45; 0,50; 0,55
E	0,15; 0,20; 0,25
Não classificado	0,00; 0,05; 0,10

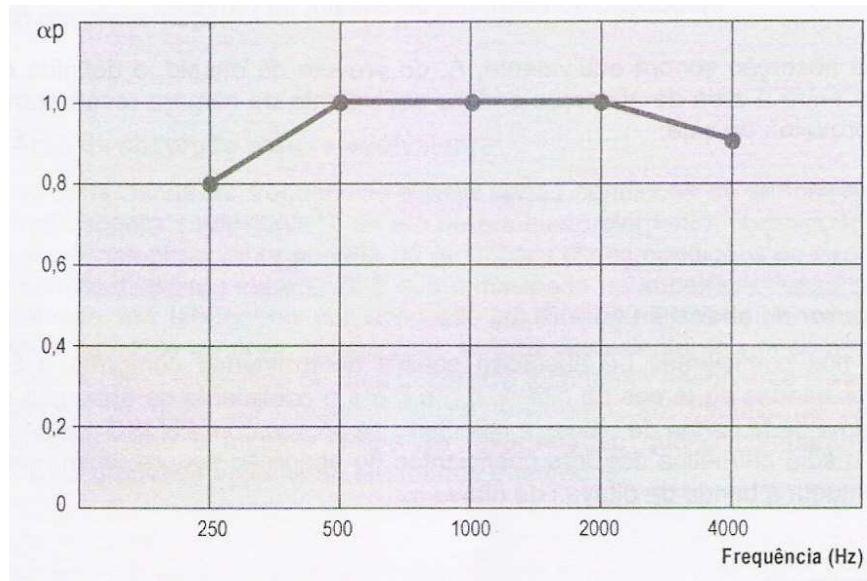


Fig. 3.8 - Curva de referência para determinação do coeficiente de absorção ponderado [6]

Consoante haja desvios superiores a 0,25 à curva de referência é necessário apresentar a indicação seguinte, variando com as bandas de oitava, isto é:

- Caso seja excedida na banda dos 250 Hz acrescenta-se a letra “L”;
- Para 500 ou 1000 Hz : “M”;
- Para 2000 ou 4000 Hz : “H”.

Por exemplo se $\alpha_w = 0,60$ (L) significa que o α_w na banda dos 250 Hz excedeu em mais de 0,25 o valor da curva de referência.

A figura 3.9 evidencia a importância da caixa-de-ar e da colocação de material absorvente no funcionamento da absorção de um som na gama das baixas e médias frequências. A solução B é a que apresenta maior eficácia e maior α devido aos cerca de 2,5 cm de lã mineral.

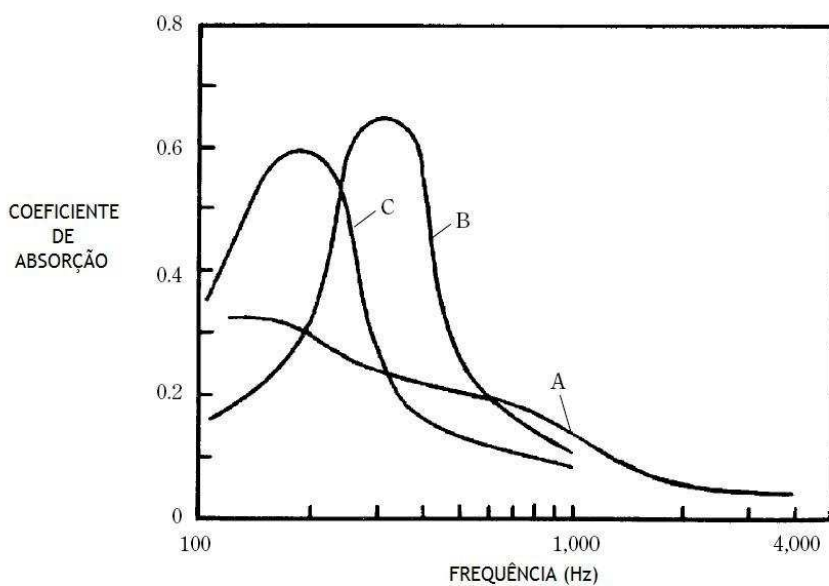


Fig. 3.9 - Comparação de diferentes sistemas de absorção [adaptado de 4]

- A – Contraplacado de madeira (espessura 0,5 cm) com 5 cm de caixa-de-ar
- B – Contraplacado de madeira (espessura 0,16 cm) com 2,54 cm de lã mineral e 64 mm de caixa-de-ar
- C – Contraplacado de madeira (espessura 0,33 cm) com 64 mm de caixa-de-ar

As absorções localizadas por exemplo, das pessoas, também se devem considerar. O quadro 3.3 apresenta possíveis valores a aplicar.

Quadro 3.3 - Absorção sonora por pessoa [adaptado de 4]

Caso	Frequência (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Aluno vestido de forma informal, sentado numa cadeira escolar	-	2,5	2,9	5,0	5,2	5,0
Pessoa sentada numa cadeira de auditório, com estofa	2,5 – 4,0	3,5 – 5,0	4,0 – 5,5	4,5 – 6,5	5,0 – 7,0	4,5 – 7,0

3.3 TEMPO DE REVERBERAÇÃO

Um dos principais parâmetros de medida acústica e que mais influência tem na inteligibilidade da palavra é o tempo de reverberação (TR). Quando uma fonte sonora emite som o ouvido capta esse som, composto por ondas directas e indirectas, que se anula ao fim de um certo tempo após a fonte deixar de emitir esse som, devido às sucessivas reflexões na envolvente.

O tempo de reverberação é definido como o intervalo de tempo que um som demora a decair 60 dB desde que a fonte sonora deixa de emitir. Na prática nem sempre é possível fazer decair 60 dB (devido ao ruído de fundo) e portanto é usual determinar o TR_{30} , isto é, o tempo que o som demora a decair 30 dB e depois extrapolar para os 60 dB. De outra forma o tempo de reverberação pode ser descrito como o intervalo de tempo necessário para que a energia do som num recinto fechado, se reduza para um milionésimo do seu valor inicial, isto é $10\log 10^6 = 60$ dB.

Wallace Clement Sabine (1868-1919) foi o físico norte-americano que propôs a primeira fórmula de cálculo para o tempo de reverberação (3.16), formulação essa que recebeu o seu nome e que continua a ter especial interesse, para quando é necessário determinar tal parâmetro.

$$TR = \frac{0,16 * V}{A} \quad (3.16)$$

Com:

TR = tempo de reverberação (s);

V = Volume da sala (m^3);

$A = \sum_i^N (\alpha_i * S_i)$ = Absorção sonora equivalente das N superfícies da sala (m^2);

S = Área da superfície de contacto (m^2);

α = Coeficiente de absorção sonora do material.

A constante 0,16 pode ser calculada segundo a expressão (3.17) onde c é a celeridade do ar em m/s e depende da temperatura (T) como mostra a expressão (3.18), neste caso, $T=24^\circ C$. A fórmula de Sabine também pode ser apresentada de forma mais genérica, através da expressão (3.19).

$$\frac{24 \ln 10}{c} = 0,16 \quad (3.17)$$

$$c = 20,045\sqrt{T} \quad (3.18)$$

$$T(K) = 273,15 + \theta(^{\circ}C)$$

$$TR = \frac{0,16 * V}{\sum_{i=1}^N \alpha_i S_i + \sum_{j=1}^M A_j + mV} \quad (3.19)$$

Outras expressões foram apresentadas para a determinação do tempo de reverberação (Eyring, Millington-Sette, Kuttruff, etc.) mas todas elas tiveram como base a fórmula de Sabine. No presente trabalho é a fórmula de Sabine que se aplica para o cálculo do TR visto ser ainda a mais utilizada na especialidade. Na prática as medições do TR devem ser feitas considerando a sala desocupada de pessoas, mobilada e com as portas e janelas fechadas [1],[2]. A gama de frequências adoptadas pelo *RRAE – Regulamento de Requisitos Acústicos em Edifícios* [7] e pelo *BB93* são as bandas centradas nos 500, 1k e 2k Hz, através de uma média aritmética.

A figura 3.10A representa graficamente o TR para os 60 dB de decaimento, mas como mencionado anteriormente a definição teórica do TR não é fácil de passar à prática. O ruído de fundo é neste caso de 30 dB e o nível da fonte sonora é de 100 dB que corresponde a um amplificador com 100 W de potência. No caso da figura 3.10B o nível sonoro contínuo é cerca de 60 dB, para atingir um decréscimo de 60 dB seria necessário uma fonte que emitisse 120 dB, o que já não é exequível. Como demonstrado no subcapítulo 3.1, a adição de duas fontes com igual intensidade sonora provoca um aumento de 3 dB no nível de pressão sonora. Se uma fonte de 100 W de potência emite 100 dB, duas fontes de 100 W emitem 103 dB, 400 W emitem 106 dB, 800 W emitem 109 dB. Por este motivo é que o tempo de reverberação é calculado para decréscimo de 20 ou 30 dB no nível de pressão sonora e depois extrapolados para os 60 dB, como mostra a recta tracejada na figura 3.10B [4].

Enquanto que a figura 3.11 mostra a influência do TR na percepção da palavra “back” através de uma representação logaritmica. As consoantes têm uma frequência maior, mas são emitidas com baixa intensidade e a sua duração é cerca de 20 ms. No que respeita às vogais estas estão nas baixas frequências, mas a intensidade com que se pronunciam é elevada e a sua duração é de 90 ms. Analisando a figura, a palavra começa pela sílaba “ba” que possui um nível de pressão sonora de pico de 25 dB superior ao pico da sílaba “ck”, para além disso existe um desfasamento de 0,32 s entre os dois picos. Posto isto, consoante o valor TR da sala a palavra é ou não perceptível. No caso de o TR ser de 0,5 s o decaimento da primeira sílaba dá-se antes da última e assim o som “ck” não é mascarado. Mas no caso do TR ser 1,5 s, como mostram as linhas a tracejado, o mesmo já não acontece e a sílaba “ba” atropela o som da sílaba “ck”. O tempo de reverberação elevado pode provocar, como demonstrado, a não inteligibilidade das palavras. No caso de não haver um contexto no discurso das palavras a palavra “back” pode ser confundida, por exemplo com, “bath” ou “bad” [4].

Uma maneira simples de detectar se uma sala é ou não reverberante é bater as palmas no centro da sala e ouvir o prolongamento do som, se este for comprido é sinal que existe excesso de reverberação.

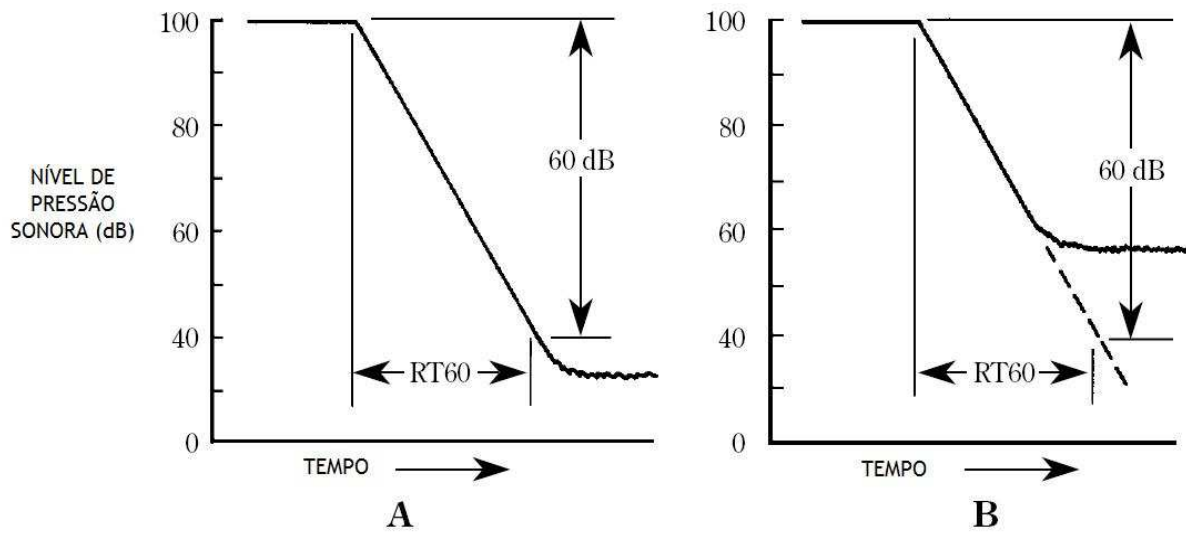


Fig. 3.10 - Representação gráfica do tempo de reverberação [4]

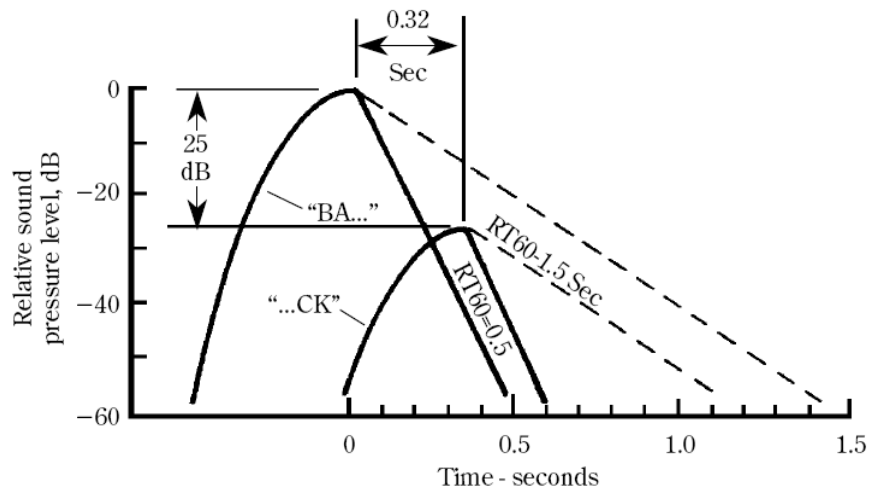


Fig. 3.11 - Representação gráfica do efeito do TR na inteligibilidade da palavra "Back" [4]

3.4 REFLEXÕES E GEOMETRIA DO ESPAÇO

Reflexão de um som é o prolongamento do som depois de este se ter deparado com uma barreira reflectora.

Como já referido a inteligibilidade da palavra é prejudicada quando existem ecos ou reflexões, por estes “atropelarem” o som directo. Os ecos são resultantes de reflexões indesejadas fazem com que o nível sonoro aumente, como mostra a figura 3.12, devido ao prolongamento que o som sofre. Ao som que se propaga de forma directa adicionam-se as ondas reflectidas o que torna a sala mais reverberante a com um nível sonoro mais elevado.

As reflexões das ondas sonoras quando indesejáveis podem ser extintas através de materiais absorventes (porosos e fibrosos, ressoadores, membranas) ou difusores, mas não é tão linear a forma correcta e o local onde se vão colocar.

Dependendo das funções da sala existem várias hipóteses de tratar os reflexões, variando consoante se intervém antes ou depois da construção. Em salas pequenas cuja função é de leitura ou exposição por parte do professor os materiais absorventes podem nem ser necessários, ao contrário de salas com pé direito alto em que é necessário colocar um tecto falso absorvente para diminuir o *TR*. No caso de recintos ruidosos como corredores, ginásios e refeitórios é comum colocar os materiais absorventes na parte alta das paredes e tecto, uma vez que este tipo de locais apresenta grandes geometrias e níveis sonoros é normalmente altos.

Por outro lado existem reflexões úteis que proporcionam o prolongamento das ondas sonoras. As salas de aula de grande dimensão são um dos casos em que as reflexões são por vezes úteis e desejáveis de forma a tornar o discurso do professor claro no fundo da sala. Quando existe necessidade de reforçar as reflexões devido por exemplo à necessidade de aumentar o nível sonoro numa sala com grande profundidade é usual colocar painéis reflectores em cima do estrado do locutor, neste caso do professor.

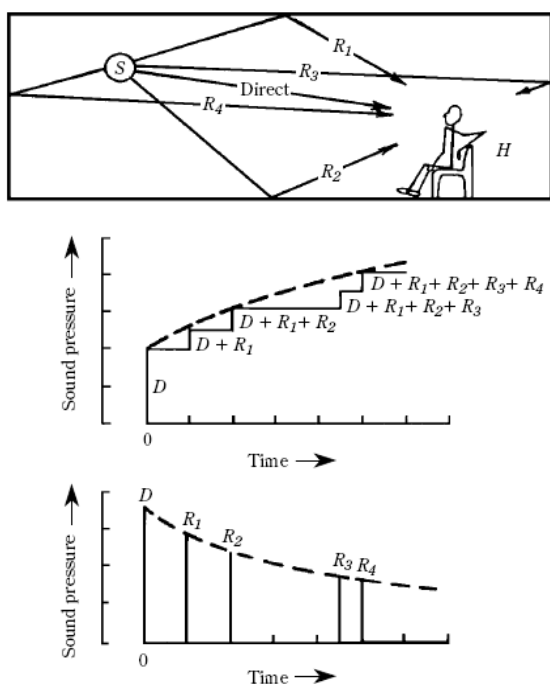


Fig. 3.12 - Efeito das ondas sonoras directas e reflectidas [4]

3.5 ISOLAMENTO SONORO

3.5.1 A IMPORTÂNCIA DO ISOLAMENTO SONORO

O isolamento sonoro é fundamental para que os ruídos provenientes do exterior e de outros locais do edifício não causem incómodo. O edifício deve estar isolado acusticamente do exterior, através das janelas e de todos os vãos bem como de toda a sua estrutura, paredes, tecto e piso. O nível sonoro exterior pode tomar valores muito elevados, tal como acontece na proximidade de aeroportos ou vias de comunicação rápidas, ou valores baixos tal como acontece em zonas rurais. A figura 3.13 representa uma escola básica situada numa zona rural, desprovida de fontes sonoras fortes, ao contrário do que acontece na proximidade de zonas industriais e muito movimentadas. Com o crescente desenvolvimento industrial e tecnológico é comum nas grandes cidades ter indicadores de ruído diurno superiores a 65 dB(A). Se não existir a barreira que é possível criar com a aplicação de isolamento sonoro, as condições de bem-estar ficam muito comprometidas.



Fig. 3.13 - Fotografia da Escola Básica de Vila Verde - Vinhais [foto da autora]

Vários estudos concluíram que o ruído causa stress, irritabilidade, distração e insucesso na aprendizagem [13, 19, 52]. Muitos países estabeleceram valores de isolamento sonoro face ao ruído exterior tendo por base o nível sonoro exterior. Na Bélgica o nível de pressão sonora equivalente ou ruído de fundo é definido consoante o ruído exterior [13]. Como foi referido o isolamento sonoro é um dos pilares quando se fala em qualidade acústica numa escola.

O primeiro passo para obter um maior isolamento sonoro está em planificar devidamente os espaços. Numa primeira fase a escolha da localização dos espaços ruidosos, garante a protecção de espaços mais sensíveis ao ruído (fig. 3.14). Caso não seja possível aplicar esta primeira fase terá que se recorrer unicamente ao isolamento sonoro, como é o caso de reabilitação de escolas.

Contudo, mesmo na utilização de espaços devidamente destinados a mais ruído, a propagação do mesmo através de portas, janelas, tectos, pisos ou condutas para outras salas, pode contribuir para o aumento de ruído de fundo nesses outros espaços contíguos. Um adequado isolamento sonoro é fundamental para limitar a transmissão de ruído entre espaços de aprendizagem e espaços destinados a outras actividades.

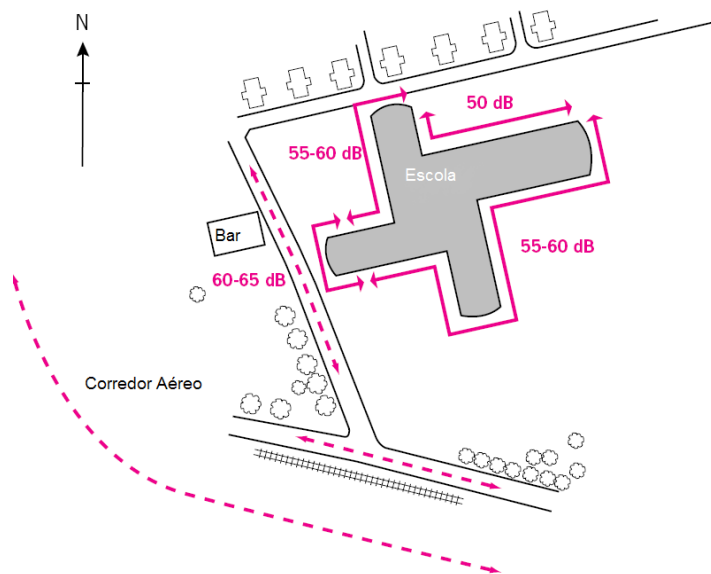


Fig. 3.14 - Estudo da envolvente da escola [2]

O isolamento sonoro encontra-se dividido em duas partes: ruídos aéreos e ruídos de percussão. Isto deve-se ao facto de ser muito importante identificar e separar as duas formas de transmissão de som. Um outro conceito importante é a forma de transmissão do ruído, transmissão essa que pode ser por via directa e/ou por via marginal (fig. 3.15). É também de realçar o facto dos ruídos de percussão serem mais difíceis de isolar e o facto das transmissões marginais não serem fáceis de quantificar em fase de projecto. É enquanto a obra decorre que se deve estar atento, para que as várias perfurações e aberturas que se fazem em lajes e paredes sejam depois bem seladas e isoladas.

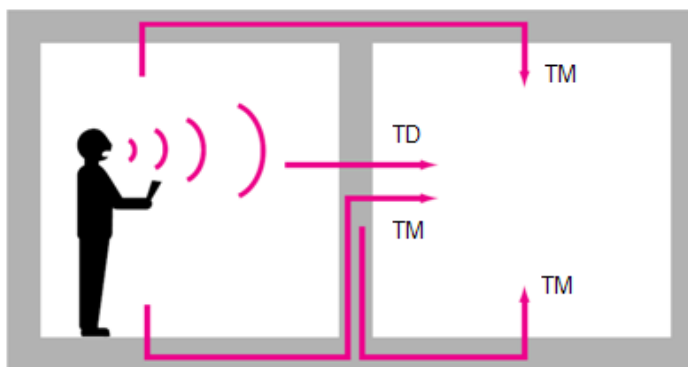


Fig. 3.15 - Transmissão de ruído por via directa e marginal [2]

Apesar de não ser fácil estimar correctamente o isolamento sonoro em projecto que englobe as transmissões marginais, existem métodos para o fazer, por exemplo o EN 12354-1. A complexidade de elementos diferentes envolvidos pode resultar em cenários muito diferentes do previsto. Um elemento simples, por exemplo uma parede simples de tijolo de 11 cm com 2 cm de reboco tem uma redução sonora (R_w) de 45 dB enquanto que uma de tijolo de 7 cm com 2 cm de reboco apresenta uma R_w de 39 dB [5] isto quer dizer que o sistema isola fundamentalmente devido à massa.

O Quadro 3.4 permite elucidar sobre os valores para o isolamento sonoro e seus resultados subjectivos. Em escolas um isolamento sonoro “Bom” é o correcto para que a inteligibilidade da palavra não esteja comprometida.

Quadro 3.4 - Valores indicativos do efeito do isolamento sonoro nas condições de audibilidade [5]

ISOLAMENTO SONORO (dB)	CONDIÇÕES DE AUDIBILIDADE	CONCLUSÃO
< 30	A voz normal pode ser compreendida com facilidade e de modo distinto	Muito mau
30 a 35	A voz é percebida fracamente. A conversa pode ser ouvida mas não nitidamente compreendida	Mau
36 a 40	A voz pode ser ouvida mas não compreendidas as palavras com facilidade. A voz normal só será ouvida debilmente	Sofrível
41 a 45	A voz pode ser ouvida fracamente mas sem ser compreendida. A conversação normal não é audível	Suficiente
46 a 50	Voz alta pode ser ouvida com pouca dificuldade	Bom
51 a 55	Só sons muito intensos (TV, canto, etc.) podem ser ouvidos	Muito bom
56 a 60	Difícil ouvir até sons muito intensos. Só sons do tipo “discoteca” serão audíveis	Excelente

Mesmo através de espaços fechados é possível a transmissão de ruído, e temos como exemplo a transmissão de ruído entre uma sala situada num determinado piso e uma outra situada no piso imediatamente inferior. Quando existem solicitações mecânicas a transmissão do ruído dá-se através da estrutura e o ruído tem o nome de Ruído de Percussão.

Para limitar o impacto do ruído de percussão, a norma ANSI S12.60 utilizada nos E.U.A. fornece uma vasta bibliografia. O valor de IIC (*Impact Insulation Class*) não é aprofundado na ANSI S12.60.

3.5.2 RUÍDOS AÉREOS

O ruído de condução aérea é aquele em que a sua transmissão é devida a apenas vibrações do ar (fig.3.16). O isolamento sonoro a ruídos de condução aérea, padronizado, é definido pelas expressões 3.21 e 3.22, consoante se trate de isolamento a ruídos exteriores ou interiores ao edifício, respectivamente:

$$D_{2m,nT} = L_{1,2m} - L_2 + 10 \log(T / T_0) \quad (dB) \quad (3.21)$$

Com:

$D_{2m,nT}$ – isolamento sonoro a ruídos de condução aérea, padronizado a 2 m da fachada exterior;

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

L_2 – nível de pressão sonora medido no local de recepção;

$10 \log (T/T_0)$ – correcção devida às condições de reverberação do compartimento receptor;

T – tempo de reverberação do compartimento receptor (s);

T_0 – tempo de reverberação de referência, em geral $T_0 = 0,5$ s mas pode tomar outro valor definido no projecto de dimensionamento.

$$D_{nT} = L_1 - L_2 + 10 \log(T / T_0) \quad (dB) \quad (3.22)$$

Com:

D_{nT} – isolamento sonoro a ruídos de condução aérea, padronizado;

L_1 – nível médio de pressão sonora medido no compartimento emissor;

L_2 – nível de pressão sonora medido no compartimento de recepção;

$10 \log (T/T_0)$ – correcção devida às condições de reverberação do compartimento receptor;

T – tempo de reverberação do compartimento receptor (s);

T_0 – tempo de reverberação de referência, em geral $T_0 = 0,5$ s mas pode tomar outro valor definido no projecto de dimensionamento.

Este tipo de ruído transmite-se sem qualquer solicitação mecânica na estrutura do edifício. A propagação das ondas sonoras dá-se através do ar e dos elementos construtivos e a energia envolvida é exclusivamente função das vibrações causadas pela fonte sonora. Os elementos verticais como é o caso das paredes e aberturas (portas e janelas) são os que têm mais influência na obtenção de um bom isolamento sonoro a ruídos aéreos.

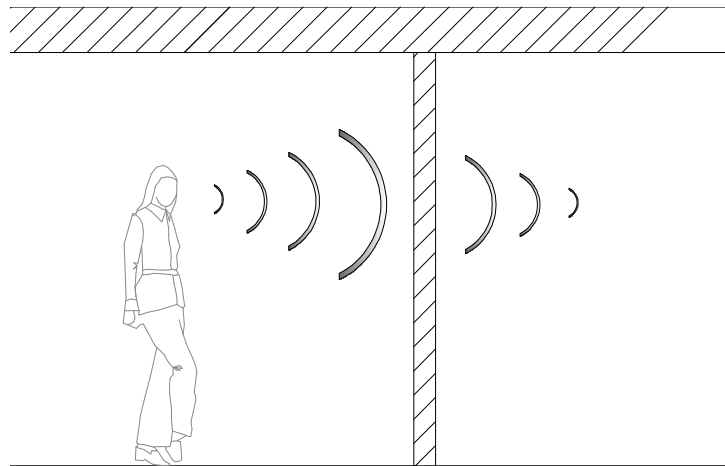


Fig. 3.16 - Transmissão sonora

Analisando a expressão da correcção devida às condições de reverberação facilmente se verifica que caso $T=T_0$ a correcção é zero. A correcção aumenta com o aumento do tempo de reverberação. Existem duas formas de actuar quando o isolamento a ruídos aéreos não é suficiente num determinado elemento. Dependendo da estrutura e do espaço em causa pode-se proceder ao aumento da massa ou à duplicação de panos.

As figuras 3.17 e 3.18 representam as duas situações.

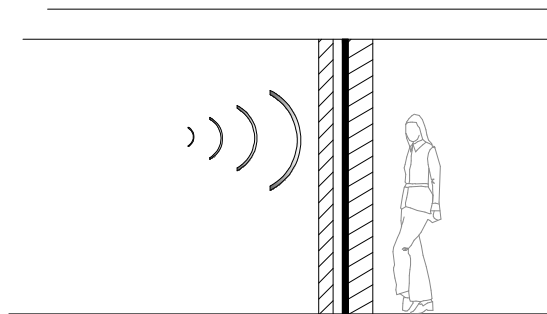


Fig. 3.17 - Solução através da duplicação de panos

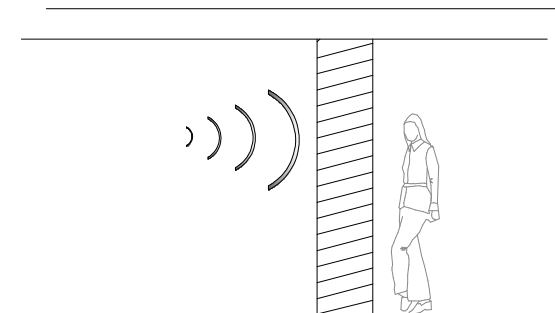


Fig. 3.18 - Solução através do aumento da massa

O peso e a espessura do elemento, que proporciona a redução da transmissão sonora, é mais eficaz quanto maiores forem os seus valores. A transmissão dos ruídos aéreos é mais fácil de tratar do que o caso de transmissão de ruídos de percussão. O facto de existirem métodos simplificados para tratar elementos simples e duplos, seja através da análise de frequências ou da homogeneização de elementos, também é vantajoso para uma análise prévia das situações possíveis na realidade. No caso da redução sonora, um aumento de 10 dB provoca uma melhoria substancial na opacidade acústica do elemento. As medições feitas aos materiais e ao espaço para posterior cálculo do isolamento sonoro a ruídos aéreos, são feitas entre as bandas dos 100 Hz e os 3150 Hz e portanto não engloba ruídos em que a frequência predominante seja muito baixa, como é o caso do ruído dos AVAC. A figura 3.19 apresenta a redução sonora dos diferentes tipos de materiais utilizados na construção em função da sua densidade.

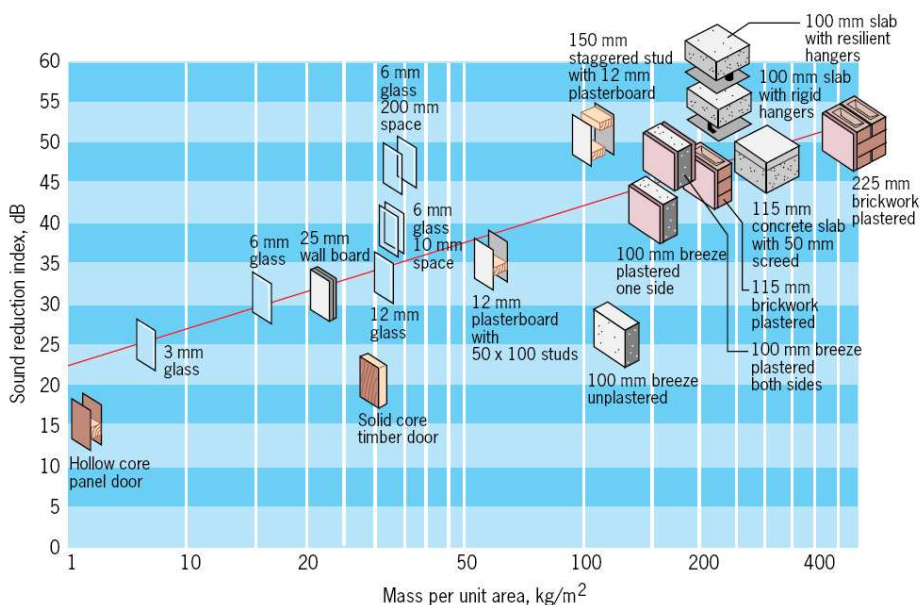


Fig. 3.19 - Valores típicos da redução sonora em elementos de construção [2]

3.5.3 RUÍDOS DE PERCUSSÃO

Quando existe uma solicitação mecânica directa o ruído propaga-se não só pelo ar mas pela estrutura que está a ser solicitada. O ruído de percussão é resultante de vibrações internas que os materiais da estrutura sofrem e é definido através da expressão seguinte:

$$L'_{nT} = L_i - 10 \log(T / T_0) \quad (dB) \quad (3.23)$$

Com:

L'_{nT} – Nível de pressão sonora de percussão, padronizado;

L_i – Nível de pressão sonora médio medido no compartimento receptor;

$10 \log (T/T_0)$ – correcção devida às condições de reverberação do compartimento receptor;

T – tempo de reverberação do compartimento receptor (s);

T_0 – tempo de reverberação de referência, em geral $T_0 = 0,5$ s mas pode tomar outro valor definido no projecto de dimensionamento.

Os ruídos de percussão transmitem-se através da via estrutural do edifício, como é exemplo a figura 3.19. Por norma as salas destinadas à aprendizagem não requerem isolamento a ruídos de percussão, ao contrário de ginásios ou salas de convívio em que as solicitações mecânicas são comuns.

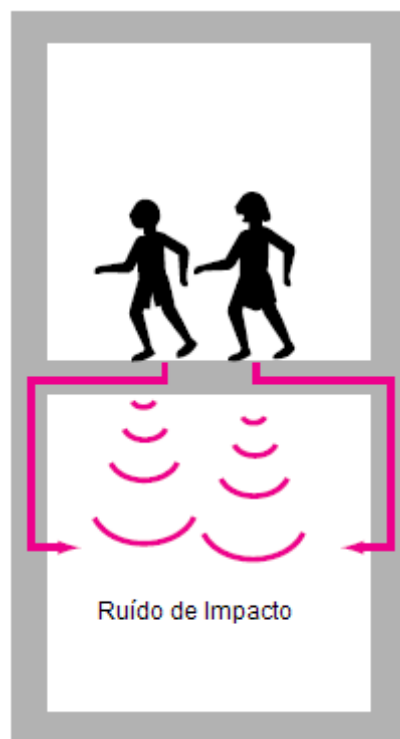


Fig. 3.18 - Transmissão dos ruídos de percussão [adaptado de 2]

4

A INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA

A transmissão de palavras num determinado espaço, efectuada entre um transmissor e o receptor, poucas vezes é recebida de uma forma totalmente clara e perfeita por parte deste último, isto é, raramente corresponde a uma réplica exacta do sinal original. Quando se está em ambientes ruidosos nem sempre é possível conversar sem quase gritar e mesmo assim por vezes é difícil conseguir fazer-se perceber ou ouvir.

No caso de crianças o problema é mais grave, pois elas não têm ainda definidas estratégias, hábitos ou vocabulário suficiente para uma correcta comunicação verbal. A acústica de uma sala destinada à aprendizagem é fundamental para que o que se ensina seja inteligível, principalmente quando são expostos a assuntos novos ou quando a exposição exige uma outra actividade em simultâneo.

A inteligibilidade da palavra pode ser afectada e reduzida através da influência de determinadas distorções. O ruído de fundo é a principal característica a provocar diminuição da inteligibilidade da palavra. Quanto mais alto é o nível sonoro e o número de fontes, pior funciona a capacidade de Ouvir, Prestar atenção, Compreender, Assimilar, Aprender ou Concentrar. O ruído externo às escolas foi o primeiro a ser abordado e regulamentado em Portugal. As primeiras legislações apenas exigiam que as escolas fossem localizadas em locais considerados pouco ruidosos. John Bradley faz várias referências ao longo dos seus trabalhos a diversos estudos, tais como o efectuado numa escola de Nova York em 1975 por Bronzaft. Este verificou um desfasamento de 3 a 4 meses de atraso na leitura entre os estudantes colocados nas salas perto do comboio e os da zona mais silenciosa da escola [70].

Destaca-se também a influência das reflexões do som e do tempo de reverberação das salas como características fundamentais para a qualidade da inteligibilidade da palavra.

A reflexão do som pode ser vantajosa ou indesejável e o tempo de reverberação curto ou longo. Um Tempo de Reverberação longo/alto faz com que o som se prolongue mais tempo no ar fazendo com que as palavras sejam atropeladas pelas seguintes. Um caso em que, ao contrário, é vantajoso ter tempos de reverberação altos é o de grandes salas de música clássica.

Para analisar a variabilidade da emissão da voz, temos que considerar quatro factores, sendo eles a Frequência, a Intensidade, a Duração e a Direccionalidade [5]. No que diz respeito à frequência de emissão esta pode variar numa escala muito vasta, delimitada entre os sons de baixa frequência até aos de alta frequência. No caso dos humanos o nível médio de audição está entre os 300 Hz e os 3000 Hz. Em relação à intensidade, o nível de pressão sonora varia entre o som mais fraco, o das consoantes; e o som mais forte, o das vogais; com uma diferença de cerca de 28 dB entre eles. A duração média das vogais é cerca de 90 ms enquanto as consoantes numa média de cerca de 20 ms. Em casos de elevados *TR*, a diferença entre vogais e consoantes faz com que as últimas sejam “apagadas” pelas primeiras,

resultando na perda da inteligibilidade. Em termos de direccionalidade, a voz humana emite preferencialmente para a frente do emissor, variando a direcção consoante a frequência como mostra a Figura 3.2 e com uma amplitude aproximada à Figura 4.1. O Quadro 4.1 resume a variabilidade de emissão entre vogais e consoantes.

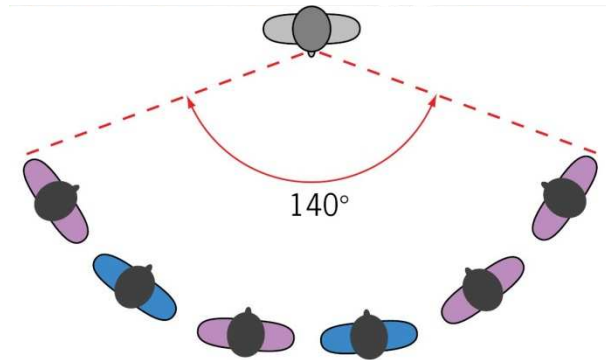


Fig. 4.1 - Direccionalidade frontal da voz [2]

Quadro 4.1 - Variabilidade da emissão da voz entre vogais e consoantes [5]

Tipo	Frequência	Intensidade	Duração	Direccionalidade
Vogais	Baixas	Elevado	≈ 90 ms	-5 dB p/ -180°
Consoantes	Altas	Baixo	≈ 20 ms	-20 dB p/ -180°

4.1 PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DA INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA

Os métodos mais utilizados para avaliar a qualidade da inteligibilidade da palavra dividem-se em dois tipos, os objectivos e os subjectivos, apresentados resumidamente no quadro 4.2.

Quadro 4.2 - Parâmetros de avaliação da inteligibilidade

Subjectivos	PB (<i>Phonetically Balanced words</i>)
	MRT (<i>Modified Rhyming Tests</i>)
Objectivos	AI (Índice de Articulação)
	SIL (Nível de interferência na Conversação)
	AC (<i>Articulation Class</i>)
	STI e RASTI (<i>Rapid Speech Transmission Index</i>)

Os métodos subjectivos dependem da intervenção humana, o que faz com que as respostas tenham um carácter muito subjectivo. Consistem, de uma forma simplista, em colocar em diferentes pontos da sala, auditores que vão registando num papel o que ouvem. No final, confrontam-se as palavras ditadas com as entendidas, para poder atribuir um grau de clareza das palavras, isto é, o grau de inteligibilidade. Dos métodos objectivos o mais utilizado é o RASTI, este é mais simples que o STI – *Speech Transmission Index* – e varia entre 0 (inteligibilidade nula) e 1 (inteligibilidade óptima). A simplicidade do RASTI perante o STI é porque o primeiro só regista os valores centrados nas bandas de oitava dos 500 Hz e dos 2000 Hz através de uma máquina portátil (ver fig. 4.2). O STI utiliza todas as bandas de oitava, dos 125 Hz aos 8 kHz.



Fig. 4.2 - Unidade emissora para emissão do RASTI [58]

Outro método é o AI – Índice de Articulação – que consiste em medir o ruído de fundo (rf) e depois subtrair este ao nível de conversação de referência (nc) e multiplicar o resultado pelos diferentes pesos atribuídos a cada banda de frequência. Por fim faz-se o somatório de todos os valores e divide-se por 10.000 para obter o índice de articulação a que corresponde um grau de inteligibilidade. Os quadros 4.3 e 4.4 representam respectivamente o método e a avaliação subjectiva para a inteligibilidade.

Quadro 4.3 - Método de avaliação subjectivo AI – Índice de articulação [5]

Freq. (Hz)	Nível de conversação (nc)	Peso (p)	Ruído de fundo (rf) em dB	nc-rf (Max. 30)	(nc-rf) . p
250	72	18			
500	73	50			
1000	78	75			
2000	63	107			
400	58	83			
				$\Sigma =$	
				$AI = \Sigma / 10.000 =$	

Quadro 4.4 - Classificação subjectiva do AI [8]

AI (Índice de Articulação)	Grau de privacidade	Grau de inteligibilidade
< 0,05	Confidencial	Nula
[0,05 – 0,20[Normal	Fraca
[0,20 – 0,30[Marginal/pobre	Boa
≥ 0,30	Muito pobre ou nulo	Muito boa

AI Cons é outro método ligado ao facto de ser menor a informação contida nas vogais (AI Cons – *Articulation Loss of Consonants*) mas este tem pouca aplicação.

Uma versão mais actual e melhorada do índice de articulação é o SII – Índice da Inteligibilidade da Palavra ou *Speech Intelligibility Index* – que vem descrito na norma americana ANSI S3.5 – 1997 [45]. O quadro 4.5 relaciona os valores do AL Cons com os valores do STI/RASTI de forma subjectiva.

Quadro 4.5 - Relação entre os valores do AL Cons e o STI/ RASTI face à inteligibilidade. [8]

AL Cons	STI/RASTI	Inteligibilidade
1,4 – 0	0,88 – 1	Excelente
4,8 - 1,6	0,66 – 0,86	Boa
11,4 – 5,3	0,50 – 0,64	Aceitável
24,2 – 12	0,36 – 0,49	Pobre
46,5 – 27	0,24 – 0,34	Má

O *BB93* apresenta 0,60 como valor mínimo para o *STI*, para salas de aula em *open-plan* e locais de estudo. Um valor superior 0,75 é o apropriado.

A figura 4.3 apresenta o resultado da variação sinal/ ruído numa sala de aula, os lugares mais afastados do professor encontram-se a vermelho porque a relação é inferior a 10 dB. Como mencionado anteriormente é fundamental que a diferença entre a voz do orador e o ruído de fundo seja superior a 10 dB.

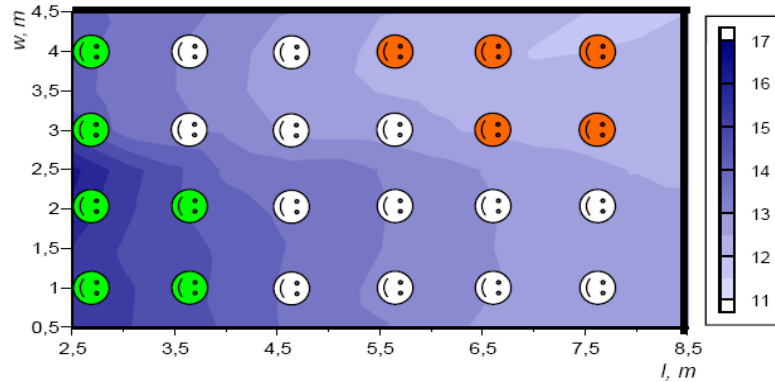


Fig. 4.3 - Influência da relação sinal/ ruído numa sala de aula [23]

Outra forma de avaliar a inteligibilidade da palavra é através de relações energéticas. Um parâmetro objectivo exemplo de tais relações é a Claridade, dada pela razão entre a energia recebida nos primeiros milionésimos segundos e a recebida posteriormente. No caso da voz este parâmetro vem acompanhado do índice 50, que quer dizer 50 ms de recepção de energia. A Claridade para a voz (C_{50}) resulta então na relação entre a energia transmitida pelo orador nos primeiros 50 ms que alcança o auditor via directa e a energia que alcança posteriormente.

$$C_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{50} p^2(t) dt}{\int_{50}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (dB) \quad (4.1)$$

A Claridade da voz aumenta cerca de 1,3 dB quando a sala em estudo está ocupada, relativamente aos resultados obtidos para a sala desocupada de alunos [9]. Outro parâmetro acústico é a Definição da voz (D_{50}) e tal como a Claridade também se refere aos primeiros 50 ms. A definição é dada pela razão entre a energia recebida e a energia total do estímulo, esta relação energética foi proposta por *Thiele* em 1953 [5] e associa-se à perceptibilidade da palavra.

$$D_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{50} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (dB) \quad (4.2)$$

4.2 DIFICULDADE DE APRENDIZAGEM

A crescente preocupação em obter conforto nas escolas e alcançar soluções energéticas mais sustentáveis levou a investigações nas diferentes áreas ligadas à construção e reabilitação de edifícios. As exigências a nível da Iluminação, dos AVAC (Aquecimento Ventilação e Ar Condicionado) e da salubridade do espaço bem como os requisitos térmicos são tidas em atenção na realização de uma escola. Com a acústica o mesmo ainda não acontece.

Estudantes e alunos necessitam de salas com boa qualidade acústica para que as barreiras sonoras que perturbam a educação sejam eliminadas. Existem por isso condições que afectam professores e alunos que prejudicam a educação, nomeadamente o facto dos alunos até aos 14 anos de idade, se encontrarem numa fase de desenvolvimento da língua materna e necessitarem por isso de entender na perfeição a mensagem transmitida. O facto de muitas das salas utilizadas nas escolas, serem também destinadas a alunos com determinados problemas de aprendizagem, justifica uma especial atenção na preparação e adequação dos espaços. No que diz respeito aos professores, estes deverão ser capazes de utilizar uma intensidade e tom de voz o mais livre possível de stress vocal. Pode-se ainda referir o facto de algumas escolas possuírem ensino para adultos, o que poderá trazer mais responsabilidades na concepção dos espaços, uma vez que esses alunos podem ser portadores de algumas limitações a nível auditivo.

Existem diversos motivos que fazem de algumas escolas, espaços com fraca qualidade acústica. Destaca-se os ruídos externos ao edifício, provenientes de ruídos de tráfego; os ruídos gerados por equipamentos tais como, os computadores, o vídeo projector ou a ventilação; os ruídos provenientes de espaços adjacentes ou de outras zonas das salas em que a divisão é feita por paredes amovíveis ou por paredes de construção leve; e até mesmo salas que possuem demasiadas superfícies reflectoras capazes de criar excesso de reverberação.

Quadro 4.6 - Valores máximos do ruído de fundo e do tempo de reverberação [adaptado de 1]

Espaço de aprendizagem consoante o volume	Nível sonoro contínuo equivalente ($L_{Aeq,60min}$) do ruído de fundo (dB)	Tempo de reverberação máximo nas bandas centradas nos 500, 1000 e 2000 Hz (s)
$V \leq 283 \text{ m}^3$	35	0,6
$283 < V \leq 566 \text{ m}^3$	35	0,7
$V > 566 \text{ m}^3$	40 ^{a)}	^{b)}

a) Se os corredores tiverem simplesmente a função de passagem pode-se admitir 45 dB.

b) Nestes casos deve-se proceder ao tratamento com materiais absorventes em 75% da área total.

As fontes de ruído existentes na escola, são amplamente responsáveis pelo ruído ambiente que a escola tem. Estas contribuem para o ruído de fundo que é um dos principais factores a influenciar a inteligibilidade da palavra. As políticas de poluição sonora começam a ser implementadas e a preocupação da sociedade já levou a variados estudos sobre de que forma é que o ruído nos afecta.

Numa fase inicial a análise acústica deve passar pela identificação da envolvente da escola, se possível através de medições dos níveis sonoros. Os níveis de ruído da envolvente da escola são resultantes das fontes de ruído externas, estas devem ser identificadas e caracterizadas sob o ponto de vista acústico. A análise das fontes de ruído exteriores deve ficar a cargo das autoridades municipais, segundo o RGR [29], fazendo parte dos mapas municipais de ruído e consoante os indicadores de ruído, inserir ou não planos municipais de redução de ruído.

O ruído, tipo de pavimento, dimensões e geometria da estrada, bem como a informação do tráfego (tipo e números de veículos, velocidades máximas, etc.) são introduzidos numa base de dados como é exemplo o *GIS – Geographic Information System*; o que permite analisar e visualizar o problema à grande escala. Actualmente em Portugal, encontram-se em fase de implantação os Planos Municipais de Redução de Ruído, que irão quando terminados, permitir identificar zonas críticas em que são excedidos os valores regulamentares de ruído. A previsão dos níveis sonoros na fachada da escola e dentro de uma sala de aula, através de métodos empíricos é a segunda fase. Estas medições são efectuadas recorrendo a normas, em que se dispõem de um emissor e de um receptor posicionado a 2,0 metros da fachada. procede-se à aplicação de soluções minimizadoras de ruídos que passam pela repavimentação de estradas, colocação de barreiras acústicas, restrições no trânsito, troca de janelas, colocação de materiais absorventes e controlo dos aparelhos de aquecimento, ventilação e ar condicionado. As prioridades são função do número de alunos e salas de aula afectadas, bem como dos custos que as diferentes remodelações e reabilitações exigem. Estes autores [14] aplicaram a metodologia descrita à cidade de Nápoles.

4.3 FONTES DE RUÍDO

4.3.1 RUÍDO INTERNO

As fontes de ruído interno (fig. 4.4), analisadas para se obter qualidade acústica numa escola não são sempre “fontes fixas” como acontece com o ruído de equipamentos mecânicos. Por fontes internas entende-se todo o ruído associado à vida laboral do edifício, tais como todos os sons resultantes unicamente da actividade no espaço, como por exemplo os risos e as conversas paralelas, que conforme aumentam de intensidade, levam a que se tenha que elevar o volume de transmissão de voz para ultrapassar o ruído de fundo e garantir uma melhor inteligibilidade da palavra.

A arquitectura da escola apresenta aqui um peso elevado tal como o processo construtivo das paredes, tectos e pisos. No caso de um edifício novo é essencial analisar bem cada um dos aspectos mencionados, enquanto que tratando-se de uma reabilitação ou de má arquitectura, estes não se podem corrigir por si só.

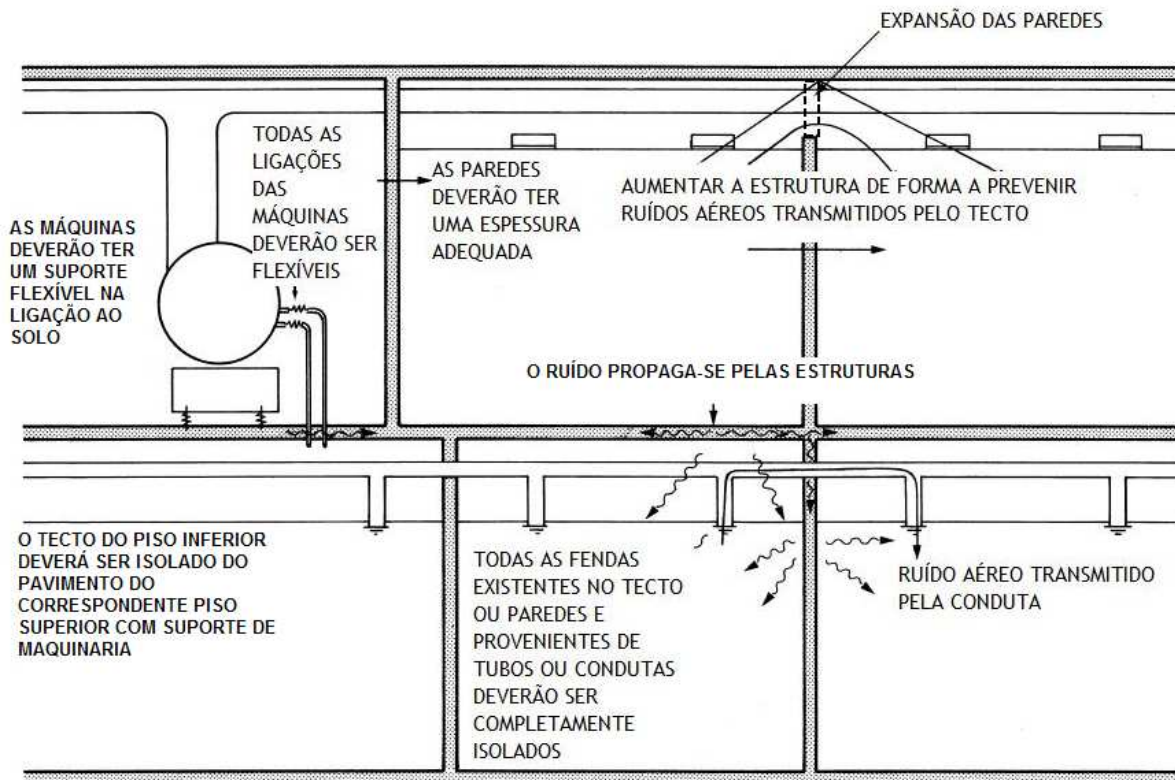


Fig. 4.4 – Exemplos de fontes de ruído internas [adaptado de 2]

4.3.2 RUÍDO EXTERNO

As fontes de ruído externo, são aquelas provenientes da envolvente da escola. O ruído ambiental, provocado pelo tráfego rodoviário, ferroviário e/ou aéreo, pelas indústrias e actividades económicas instaladas e por máquinas e equipamentos provisórios, todos eles dentro na envolvente da escola. A possibilidade de determinar o mapa de ruído da envolvente da escola é uma medida a tomar, envolvendo aspectos de planeamento que não são tratados neste trabalho e que não teriam sentido uma vez que, a obrigatoriedade dos planos municipais de redução de ruído é já um projecto em curso. O efeito maléfico deste tipo de ruído é tanto maior quanto menor for a preocupação com o isolamento sonoro e com a qualidade sonora ambiental.

Pormenorizar esta directriz é essencial para que a aprendizagem ocorra em boas condições acústicas. Vários estudos [14,49,50] foram feitos para tentar perceber por exemplo, qual a influência do tráfego aéreo na aprendizagem das crianças. Concluí-se que fontes de ruído externo pontuais, como por exemplo obras na via pública, têm um efeito mais gravoso na concentração da criança do que as fontes de ruído externo lineares, como no caso do tráfego aéreo.

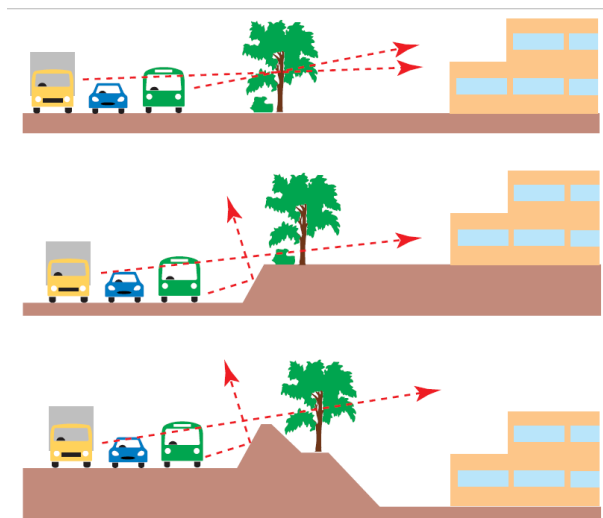


Fig. 4.5 - Diferentes formas de protecção do ruído de tráfego [2]

4.3.3 RUÍDO DE EQUIPAMENTOS

As principais fontes de ruído de equipamentos existentes em edifícios escolares são os sistemas de ventilação, climatização e aparelhos electrónicos (computadores, retroprojector, etc). O ruído total de equipamentos mecânicos pode ser medido através de várias metodologias, por exemplos através das designadas “curvas de incomodidade”, que avaliam os diferentes níveis de pressão sonora consoante a intensidade da fonte sonora.

É importante que os aparelhos sejam estudados antes de colocados, isto é deve-se prever o incómodo que um determinado equipamento irá causar à qualidade acústica do espaço. A Figura 4.6 apresenta

uma situação de aprendizagem muito comum actualmente e ao mesmo tempo mais uma fonte de ruído na sala de aula. Esta última não é inserida nos estudos que abordam este tema por se considerar uma fonte fraca ou inexistente nos estilos de aprendizagem até à data.



Fig. 4.6 - Nova ferramenta de aprendizagem - Computador portátil "Magalhães" [10]

No caso de ruído causado por grandes equipamentos, tais como, elevadores, tubagens, aquecimento, ventilação e ar condicionado, a quantificação deste tipo de ruído é feita na seguinte expressão:

$$L_{Ar,nT} = L_A + K - 10 \log(T / T_0) \quad (dB) \quad (4.3)$$

Com:

$L_{Ar,nT}$ – Nível de avaliação padronizado;

L_A – Nível sonoro contínuo equivalente ponderado A, durante um intervalo de tempo especificado;

K – Correção devida às características tonais do ruído [$K=3 \text{ dB(A)}$]*;

$10 \log (T/T_0)$ – correção devida às condições de reverberação do compartimento receptor;

T – tempo de reverberação do compartimento receptor (s);

T_0 – tempo de reverberação de referência, em geral $T_0 = 0,5 \text{ s}$ mas pode tomar outro valor definido no projecto de dimensionamento.

* Um ruído é considerado “tonal” caso pelo menos uma banda de 1/3 de oitava ultrapasse 5 dB em relação às bandas adjacentes.

Alguns exemplos das curvas de incomodidade são:

- NC (*Noise Criterion*) – proposta por Leo Beranek em 1957, aplica-se a oito bandas de oitava entre os 63 Hz e os 8 kHz através do método da tangente. A recta tangente intersecta as curvas e a que for intersectada inferiormente é a curva que não é ultrapassada para nenhum nível de pressão sonora^[5], a fig. 4.7 apresenta as diferentes curvas NC..

- NR (*Noise Rating*) – Kosten & Van Os propôs estas curvas em 1962, este método é muito parecido ao NC, aplicando na mesma oito bandas e o método da tangente. Estas curvas são mais utilizadas e encontram-se normalizadas através da norma ISO [5]. A Figura 4.8 apresenta as curvas NR.

As curvas de incomodidade são bastante úteis durante a selecção dos equipamentos mecânicos a utilizar em espaços destinados à palavra. Para atingir um nível sonoro baixo é desejável que os equipamentos tenham índices NC ou NR iguais ou menores que 30. O método das curvas de incomodidade NR tem grande utilização na Europa. A colocação dos níveis de pressão sonora num espectro como o da figura seguinte permite classificar o incómodo causado pelo equipamento. As bandas de frequência em que o nível sonoro ultrapassa a curva desejada são facilmente detectadas, facilitando o processo de correcção, necessário quando se aproveitam equipamentos existentes.

Quando os equipamentos mecânicos ultrapassam os índices de incomodidade e não é possível substituí-los é conveniente proceder ao seu isolamento. No caso das condutas de ventilação à vista, a solução passa pelo seu revestimento com material absorvente (ex: lã mineral) enquanto que nas ventoinhas de extracção, a solução pode ter de passar pela colocação de atenuadores. Uma boa arquitectura das condutas no edifício e a escolha adequada dos equipamentos são pontos fundamentais a considerar em fase de projecto para evitar custos de correcção futuros.

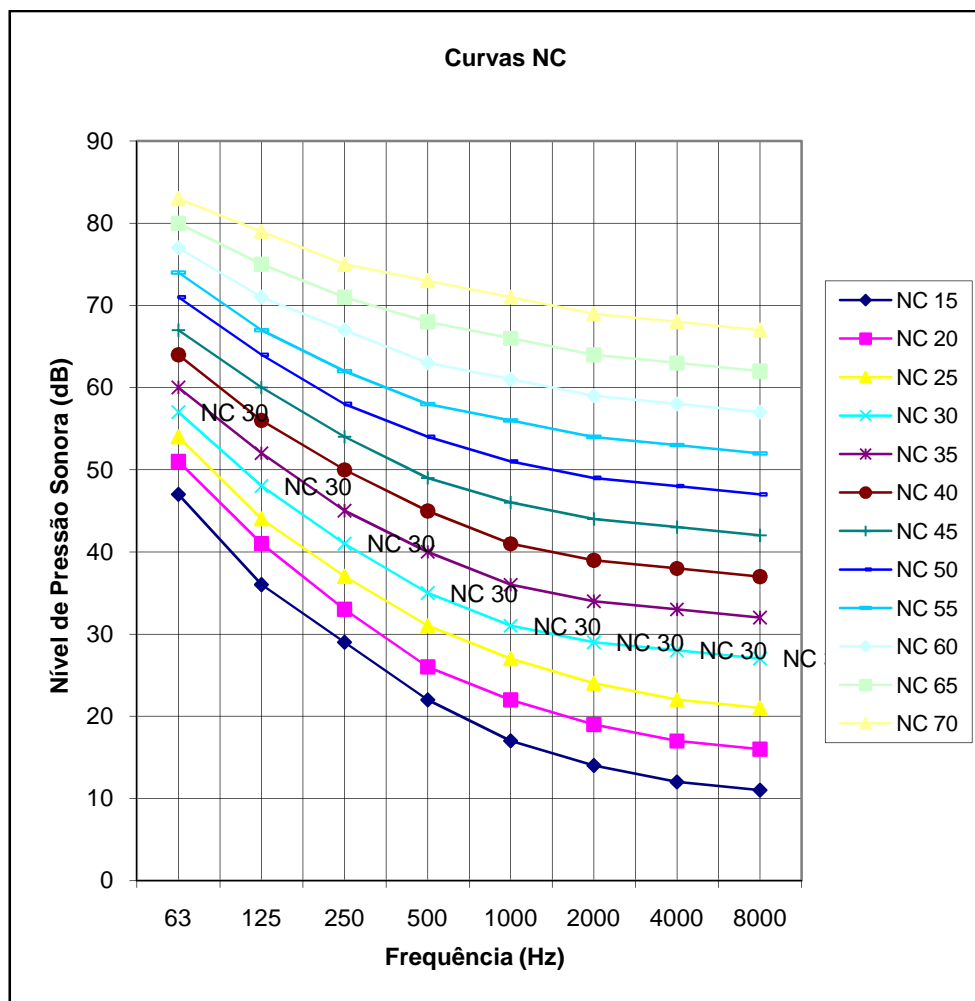


Fig. 4.7 - Curvas de incomodidade NC – “Noise Criterion”

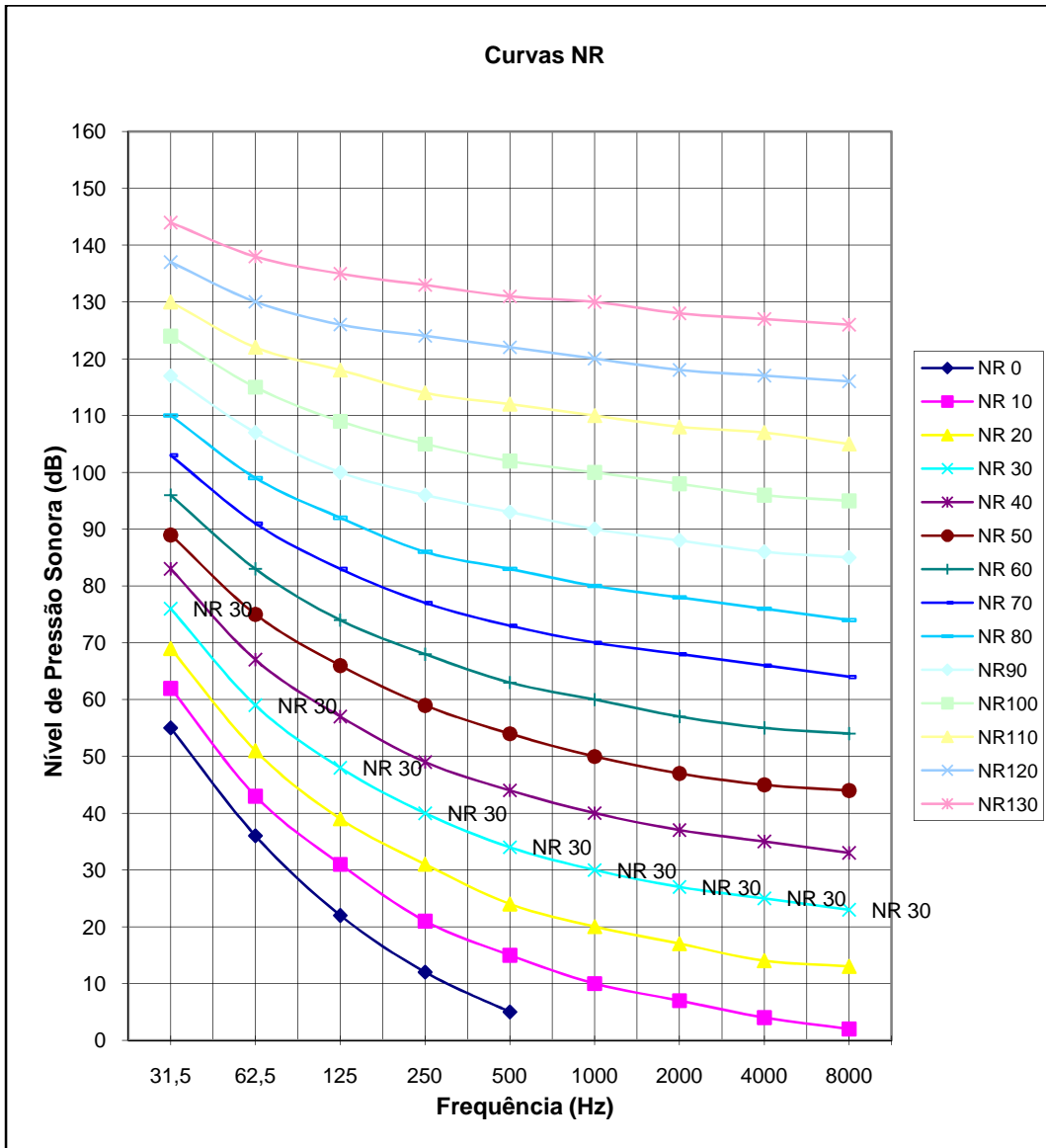


Fig. 4.8 - Curva de incomodidade NR – "Noise Rating"

4.4 A AMPLIFICAÇÃO SONORA

Os sistemas de amplificação sonora aplicados nas salas de aula têm como objectivo declarado melhorar a percepção do discurso do professor, de modo a facilitar a inteligibilidade da palavra e reduzir o esforço auditivo por parte dos alunos. É no entanto uma solução dispendiosa, pouco eficaz e só apropriada a salas destinadas ao ensino especial, como é o caso dos alunos com deficiências auditivas. O exemplo de uma sala equipada com amplificação sonora pode ser encontrado no subcapítulo 5.2 referente a salas com funções especiais.

Os sistemas típicos são compostos por um microfone disponibilizado para o professor e por vários altifalantes dispostos pelo espaço ao longo das paredes e tecto, de forma a distribuir o som pelos alunos. No entanto estes sistemas também são portadores de algumas limitações. Se estivermos numa sala cuja reverberação seja elevada, a amplificação poderá não resultar, uma vez que os sons irão exceder o volume aconselhável e por isso a inteligibilidade será novamente afectada. Conclui-se assim que para a aplicação de amplificação sonora deve-se considerar alguns ajustamentos no espaço de forma a reduzir o tempo de reverberação.

Outra contrariedade dos sistemas de amplificação sonora é o facto de amplificarem apenas a voz do professor, o que resulta em alguns problemas aquando da colocação de perguntas por parte dos alunos ou para a execução de trabalhos de grupo (fig. 4.9). A solução em algumas salas e escolas passa pela disponibilização de um segundo microfone, com o objectivo de ser passado de aluno em aluno aquando da colocação de perguntas ou explanação e debate de um tema. No entanto esta solução também pode acarretar alguns problemas, uma vez que obriga a uma sintonia perfeita entre os alunos que pretendem intervir e o local onde se encontra o microfone.



Fig. 4.9 – Exemplo de equipamento de amplificação sonora utilizado por professor [69]

Outra desvantagem tem haver com o facto do ruído aumentar de intensidade, podendo vir a causar problemas com salas adjacentes. As reflexões das ondas sonoras aumentam de número, tornam-se mais fortes e a clareza da palavra é comprometida. O problema de *feedback* oriundo dos locais onde se encontram os microfones pode também comprometer a utilização desta solução.

Perante os inconvenientes da amplificação sonora não é aconselhável a sua aplicação em salas de aula tradicionais, isto é, pequenas (≈ 22 alunos) e para ensino corrente. A adopção desta solução causa maus resultados acústicos. O aumento do nível sonoro e da intensidade das reflexões torna o ruído de fundo mais perturbador e consequentemente desfavorável para a concentração das crianças. Por outro lado, como mencionado anteriormente, a aplicação em salas para alunos de ensino especial pode ser conveniente, tal como em grandes salas de espectáculo, desde que o projecto seja acompanhado por um especialista na matéria. A colocação de material absorvente é nestes casos fundamental, visto ser necessário reduzir as reflexões indesejadas. A gama de frequências a absorver depende do tipo de actividade do espaço, no caso de se tratar de um espaço destinado à palavra é importante tratar as baixas frequências, onde as vogais se inserem. As vogais encontram-se mais perto das bandas centradas nos 125 Hz e 500 Hz. A figura 4.10 representa uma situação passível de se encontrar em escolas, o caso das salas de música. Nestes espaços é necessário proceder simultaneamente à correcção acústica do espaço e ao isolamento sonoro com os espaços adjacentes.

O ensino de música é habitual nas escolas do 2º e 3º ciclos, mas os instrumentos utilizados não são por norma amplificados como acontece em instituições de ensino superior ou especializado na área. Por esta razão e por não fazer parte do âmbito deste trabalho este tipo de salas não é aprofundado.



Fig. 4.10 - Arranjo de um sistema de amplificação numa sala de música [61]

5

A QUALIDADE ACÚSTICA NOUTROS ESPAÇOS DA ESCOLA

5.1 CARACTERIZAÇÃO DA ESCOLA

Este capítulo aborda de uma forma sintetizada os principais espaços de uma escola, mas sem incidência nas salas de aula que são alvo de análise no capítulo 8.

Os factores de aprendizagem e convívio em ambiente escolar dependem da área que se está a leccionar, do número de alunos presentes e principalmente do género de indivíduos presentes. É por esse motivo que se optou por dividir os espaços da escola em três grupos, definidos da seguinte forma: salas com funções especiais, destinadas a indivíduos com dificuldades a nível auditivo, sejam eles crianças ou adultos; bibliotecas e salas de estudo, sendo estes compartimentos destinados ao trabalho individual ou em grupo, mas não à instrução de matéria por parte do professor; espaços ruidosos, que geralmente são de grande dimensão e sujeitos a muita circulação, tais como, corredores, refeitórios, ginásios. As salas de música ou auditórios não foram alvo de análise como mencionado anteriormente.

5.2 SALAS COM FUNÇÕES ESPECIAIS

Uma recente pesquisa efectuada pela “*British Association of Teachers of the Deaf*” [2] revela que 75% das crianças inglesas deficientes auditivas, são educadas em escolas não dedicadas ao ensino especial. Acrescenta-se à percentagem de crianças deficientes auditivas, um vasto número de crianças com dificuldades de audição, colocadas em salas de ensino comuns. Temos como exemplo, as crianças com limitações ao nível da fala e da audição, as crianças com uma diferente língua materna, as crianças com incapacidades visuais, as crianças com deficiências psico-motoras e as crianças com limitações ao nível do raciocínio. A Figura 5.1 mostra a posição mais favorável ao aluno com deficiência auditiva, sendo que a sua localização ao lado do professor e quase centrada em relação aos altifalantes, está provida de poucas reflexões, bem como de pouca distância ao orador.

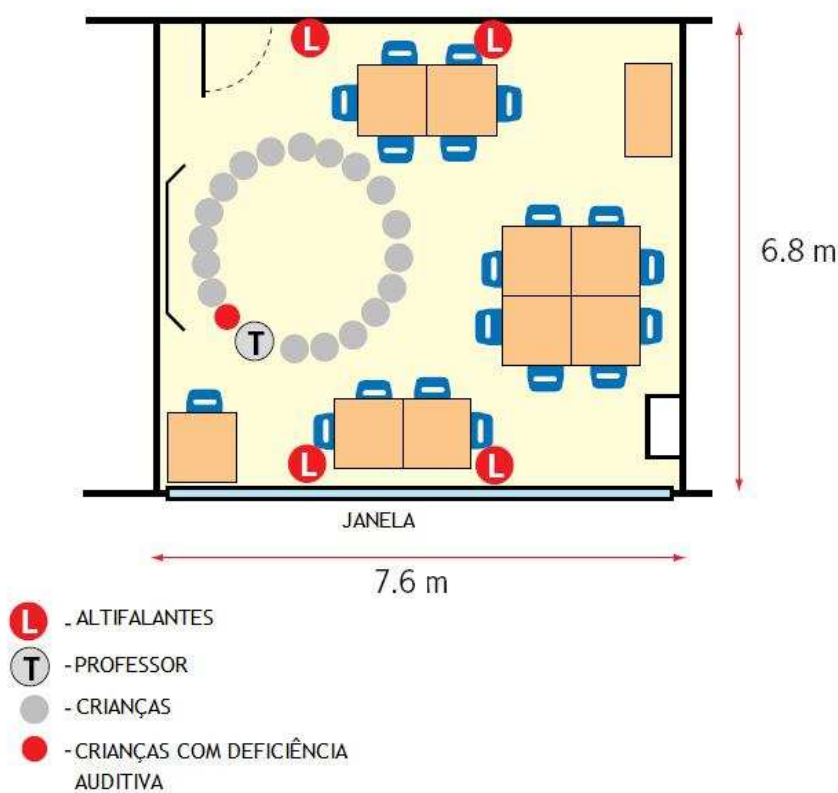


Fig. 5.1 - Posição correcta do aluno com deficiência auditiva e dos altifalantes numa sala de aula para crianças pequenas [adaptado de 2]

O quadro 5.1 apresenta valores recomendados de parâmetros acústicos, tais como, nível sonoro, tempo de reverberação e relação sinal/ruído, fornecidos por duas importantes instituições denominadas “*British Association of Teachers of the Deaf*” (BATOD) e “*American Speech Language Hearing Association*” (ASHA) [2]. A figura 5.2 apresenta diferentes actividades que ocorrem em salas de aula para crianças com e sem deficiências auditivas. A diferença entre os dois grupos de crianças é claramente visível quando o professor ensina a matéria sem que haja contacto visual, os valores aproximam-se quando se está em silêncio ou no caso em que o professor caminha.

Quadro 5.1 - Recomendações da BATOD e da ASHA para salas de aula [2]

Parâmetros Acústicos	British Association of Teachers of the Deaf	American Speech Language Hearing association
Nível sonoro ^{a)}	35 dB A	30 – 35 dB A
Tempo de reverberação ^{a)}	0,4 s ^{b)}	0,4 s
Relação sinal/ruído	+ 20 dB ^{c)} + 15 dB ^{d)}	≥ +15 dB

- a) Em salas desocupadas e mobiladas
- b) Para frequências entre os 125 Hz e os 4 kHz
- c) Para frequências entre os 125 e os 750 Hz
- d) Para frequências entre os 750 Hz e os 4 kHz

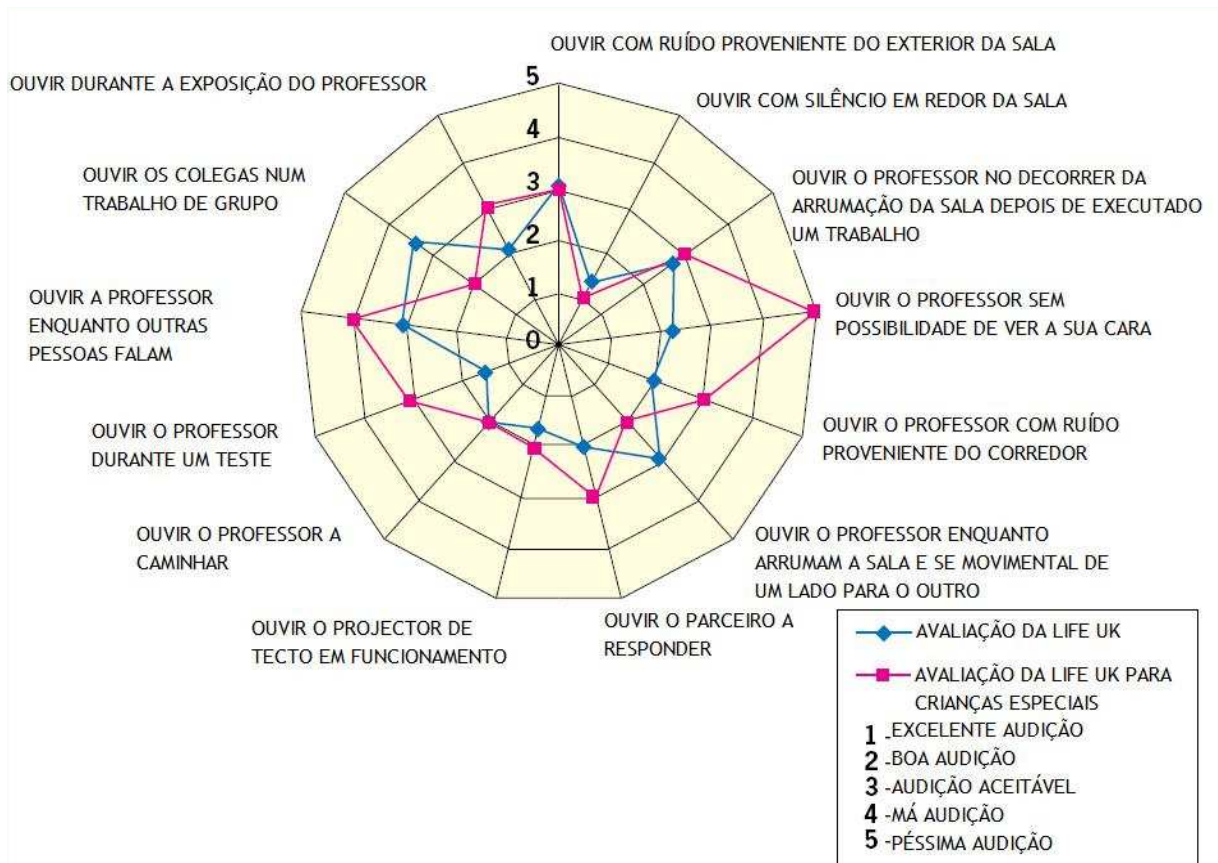


Fig. 5.2 - Resultados de estudo elaborado pela LIFE UK a uma sala de aula [adaptado de 2]

5.3 BIBLIOTECAS E SALAS DE ESTUDO

As bibliotecas e salas de estudo devem comportar-se como salas de aula isto é, devem possuir o mesmo *TR* máximo e os níveis sonoros devem ser baixos. A particularidade destas salas, pode estar na necessidade de tratar espaços de forma a poder realizar trabalhos em grupo, em simultâneo com estudo individual, onde por isso se exige um reduzido ruído de fundo e correspondente aumento da absorção sonora.

As curvas de incomodidade apresentadas no subcapítulo 4.3.3 referente a ruídos de equipamentos têm na análise de espaços projectados para baixos níveis sonoros um peso muito importante. A obtenção de níveis sonoros de avaliação do ruído de fundo a rondar os 35 dB (A), implica que a sala tenha uma correcção acústica apropriada. A Figura 5.3 apresenta uma solução satisfatória quando se pretende absorver as médias e as altas frequências. O recurso a materiais porosos e fibrosos, suspensos no tecto e colocados nas paredes, faz com que a área das superfícies de absorção cresça e consequentemente se reduza o tempo de reverberação.



Fig. 5.3 - Aplicação de materiais absorventes suspensos ou *baffles* [63]

A localização sossegada das salas de estudo tradicionais, bem como das bibliotecas, tem um peso significativo no valor do nível sonoro a que a sala está sujeita. Uma das soluções passa por separar ginásios e espaços de recreio de zonas destinadas à aprendizagem. Os espaços ruidosos e de recreio sofrem movimentações mecânicas constantes e vários tipos de colisão. Os ruídos causados por forças mecânicas espalham-se através da estrutura de uma forma rápida e persistente.

A importância do isolamento sonoro surge quando os níveis de ruído na envolvente exterior à sala são elevados ou quando se trata de isolar ruídos de percussão como acontece com os aparelhos de ar condicionado, ventilação e aquecimento (AVAC). Dada a evolução causada pelas novas tecnologias em bibliotecas é frequente o uso de computadores, sendo estes responsáveis por ruídos de baixas frequências. A previsão de locais onde a realização de trabalhos de grupo possa ter lugar é outra das principais regras para que a escola funcione com o ambiente sonoro desejado em cada espaços. Este tipo de espaço é comum em escolas de grande dimensão e geralmente encontra-se na zona da biblioteca e salas de estudo. O quadro 5.2 apresenta os valores recomendados pela ANSI S12.60 e pelo BB93.

Quadro 5.2- Parâmetros Acústicos Recomendados para Bibliotecas [1,2]

Parâmetros Acústicos	ANSI S12.60 [1]	BB93 [2]
Nível Sonoro	≤ 35	≤ 35
Tempo de Reverberação	$\leq 0,7$	≤ 1
STI ou RASTI	$\geq 0,75$	$\geq 0,65$

5.4 ESPAÇOS RUIDOSOS

Os espaços de grande dimensão podem não ter a função de instrução verbal ou comunicação, como têm geralmente os auditórios. Os refeitórios, bares, corredores e espaços de recreio não necessitam de condições de inteligibilidade tal como acontece nas salas de aula ou auditórios. Enquanto nos ginásios, os esforços na aplicação da absorção sonora destinam-se a eliminar os diferentes ruídos provenientes de diferentes locais, nos auditórios os esforços são concentrados na capacidade de reforçar o som do orador e fazê-lo chegar a todo o espaço. Neste subcapítulo apresentam-se soluções simples mas nem sempre economicamente viáveis. Os projectistas, governantes e todos os demais envolvidos não devem desconhecer a problemática do ruído ambiente em espaços públicos. Os espaços ruidosos não dispensam correcções acústicas, pois quando isso acontece o incómodo aparece devido ao elevado nível de pressão sonora (Fig. 5.4). Um estudo efectuado na Escola 2º e 3º Ciclo de São Bernardo em Aveiro mostra valores da ordem dos 75 dB(A) como mostra o quadro 5.3 [12].

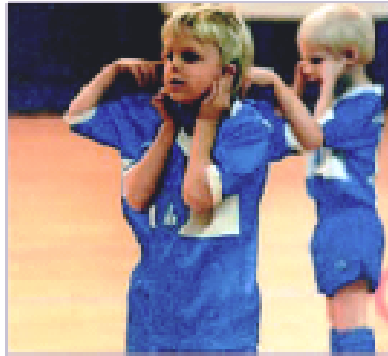


Fig. 5.4 - Incómodo em espaços ruidosos [10]

Quadro 5.3 - Resultados da avaliação dos níveis sonoros na Escola São Bernardo em Aveiro [12]

Descrição do local	LAeq dB(A) Ruído Residual	LAeq dB(A) Ruído Ambiente	Ruídos Audíveis
Recepção	56,2	---	Pássaros, funcionária a lavar os vidros, professores e alunos a conversar
Bar dos alunos	64,1	76,8	Empregadas do bar, alunos no bar e nos matraquilhos, frigorífico
Salas dos professores	68,3	---	Professores no bar, empregadas do bar, máquina da louça
Pavilhão (aula de Educação Física)	60,5	77,1	Ginástica, exercícios de basquetebol, professora e alunos a conversar
Corredor do 1º andar	63,2	91,3	Alunos a saírem e a entrarem nas aulas
Corredor do R/C	58,0	83,5	Alunos a saírem das aulas

Os espaços de grande dimensão, tais como, ginásios, pavilhões desportivos e piscinas possuem tempos de reverberação elevados, devido à natureza dos materiais utilizados na construção e devido claro, às suas grandes dimensões. O efeito destas condicionantes resulta em altos níveis de ruído e numa fraca inteligibilidade da palavra. Os corredores, espaços de grande circulação e ginásios são actualmente espaços integrantes da escola. Este tipo de espaço, dada a sua funcionalidade exige que os materiais possuam resistência e durabilidade, uma vez que estão sujeitos a ataques mecânicos. Existem no mercado produtos resistentes a este tipo de impacto, como é o caso do exemplo apresentado nas Figuras 5.5 e 5.6.



Fig. 5.5 – Ginásio com placas de 2 e 4 cm com alta densidade de lã de vidro e um NRC de 0,85 [64]

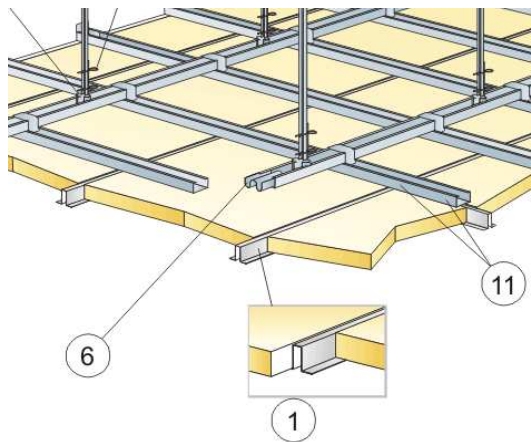


Fig. 5.6 - Pormenor na montagem das placas [11]

As placas de lã de vidro compactada com resinas sintéticas podem ser aplicadas de forma directa ou suspensa consoante o tipo de estrutura e dimensões do recinto a tratar. Os perfis metálicos são normalmente em aço galvanizado e dada a sua estrutura apertada confere ao sistema uma resistência elevada à compressão. A leve massa volúmica das placas é outra vantagem existindo porém sistemas de 10 kg/m^2 . A capacidade de reflectir a luz também é satisfatória sendo superior a 75% [11].

Outro tipo de solução é o *spray* de absorção acústica *K-13* à base de celulose. A figura 5.7 mostra a aplicação deste produto no tecto e parte superior das paredes num ginásio de uma Escola Básica em

Loures [71]. O quadro 5.4 apresenta os valores do NRC obtido para diferentes espessuras através da norma ASTM C 423. Os valores superiores à unidade são irrealis e por isso considera-se apenas a unidade para valor máximo.



Fig. 5.7 - Aplicação de K13 na Escola EB1 de Loures [71]

Quadro 5.4 – Coeficiente de Absorção Sonora [adaptado de 65]

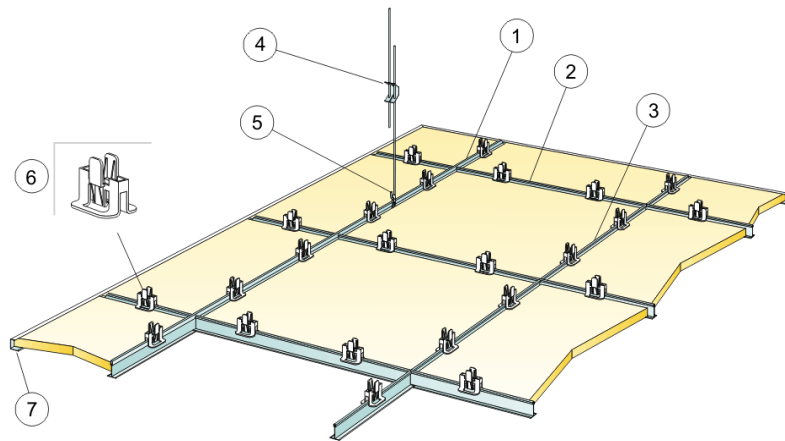
K -13 Spray de absorção acústica							
Mm	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	NRC
25	0,08	0,29	0,75	0,98	0,93	0,96	0,75
51	0,26	0,68	1,05	1,10	1,03	0,98	0,95
76	0,57	0,99	1,04	1,03	1,00	1,00	1,00

Os refeitórios e bares são espaços em que os impactos mecânicos não são tão elevados e a predominância de sistemas de exaustão é comum. Os materiais a aplicar devem respeitar exigências de salubridade. Existem disponíveis no mercado, diversos materiais devidamente robustos, higiénicos e com capacidade de absorção sonora, capazes de serem aplicados em espaços de alimentação, como os referidos. Normalmente estes materiais são aplicados nos tectos e em zonas mais elevadas das paredes. Um exemplo de sistemas aplicados no tecto é apresentado na Figura 5.8.



Fig. 5.8 - Área destinada à alimentação tratada através da aplicação de *baffles* [63]

Entre as soluções a aplicar, destacam-se nestes casos as placas de lã de vidro com alta densidade, revestidas por uma película de fibra de vidro. A sua aplicação faz-se através de grelhas fechadas em aço galvanizado com peso/densidade relativamente baixo(a) ($\approx 3 \text{ kg/ m}^2$), (Figura 5.9).



M199

© Ecophon Group

Fig. 5.9 – Tecto de sistema absorvente leve à base de lã de vidro [11]

6

LEGISLAÇÃO E NORMALIZAÇÃO APLICÁVEL

6.1 PORTUGAL

Em Portugal o primeiro regulamento nesta área surge no ano de 1987 intitulado Regulamento Geral sobre o Ruído e em 2007 é substituído através do DL 09/07 de 17 de Janeiro.

O DL 72/92 que visa a protecção dos trabalhadores contra o ruído vem a ser revogado em 15/02/2008, substituído pelo DL 182/06.

Actualmente, desde 1 de Julho de 2008, encontra-se em vigor o Regulamento de Requisitos Acústicos em Edifícios (DL 96/2008) que alterou o RRAE de 2002.

A necessidade de igualar conceitos e exigências no espaço da União Europeia foi o motivo da revisão da legislação anterior, tornando a questão do conforto e qualidade acústica um bem acessível a toda a sociedade.

O consenso entre os países da União Europeia é importante mas a o ideal é existir um acordo a nível mundial, englobando os Estados Unidos da América e todos os restantes países.

Segundo o art. 7.º do RRAE respeitante a “edifícios escolares e similares, e de investigação” os requisitos acústicos devem respeitar:

a) O índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, $D_{2m, nT, w}$, entre o exterior dos edifícios, como local emissor, e os compartimentos interiores identificados no quadro 6.1 presente no anexo do Regulamento, como locais receptores, deve satisfazer o seguinte:

i) $D_{2m, nT, w} \geq 33$ dB, em zonas mistas ou em zonas sensíveis reguladas pelas alíneas c), d) e e) do n.º 1 do artigo 11.º do Regulamento Geral do Ruído;

ii) $D_{2m, nT, w} \geq 28$ dB, em zonas sensíveis;

iii) $D_{2m, nT, w} + C$ ou C_{tr} , caso em que a área translúcida é superior a 60% do elemento da fachada em análise. Conforme o tipo de ruído, os termos de adaptação tomam os valores presentes e definidos na NP 717 – 1 e ponderados para o filtro A.

b) O índice do isolamento sonoro a sons de condução aérea entre locais do edifício, apresenta-se como $D_{nT, w}$ em que a plica no índice implica existirem transmissões marginais. Os valores a apresentar como mínimos são os indicados no quadro 6.1.

A norma de apoio à medição do isolamento sonoro a sons de condução aérea, padronizado é a EN ISO 140 – 4, enquanto que a EN 12354 – 1 diz respeito a projectos.

Nos quadros 6.2, 6.3 e 6.4 apresentam-se respectivamente, os valores do isolamento sonoro máximo a ruídos de percussão ($L'_{nT, w}$), o valor do tempo de reverberação (TR) e o nível de avaliação do ruído particular de equipamentos do edifício ($L_{A, nT}$) a respeitar.

Quadro 6.1 - Isolamento sonoro mínimo a sons de condução aérea ($D_{nT, w}$) entre locais do edifício, segundo RRAE [7]

Locais de recepção / Locais de emissão	Salas de aula(*), de professores, administrativas	Bibliotecas e gabinetes médicos	Salas polivalentes e berçários
Salas de aula, de professores, administrativas	45	45	45
Salas de aula musical, salas polivalentes, refeitórios, ginásios e oficinas	55	58	50
Berçários	53	55	48
Corredores de grande circulação (**)	30	35	30

(*) Incluindo salas de aula musical.

(**) Considerando que haverá porta de comunicação com os locais receptores; se tal não for caso, os valores indicados serão acrescidos de 15 dB.

Quadro 6.2 - Isolamento sonoro máximo a ruídos de percussão ($L'_{nT, w}$), segundo RRAE [adaptado de 7]

Local emissor	Isolamento sonoro a ruídos de percussão, $L'_{nT, w}$
Corredor de grande circulação, ginásio, refeitório ou oficina	60 dB
Salas de aula, berçário ou salas polivalentes	65 dB

Quadro 6.3 - Tempo de reverberação ($T_{500 \text{ Hz} - 2 \text{ kHz}}$), segundo o RRAE [adaptado de 7]

Locais	Tempo de reverberação (500 Hz – 2 kHz), s
Salas de aula, bibliotecas, salas polivalentes e refeitórios	$T_{500 \text{ Hz} - 2 \text{ kHz}} \leq 0,15 V^{1/3}$
Ginásios	$T_{500 \text{ Hz} - 2 \text{ kHz}} \leq 0,15 V^{1/3}$ $T_{500 \text{ Hz} - 2 \text{ kHz}} \leq 0,12 V^{1/3 \text{ a}}$

a) Caso o espaço esteja dotado com sistema de difusão pública de mensagens sonoras.

Quadro 6.4 - Nível sonoro contínuo equivalente ($L_{Ar, nT}$), segundo o RRAE [adaptado de 7]

Locais	Nível de avaliação, $L_{Ar, nT} \leq$
Bibliotecas	35 dB(A), se funcionamento intermitente
	30 dB(A), se funcionamento contínuo
Restantes locais de recepção indicados no quadro 6.1	40 dB(A), se funcionamento intermitente
	35 dB(A), se funcionamento contínuo

De entre os documentos informativos e normativos destacam-se os seguintes:

a) Normas de medições

EN ISO 140 – 4 (Ruídos aéreos)

EN ISO 140 – 4 (Ruídos de percussão)

EN ISO 717 – 1; C – termo de adaptação, em função das características espectrais do ruído na emissão. A anexar ao índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea.

EN ISO 717 – 2

EN ISO 354 - TR - coeficiente de absorção EN ISSO 11654

ANSI S12.60 – 2002

ASTM C 423

b) Normas de projecto

EN 12354 – 1

EN 12354 – 2

BB93 - 2003

6.2 OUTROS PAÍSES

Nos EUA a problemática da qualidade acústica em escolas surgiu quando as autoridades governamentais lançaram um programa de requalificação do parque escolar. O programa consistiu em reabilitar e construir escolas em todo o país. O orçamento de 7,9 biliões de dólares como referenciado em [28] era suficiente para se obter as condições ideais que um espaço destinado à aprendizagem deve possuir. O problema mencionado pelos autores de [28] deveu-se à inexistência de documentação para apoio dos projectos realizados pelos arquitectos, engenheiros e demais profissionais envolvidos. A problemática com algumas décadas de estudo não apresentava até o ano 2000 soluções acessíveis e concretas a aplicar por parte dos responsáveis do programa. Em 2002 é publicada pela ANSI S12.60 [1] fornecendo os Critérios e Requisitos Acústicos a ter em projectos de Escolas.

A publicação desta norma foi um grande passo na futura obtenção de bons locais de estudo. A qualidade do ambiente sonoro em escolas passou a ser debatida em vários países sendo que muitos eles seguiram as linhas gerais da ANSI S12.60 nos seus documentos.

No Capítulo 4, no quadro 4.6 estão apresentados os dois requisitos mais importantes segundo a norma ANSI S12.60, que estabelece limites para o nível sonoro do ruído de fundo e para o tempo de reverberação médio consoante o volume da sala.

Os valores de limite inferior do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea, padronizado ($D_{nT,w}$) de um elemento construtivo que separe uma sala de aula de outro qualquer espaço adjacente (ex: piso – tecto; tecto – telhado; paredes) estão apresentados no quadro 6.5. A abreviatura *STC – Sound Transmission Class* é corrente em documentos da especialidade nos EUA, sendo que a norma adopta os valores dos quadros 6.6 e 6.7.

Quadro 6.5 – Valores mínimos do $D_{nT,w}$ entre uma sala de aula e espaços adjacentes [adaptado de 1]

Espaço adjacente			
Outra sala de aula, estudo ou ensino especial	Uso comum e público, casas de banho ou balneários	Corredores, escadas, escritórios ou auditórios	Sala de música, sala de máquinas, bar, refeitórios e ginásios
50	53	45	60

Quadro 6.6 - Valores aproximados para exposição frequente a ruído de tráfego rodoviário [adaptado de 1]

Percentagem da área total de aberturas (%)	STC* (a subtrair) $D_{2m,nT,w}$ (dB)	
	Paredes e tectos	Portas e janelas
1 a 25	≥15	≥6
26 a 70	≥20	≥11

*STC = R_w

Quadro 6.7 - Valores mínimos do STC (R_w) recomendados pela ANSI S12.60 [adaptado de 1]

Espaços adjacentes ao local de aprendizagem	Corredor, caixa de escadas, casas de banho	Sala de música	Escritório, sala de conferências	Exterior	Equipamento mecânico, ginásios, bares, refeitórios, piscinas
Corredor	45	60	45	45	55
Sala de música	60	60	60	45	60
Escritório ou sala de conferências	45	60	45	45	60

A caracterização dos requisitos acústicos na norma ANSI S12.60 [1] permitiu a análise aos valores apresentados e a sua aplicação em fase de projecto. Por exemplo, o quadro 4.6, localizado no Capítulo 4, recomenda que o ruído de fundo numa sala de aula não ultrapasse os 35dB (A). Caso uma escola esteja exposta a um nível sonoro exterior superior a 70 dB(A) resultantes muitas vezes do tráfego rodoviário, o isolamento sonoro a ruídos de condução aérea padronizado terá que ser no mínimo 40 dB. O quadro 6.6 fornece a diferença aproximada da redução no isolamento sonoro causada, variando com a ocupação desse elemento na envolvente do edifício em estudo. Quando se trata de uma parede exterior totalmente exposta, é recomendado que o isolamento sonoro a ruídos de condução aérea padronizado mínimo seja de 40+20 dB. No caso de uma janela que ocupa 30% do elemento exposto o valor do $D_{nT,w}$ deve ser no mínimo igual a 51 dB. O tipo de fontes de ruído provenientes do exterior também é ponderado na ANSI S12.60, apresentando uma nota subjacente aos valores do quadro 6.7 que recomenda um ganho de 2 dB no caso de a escola estar exposta a ruído causado por tráfego aéreo.

Com vista a melhorar a qualidade dos espaços destinados aos diferentes tipos de aprendizagem foi editado no Reino Unido um boletim com as opções e cuidados a ter em fase de projecto e planeamento das escolas. O *Building Bulletin 93 – Acoustic Design for Schools (BB93)*[2] foi editado em 2003 completando a regulamentação até então existente referente ao comportamento a atingir por um edifício e substituindo o *Building Bulletin 87*.

O *BB93* divide-se em sete secções, a primeira parte abrange as secções 1 a 5 e expõem todas as definições e recomendações para se obter conforto acústico. O nível sonoro contínuo equivalente (L_{Aeq}), o isolamento sonoro a ruídos de condução aérea ($D_{nT,w}$), o isolamento sonoro a ruídos de percussão ($L'_{nT,w}$), o índice sonora (R_w), o tempo de reverberação (TR), a relação sinal/ruído (S/R) e a são . Dois exemplos de soluções a adoptar, numa sala destinada à palavra e outra à prática de música, fazem parte desta primeira secção. Os sistemas de isolamento sonoro e a aplicação dos materiais absorventes são também abordados. A secção 6 é dedicada a espaços destinados a terem funções especiais, isto é salas destinadas à aprendizagem por parte de crianças com incapacidades motoras e/ou deficiência auditiva. A amplificação sonora é neste género de espaço necessária mas só quando correctamente utilizada. O *BB93* apresenta uma análise de equipamentos a utilizar consoante a tecnologia utilizada (infravermelhos ou rádio) e realça a necessidade de cuidados a ter noutras

especialidades. A iluminação aparece alinhada com o tempo de reverberação, com o nível sonoro e com o isolamento sonoro. A última parte, secção 7 refere dez casos de estudo em que, de forma simples e prática, se fornece um elemento importantíssimo a seguir no caso de projectos semelhantes. A variabilidade dos temas apresentados passa pela sala de música, às salas para deficientes auditivos consoante a idade ou ao estudo de escolas em edifícios *open-space* onde a qualidade das divisórias amovíveis é fundamental.

A regulamentação Suíça recorre à norma DIN 18041 e estabelece um volume mínimo por pessoa para que as condições de reverberação sejam aceitáveis. O valor de 6 m³/ pessoa é aconselhado para o volume mínimo por pessoa. O tempo de reverberação é função, como acontece na fórmula de Sabine, do volume da sala. A expressão 6.1 define o tempo de reverberação como a média dos valores obtidos nas bandas de oitava centradas nos 500 Hz e 1000 Hz.

$$TR = 0,32 \log(V) - 0,17 \quad (6.1)$$

O objectivo a cumprir passa por não ultrapassar 0,2 s entre ter a sala ocupada ou vazia, a figura 6.1 refere essa relação.

Quadro 6.5 - Exigências acústicas na Suíça [43]

Exigências acústicas consoante a utilidade do local	Nível de ruído sonoro perturbador (L _{NA}) (dB)	Distância adaptada dos interlocutores		Adaptação a pessoas com incapacidades motoras ou perda auditiva	Adaptação à compreensão de textos difíceis ou línguas estrangeiras
		Média de 5 m	Média de d > 8 m		
Mínima	Forte	+	-	-	-
Moderada	Médio	+	o	o	O
Elevada	Fraco	+	+	+	+

“+” adaptado; “o” em parte adaptado; “-” Inadaptado

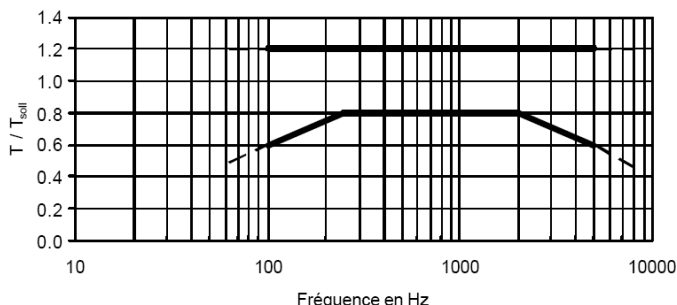


Fig. 6.1 - Zona de tolerância para o tempo de reverberação segundo a DIN 18041 [43]

As recomendações fornecidas por este documento são bastantes explícitas e facilmente entendidas por qualquer pessoa. A ilustração das soluções que passam pela colocação de material absorvente é uma mais valia deste documento, como se mostra nas Figura 6.2 e 6.3. A DIN 18041 é a norma alemã em vigor desde 2004 e que serve de apoio à legislação suíça [43].

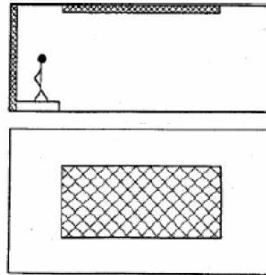


Fig. 6.2 - Zona incorrecta para aplicação de material absorvente [43]

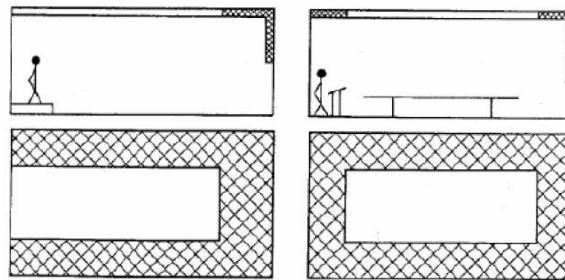


Fig. 6.3 - Zona correcta para aplicação de material absorvente [43]

A legislação francesa é mais exigente com os infantários e maternidades do que com as escolas de ensino geral [44]. O isolamento sonoro a ruídos aéreos, padronizado é mais exigente em infantários e creches. O isolamento a ruídos de percussão, padronizado deve ser inferior a 60 dB quando em contacto com o exterior e menor ou igual a 45 dB no caso de estar adjacente a casas de máquinas, ginásios ou outros locais ruidosos. Para os infantários os valores de $L'_{nT,w}$ não devem ultrapassar os 55 dB. No que diz respeito ao nível sonoro ponderado dos equipamentos, este deve ser menor que 33 dB(A) se o equipamento trabalha de forma contínua ou menor que 38 dB(A) caso dos equipamentos intermitentes. Quando se está perante infantários os valores sobem respectivamente para os 38 dB(A) e 43 dB(A). A legislação francesa apresenta valores para o tempo de reverberação apresentados no quadro 6.9.

Quadro 6.6 - Valores para o tempo de reverberação segundo a legislação Francesa [44]

Local mobilado não ocupado	Duração do Tempo de Reverberação (s)
Salas de aula, creches, salas de aprendizagem em geral com Volume $\leq 250 \text{ m}^3$	$0,4 \leq TR \leq 0,8$
Salas de restauração com Volume $> 250 \text{ m}^3$	$0,6 \leq TR \leq 1,2$
Corredores, átrios e locais de grande circulação	$TR \leq 1,2$ se $250 \text{ m}^3 < V < 512 \text{ m}^3$
	$TR \leq 0,15\sqrt[3]{V}$ se $V > 512 \text{ m}^3$
Ginásios	Remete para outro artigo regulamentar da legislação francesa relativa a edifícios habitacionais

Os valores foram calculados tendo por base as bandas de frequência centradas nos 500, 1000 e 2000 Hz.

A legislação Francesa fornece referências em geral para tratar a envolvente da escola. Outra semelhança com a legislação portuguesa, tem haver com a existência do termo de adaptação, C a somar ao $D_{nT,w}$

7

PARQUE ESCOLAR EM PORTUGAL

7.1 CARACTERIZAÇÃO

Pretende-se com este capítulo caracterizar o parque escolar em Portugal e apresentar recomendações a seguir para obter soluções que contemplem a qualidade acústica dos espaços destinados à aprendizagem.

Para se conseguir estipular medidas a ter quando se pretende fazer uma correcção acústica aos espaços de uma escola é necessário conhecer o tipo de tipologias das escolas. Um estudo recente levado a cabo no âmbito da reestruturação do Parque Escolar [16] define três tipologias de escola possíveis, como se apresenta no quadro 7.1.

Quadro 7.1 - Classificação cronológica das tipologias de escolas [16]

TIPOLOGIA	ANOS DE CONSTRUÇÃO	DESIGNAÇÃO DOS ESTABELECIMENTOS
1	≤ 1939	Edifícios históricos
2	1940 a 1970	Edificados no Estado Novo
3	> 1970	Edifícios tipo pavilhão

As tipologias 1, 2 e 3 estão apresentadas respectivamente nas figuras 7.1, 7.2 e 7.3. Os edifícios históricos podem ter diferentes tipos de construção, como por exemplo, podem ser do tipo *Adões Bermudes* em que se salienta a característica das janelas com maior altura que largura, basculantes na parte superior para garantir a circulação de ar e com técnicas e materiais característicos das diferentes regiões. A tipologia 2, composta por edifícios do *Estado Novo* também varia de região para região e tem como materiais de construção o granito, xisto ou tijolo, consoante a zona. Estes edifícios podem ser pequenos e denominados por *Tipo Rural* ou maiores e denominados de *Tipo Urbano*. Outra característica é a introdução de pilares em betão armado a sustentar a cobertura do recreio e a data de construção constar na fachada. Finalmente os edifícios do tipo pavilhão, estes caracterizam-se pela

redução dos elementos arquitectónicos e pela continuidade entre salas, não existindo paredes de separação entre grupos de 2, 4 ou 6 salas.



Fig. 7.1 - Escola em edifício histórico [60]



Fig. 7.2 - Escola edificada no *Estado Novo* [60]



Fig.7.3 - Escola posterior a 1970 [60]

Outra tipologia que faz sentido referir e que não foi abordada anteriormente são os edifícios pré-fabricados, normalmente apelidados de “contentores”. A adopção desta solução é comum noutros países, construindo verdadeiros edifícios como mostram as figuras 7.4 e 7.5.



Fig.7.4 - Escola edificada a partir de diversos contentores [66]



Fig.7.5 - Infantário em edifícios pré-fabricados [33]

Quadro 7.2 – Alunos e Estabelecimentos de Ensino em Portugal no ano de 2006/2007 [72]

Portugal	Alunos			Estabelecimentos de Ensino			
	1 ° Ciclo	2 ° Ciclo	3 ° Ciclo	EB 1	EB 1, 2	EB 2	EB 2,3
	500823	255766	398592	6257 ^{a)}	8	31	1029
Total	1155181			7325			

a) Valor correspondente às escolas do EB1, com e sem Jardim-de-infância.

7.2 VALORES IDEAIS PARA PROJECTO

O quadro 7.3 apresenta os valores recomendados pelo *BB93* para o nível de pressão sonora equivalente, padronizado. Os valores do TR estão presentes no quadro 7.4. A transmissão de ruídos aéreos é limitada de forma diferente na ANSI S12.60 e no BB93, mas em ambos os documentos o isolamento sonoro a ruídos de condução aérea fica limitado de forma muito semelhante. O quadro 7.5 e 7.6 apresentam os valores para o índice de isolamento sonoro a ruídos aéreos e de percussão, respectivamente.

Quadro 7.3 - Limite Superior para o LAeq (dBA) [adaptado de 2]

Tipo de sala	Ruído na sala emissora	Tolerância ao ruído na sala de recepção	Limite superior para o L _{Aeq} (dBA)
Salas de aula, salas de aprendizagem de línguas, laboratórios	Médio	Baixa	35
Salas com funções especiais – para alunos com deficiência auditiva	Médio	Muito baixa	30
Salas destinadas à leitura (menos de 50 alunos), (mais de 50 alunos) ^a	Médio	Baixa	35
	Médio ^a	Muito baixa ^a	30 ^a
Áreas em <i>Open Space</i>	Médio	Média	40
Salas de música	Muito elevado	Baixa	35
Auditório	Médio	Baixa	35
Salas de estudo individual ou de grupo	Baixo	Baixa	35
Bibliotecas – áreas de estudo	Baixo	Baixa	35
Bibliotecas – área de pesquisa, salas de informática	Médio	Média	40
Oficinas	Elevado	Alta	40
Salas polivalentes	Elevado	Média	38
Refeitórios e bares	Elevado	Alta	45
Ginásios	Elevado	Alta	45
Corredores, escadas	Médio	Alta	45
Casas de banho	Médio	Alta	50
Cozinha	Elevado	Alta	50

Quadro 7.4 - Valores máximos do tempo de reverberação para as bandas centradas nos 500, 1 k e 2 kHz
[adaptado de 2]

Tipo de sala	Tempo de reverberação médio (s)
Salas de infantários	0,6
Ensino Primário: Salas de aula; salas de aprendizagem; salas de grupos pequenos	0,6
2 e 3º ciclos: Salas de aula; salas de aprendizagem; salas de grupos pequenos	0,8
<i>Open-plan</i> : (salas de aula), (salas de pesquisa) ^a	0,8
	1,0 ^a
Salas de música	1,0
Salas com funções especiais – para alunos com deficiência auditiva	0,4
Salas para estudo individual	0,8
Bibliotecas	1,0
Laboratórios de ciência	0,8
Salas de tecnologias (electrónica, controle, têxtil, design e pesquisa)	0,8
Salas de arte	1,0
Átrios, corredores	1,5
Ginásio, recintos de desporto, piscinas	1,5
Posto médico	0,8
Refeitórios e bares	1,0
Espaços diversos:	
Cozinhas	1,5
Casa das máquinas	1,0
Casas de banho e balneários	1,5

Quadro 7.5 - Isolamento sonoro mínimo a ruídos aéreos segundo o BB93 [adaptado de 2]

$D_{nT,w}$ (dB)		Ruído da actividade da sala de emissão			
		Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Tolerância do ruído na sala de recepção	Alta	30	35	45	55
	Média	35	40	50	55
	Baixa	40	45	55	55
	Muito Baixa	45	50	55	60

Quadro 7.6 - Isolamento sonoro máximo a ruídos de percussão segundo o BB93 [adaptado de 2]

Tipo de sala	$L'_{nT,w}$ (dB) \leq
Salas de infantários	65
Salas de aula; salas de aprendizagem de línguas; laboratórios; salas de grupos pequenos	60
Salas de leitura (menos de 50 pessoas), (mais de 50 pessoas) ^a	60
	55 ^a
Salas de música	55
Salas com funções especiais – para alunos com deficiência auditiva	55
Salas para estudo individual	60
Bibliotecas	60
Laboratórios de ciência	65
Salas de tecnologias (electrónica, controle, têxtil, design e pesquisa)	60
Salas de arte	60
Átrios, corredores	65
Ginásio, recintos de desporto, piscinas	65
Posto médico	60
Refeitórios e bares	65
Espaços diversos:	
Cozinhas	65
Casa das máquinas	65
Casas de banho e balneários	65

8

CASOS DE ESTUDO

8.1 SALA AMOVÍVEL

Por sala de aula entende-se um espaço vocacionado à aprendizagem de cerca de 22 crianças entre os 6 e os 14 anos. No capítulo 8 “Casos de Estudo” são analisados dois tipos de salas de aula, a sala amovível e a sala tradicional.

Ao longo do trabalho foram abordados os parâmetros e os valores ideais para a acústica da escola. Neste capítulo pretende-se apresentar dois tipos de salas de aula para as quais exista conforto acústico. Em primeiro lugar e dada a crescente importância de edifícios pré-fabricados no parque escolar Português era essencial caracterizar e analisar este tipo de solução. Ao longo do trabalho foi feita uma pesquisa a escolas e daí se ter detectado a presença de inúmeros edifícios pré-fabricados amovíveis para fazer face às novas necessidades de uma escola. Os edifícios antigos por vezes não apresentam as condições necessárias, como falta de espaços onde possa ser instalada uma sala de aula de informática, sala de estudo ou mesmo um refeitório. Daí o recurso aos “Contentores”. As medidas deste tipo de edifícios são *standard* e portanto deve-se tornar esse facto como uma mais valia considerando soluções tipo que se encaixam de forma simplificada nesses mesmos contentores. Isto é, apresentadas as características gerais procedeu-se à obtenção de soluções simples e tipo.

A figura seguinte representa um módulo simples, estes módulos estão disponíveis com dimensões de 3 a 12 metros de comprimento. A largura pode variar entre os 2,40 e os 3,00 m. A altura destes pré-fabricados varia entre os 2,25 e 2,60 metros. [68]



Fig. 8.1 - Módulo pré-fabricado simples [68]

A estrutura destes pré-fabricados é composta, em geral por perfis laterais em aço galvanizado com 2 mm de espessura, a base é composta por perfis de chão em aço galvanizado de 2 mm, quinados, unidos por tubo estrutural galvanizado com 100x60x2 mm, atribuído maior rigidez à base. O tecto é formado de forma semelhante ao piso mas com uma estrutura menos rígida e possui saídas em tubo de PVC para escoamento de água para a base.

O pavimento e o revestimento das paredes possuem baixos coeficientes de absorção sonora, tratando-se nalguns casos de materiais reflectores. O pavimento não possui qualquer tipo de isolamento e as paredes de divisórias possuem 100 mm de lã de mineral com barreira anti-vapor.

As janelas e portas são leves e os vidros são laminados 3+3 mm.

A figura 8.2 mostra um edifício apoiado em alguns pontos do piso o que faz com que as suas oscilações sejam grandes e resultem em queixas por parte dos professores. É de referir que este tipo de solução, normalmente aplicada no exterior, logo junto à zona de recreio, potencia um elevado nível sonoro interior.

Ao contrário da escola apresentada na figura seguinte a figura 8.4 apresenta uma laje de regularização em betão que oferece mais conforto a todo o sistema.



Fig. 8.2 - Sala de aula amovível na Escola Básica Joaquim Nicolau Almeida [foto da autora]

Sala: Amovível

Nº de alunos: 22

Nº de mesas: 12 + 1 (alunos + professor)

Iluminação: 6 lâmpadas fluorescentes duplas

Equipamentos: 2 aparelhos de ar condicionado

Volume: $6,5 * 7,5 * 3 = 146 \text{ m}^3$

Situação inicial:

Materiais:

- Janelas

Caixilharia – 5cm em alumínio lacado a branco

Vidro – Simples

Nº de janelas – 5

- Pavimento em linóleo

- Tecto em PVC

- Revestimento das paredes em PVC

Os coeficientes de absorção sonora utilizados foram consultados na bibliografia [6, 5]. Facilmente se conclui que nenhum dos materiais que constitui o módulo é absorvente sonoro.

A solução passaria por forrar com placas de lã mineral ou similar a superfície de contorno do módulo ao longo de pelo menos 1,5 m como exemplifica a figura 8.3.

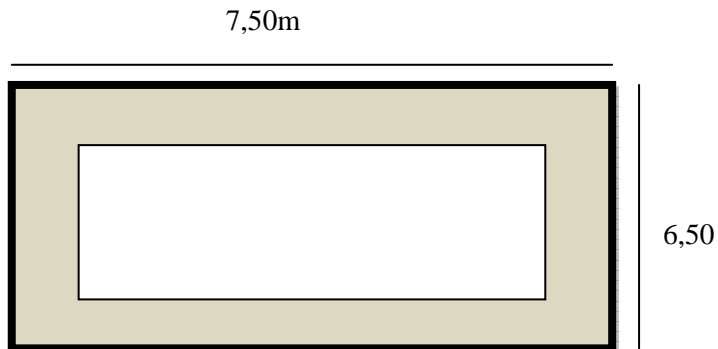
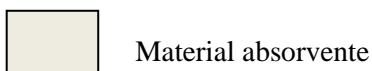


Fig. 8.3 – Colocação do material absorvente no tecto [imagem da autora]



O recurso a outra estrutura leve dentro da existente também pode ser uma solução. Existem no mercado panos de paredes duplas constituídas por gesso cartonado, material absorvente a caixa-de-ar de espessuras pequenas (≈ 25 cm). Esta solução seria também ela amovível e aplicada a qualquer dimensão. Através desta solução é possível também modificar o tipo de porta e janela, aplicando uma segunda no caso das janelas.

A colocação de uma alcatifa ao longo do piso não é uma solução aconselhada dado que apresenta uma durabilidade muito curta. A adopção de cortinas a revestir as paredes e janelas já é uma solução mais viável e com grandes vantagens.



Fig. 8.4 - Complexo de salas de aula amovíveis [foto da autora]

A importância da luminosidade e de características, térmicas e resistentes também deve ser tida em consideração em simultâneo com a correcção acústica a dar à sala.

8.2 SALA TRADICIONAL

O segundo caso refere-se a salas de aula em edifícios de estrutura rígida e pesada como acontece com os edifícios fixos.

As escolas estão actualmente e em muitos casos a precisar de obras de reabilitação e é importante não esquecer a vertente da qualidade acústica.

As figuras 8.5 apresentam diferentes salas de aula em diferentes escolas, mas todas elas possuem as mesmas características. São normalmente constituídas por paredes em alvenaria de pedra e possuem caixilharia em madeira, bem como estores e piso. Algumas têm a zona do professor elevada o que não é em nada inconveniente, muito pelo contrário em termos acústicos a zona que envolve o professor quanto mais estrangulada melhor. Pode lembrar-se a analogia de meter as mãos fechadas em frente à boca quando se quer chamar alguém que está longe, as mãos criam um género de altifalante, prolongando as ondas sonoras.





Fig. 8.5 - Salas de aula de construção tradicional [fotos da autora]

Ao contrário das salas amovíveis, estas raramente possuem aparelhos de aquecimento, ventilação e ar condicionado encastrados. O aquecimento nas estações frias faz-se através de soluções a óleo ou cerâmicas.

Neste tipo de salas é mais fácil intervir, uma vez que a estrutura da sala é toda ela pesada, logo resiste mais e consequentemente é possível a adopção de materiais com massas volúmicas mais elevadas.

No caso de tectos altos a adopção de *baffles* torna-se bastante económica por não ser necessário intervir na iluminação.

No que respeita às janelas, principal ponte de entrada de ruído, as existentes devem ser sempre aproveitadas para janelas / portadas interiores. A opção por janelas de caixilharia em alumínio com vidro duplo, por exemplo 5+ 8+ 8, é uma solução vantajosa e duradoura.

A correcta vedação de janelas e portas é fundamental. As portas devem possuir batente duplo e material resiliente no seu contorno (ex. borracha).

9

CONCLUSÕES

Este estudo teve como objectivo a caracterização e análise da qualidade acústica em escolas. A motivação e o interesse pelo tema surgiu pelo facto de ser um tema pouco abordado mas de fácil percepção quando confrontada a realidade de meios secos ou reverberantes em locais onde a palavra é o principal instrumento para a aprendizagem.

O presente trabalho incidiu na análise de vários casos onde a qualidade acústica foi pensada ou tratada de forma a identificar e caracterizar o parque escolar. A problemática levantada tem actualmente por parte dos responsáveis pelo planeamento de escolas pouca importância.

Esta problemática, do conforto acústico, e consequentemente as características da inteligibilidade da palavra perante as salas de aula, levou a que fossem abordados os três parâmetros principais:

- Tempo de Reverberação;
- Ruído de fundo;
- Relação sinal/ruído.

O quadro 9.1 apresenta o resumo dos parâmetros a respeitar para se atingir conforto acústico e consequentemente uma boa inteligibilidade da palavra.

Quadro 9.1 – Principais parâmetros a seguir para obter conforto acústico em salas de aula

Parâmetro	TR (s)	S/R (dB)	RASTI/ STI
Valores ideais	0,4 a 0,6	+ 15	0,75

A importância e diferença entre isolamento sonoro e correcção acústica foi abordada por forma a garantir que as soluções necessárias fossem implementadas, bem como toda a legislação e normalização referentes ao assunto. Em termos de resumo o quadro 9.2 apresenta os valores desejáveis em escolas. Um parâmetro importante que não faz parte da legislação portuguesa é a relação sinal/ruído (S/R) que deve ser por norma igual ou superior a 15 dB no caso de crianças com

deficiências motoras e/ou auditivas e igual ou superior 10 para alunos considerados como normais a nível auditivo.

No quadro 9.3 são apresentadas anomalias comuns e soluções a implantar.

Quadro 9.2 – Valores ideais e valores do RRAE para obter conforto acústico

Parâmetro		Escolas Básicas	Escolas do 2 e 3º Ciclo	RRAE
Tempo de Reverberação (TR)^{a)} (s)	Salas de aula	< 0,6	< 0,8	≤ 0,9
	Salas com funções especiais ^{b)}	< 0,4	< 0,4	
	Salas de música	< 0,9	< 1	
	Corredores, átrios ou locais de recreio ^{c)}	< 1,5	< 1,5	
	Salas de leitura e bibliotecas	< 0,8	< 1,0	
	Ginásios	< 1,5	< 1,5	
	Piscinas	< 2,0	< 2,0	
	Refeitórios e bares	< 1,0	< 1,0	
	Cozinhas, WC e casa de máquinas	< 1,5	< 1,5	
D_{nT,w} (dB)	Lajes ou paredes divisórias entre salas	≥ 45	≥ 45	≥ 45
	Com corredores e caixas de escadas	≥ 50	≥ 45	
	Salas de música	≥ 60	≥ 55	≥ 55
L'_{nT,w} (dB)	Entre salas	≤ 60	≤ 60	≤ 60
D_{2m, nT,w} (dB)	Com o exterior	≥ 35	≥ 35	≥ 33
NC (dB)	Salas (AVAC)	≤ 30	≤ 35	Não Limitado
NR (dB)	Salas (AVAC)	≤ 35	≤ 35	
L_{Ar, nT} (dB)	AVAC ou outros equipamentos	≤ 35	≤ 38	≤ 30
RASTI ou STI	Salas de aula	≥ 0,65	≥ 0,60	Não limitado
S/R (dB)^{d)}	Salas de aula	+ 10	+ 10	

- a) Em salas de aula, função do volume da sala, admitindo $180 \text{ m}^3 \leq V < 250 \text{ m}^3$.
- b) Salas de aprendizagem para deficientes auditivos.
- c) A presença de portas torna o isolamento a ruídos aéreos menos exigente.
- d) No caso de indivíduos com deficiência auditiva ambas as normas recomendam uma relação sinal/ruído superior a 15 dB.

Quadro 9.3 – Anomalias e soluções possíveis

Defeitos habituais	Soluções	
	Sala amovível	Sala tradicional
Caixilharias pouco isolantes	Substituição da caixilharia	Caixilharia com vidro duplo
Reverberação elevada	Colocação de material absorvente, na parte superior das paredes e/ou tecto, consoante a dimensão da sala, ie: maior dimensão implica mais área absorvente – Correção acústica	
Ruído de movimentar de mesas e cadeiras	Colocar material resiliente nas pernas da mobília	Colocar um piso flutuante com telas vinílicas ou outro tipo de material
Paredes divisórias leves (pouco isolantes)	Forrar com placas de gesso cartonado e material absorvente	
Preparar e arrumar material escolar	Planear os espaços de arrumação do equipamento envolvido nas actividades da sala.	
Excesso de ruído do exterior	Aumentar o isolamento sonoro face ao exterior	

10

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - ANSI S12.60 – Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools (2002)
- 2 - Building Regulations 2000 – Building Bulletin 93 – Acoustic Design for Schools, Dr. Trevor Hickman (August, 2003)
- 3 - “Acoustical requirements of classrooms and new concepts of teaching” proceedings of the EuroNoise 2008 em Paris por K. Eggenschwiler and M. Cslovejsek
- 4 – The Master Handbook of Acoustics, Fourth edition – McGraw-Hill, 2001
- 5 – Acústica Ambiental e de Edifícios – A. P. Oliveira de Carvalho - FEUP, 2008
- 6 – A Acústica nos Edifícios – Materiais e Sistemas Absorventes Sonoros – Odete Domingues - LNEC, 2005
- 7 – Regulamento de Requisitos Acústicos em Edifícios – DL 96/ 2008 de 9 de Junho
- 8 – Projecto de condicionamento acústico de edifícios – Martins da Silva – LNEC, 2006
- 9 – “Evaluation of acoustical conditions for speech communication in working elementary school classrooms” - Sato e Bradley – J. Acoust. Soc. Am. 123 (4), 2064- 2077 (2008)
- 10 – <http://acousticbulletin.com> – acedido em 28/11/2008
- 11 – <http://www.ecophon.com> – acedido em 28/11/2008
- 12 – Avaliação dos Níveis de Ruído – Miguel Coutinho, Alexandra Passos Silva e Clara Ribeiro; Escola do ensino Básico, 2 e 3º Ciclo de S. Bernardo - 2007
- 13 - “Classroom acoustics policies – Na overview”- por Zerhan Karabiber (Turquia) and Michel Vallet (França) proceedings of the EuroNoise 2003 Naples – Itália
- 14 - “A methodological approach to large scale action plan for noise control in school buildings” - por L. Maffei, R.Dragonetti, P. Lembo and R.Romano proceedings of the EuroNoise 2003 Naples – Itália
- 15 – “Classroom Acoustics- An Academic Playground or a Major Subject for Qualified Education” – por Dipl.- Ing. Knut Marczinske proceedings of the EuroNoise 2001 Patras – Grécia.
- 16 - “Acústica de salas de aula” por D. Alação, C. Fafaiol, J. L. Bento Coelho proceedings of the Acústica 2008 Coimbra - Portugal

- 17 - “A new regulation for educational buildings in France; a comparison with existing policies in other countries” por Michel Vallet, Stephane Auzilleau e Pascal Lemonnier proceedings of the EuroNoise 2003 Naples – Itália
- 18 - “Noise and Acoustic Surveys of London Primary Schools” por A. Efentakis, B. Shield, A. Carey e Dockrell proceedings of the EuroNoise 2003 Naples – Itália
- 19 - “The Influence of Shape on The Acoustical Performance of Classrooms” por N. Cardinale, F. Piccininni proceedings of the EuroNoise 2003 Naples – Itália
- 20 - “Classroom Acoustic Assessment: Analysis of Subjective Answers and Measured Indices” por A. Astolfi, V. Corrado, M. Filippi and S. Viazzo proceedings of the EuroNoise 2003 Naples – Itália
- 21- “Room Acoustics of Classrooms with Different Shapes” por Kurt Eggenschwiler proceedings of the EuroNoise 2006 Tampere – Finlândia
- 22 - “Effects of Classroom reverberation time on speech perception and noise ratings in elementary children: a field study” por Maria Klatte, Jochen Seidel, Marlis Wegner, Jurgen Hellbruck, Philip Leistner e Lutz Weber proceedings of the EuroNoise 2006 Tampere – Finlândia
- 23 - “A Procedure to Improve acoustical Conditions” por Yuliya Smyrnova proceedings of the EuroNoise 2006 Tampere – Finlândia
- 24 - “A Interferência do Ruído Produzido em Espaços Abertos nos Recursos Vocais de Professores” por Heloisa M. Machado e Silva, Elcione M. Lobato de Moraes e Mario Vasconcellos Sobrinho proceedings of the Acústica 2008 Coimbra – Portugal
- 25 - “A especial sensibilidade das Escolas ao Ruído Ambiente Exterior” por Vitor Rosão, Eusébio Conceição e Teresa Marques proceedings of the Acústica 2008 Coimbra – Portugal
- 26 - Building Enclosure and Insulation – Guideline IN9: Acoustic Design
- 28 - Classroom Acoustics – Technical Committee on Architecture of the acoustical society of America, 2000
- 29 – Regulamento geral do ruído, DL 9/2007 de 17 de Janeiro de 2007
- 30 – <http://www.maxit.pt/media/12/catálogos/catalogos/isolsonico.pdf> acedido em 04/10/2008
- 31 - http://www.acoustics.com/ra_learningcurve.asp acedido em 06/10/1008
- 32 - <http://www.eurodivisal.com/download/nusing/akustik.pdf> acedido em 11/12/2008
- 33- <http://www.containex.co.uk/en/community.aspx> acedido em 02/10/2008
- 34 - <http://www.chps.net> acedido em 04/05/2008
- 35 - <http://www.construlink.com> acedido em 12/11/2008
- 36 - <http://portal.danosa.com> acedido em 12/11/2008
- 37 - <http://www.cm-matosinhos.pt> acedido em 03/12/2008
- 38 - <http://www.sotecnisol.pt> acedido em 02/10/2008
- 39 - <http://www.internationalcellulose.com/home/products/k-13/> acedido em 28/11/2008
- 40 - <http://www.ptb.de/en/org/1/17/173/datenbank.htm> acedido em 04/05/2008
- 41 - Evaluation of the acoustic performance of classrooms in public schools – por Paulo Trombetta Zannin e Daniele Zanardo Zwirtes – www.elsevier.com/locate/apacoust - Junho de 2008

- 42 - <http://www.stcratings.com/> acessido em 04/05/2008
- 43 – Recommendation relative à l’acoustique des salles de classe et autres locaux destinés à la parole; Swiss Acoustical Society - 2004
- 44 – Ministère de l’écologie et du développement durable; França - 23 de Abril de 2003
- 45 – ANSI S3.5 – Methods for Calculation of the Speech Intelligibility Index – American National Standard – 2002
- 46 – ANSI S12.65 - For Rating Noise with Respect to Speech Interference – American National Standard – 2006
- 47 – Measurement of the ambient noise level, reverberation time and transmission loss for classrooms in public school – por Paulo Henrique Trombetta Zannin e Carmen Pezette Loro – Noise Control Eng. - 23 de Maio de 2007
- 48 – The intelligibility of speech in elementary school classrooms – por J. S. Bradley e H. Sato – J. Acoust. Soc. Am. 123 (4) – 2008
- 49 – Subjective and objective assessment of acoustical and overall environmental quality in secondary school classroom – por Arianna Astolfi e Franco Pellerey – J. Acoust. Soc. Am. 123 (1) – 2008
- 50 – The effects of environmental and classroom noise on the academic attainments of primary school children – por Bridget M. Shield e Julie E. Dockrell - Acoust. Soc. Am. 123 (1) – 2008
- 51 – Reverberation times and speech transmission indices in classrooms – por S. K. Tang e M. H. Yeung – Journal of Sound and Vibration 294, (596 – 607) –2006
- 52 – Objective and subjective evaluation of the acoustic comfort in classrooms – por Paulo Trombetta Zannin e Carolina Reich Marcon - Journal of Sound and Vibration , (675 - 680) –2006
- 53 – Comparison between measured and calculated parameters for the acoustical characterization of small classrooms – por Arianna Astolfi, Vincenzo Corrado e Alessia Griginis - Journal of Sound and Vibration 69, (966 – 976) – 2008
- 54 – <http://www.owa.de/popup/raumakustikrechner.php?lang=en> acessido em 11/12/2008
- 55 – Acoustical environment evaluation of joint classrooms for elementary schools in Taiwan – por Che-Ming Chiang e Chi.-Ming Lai - Journal of Sound and Vibration 43, (1619 – 1632) – Outubro de 2007
- 56 - <http://www.mcsquared.com/schools.htm> acessido em 05/10/2008
- 57 – “Are Classrooms in historical buildings compatible with good acoustics standards?” proceedings of the EuroNoise 2008 - Paris por L. Maffei, G. Iannace e M. Masullo
- 58 - <http://www.gracey.com/descriptions/bk-3361-d1.htm> acessido em 04/10/2008
- 59 . <http://www.ecophon.co.uk/> acessido em 18/11/2008
- 60 - <http://w3.dren.min-edu.pt/> acessido em 04/06/2008
- 61 - <http://www.ecophon.co.uk/> acessido em 18/11/2008
- 62 - <http://www.batod.org.uk/> acessido em 18/11/2008
- 63 - <http://www.ecophon-international.com/> acessido em 18/11/2008
- 64 - <http://www.ecophon-international.com/> acessido em 18/11/2008

- 65 - http://www.spray-on.com/Downloads/PDF/k-13_ISO_rev1003.pdf acedido em 04/06/2008
- 66 - <http://www.containex.co.uk/en/community.aspx> acedido em 02/10/2008 acedido em 04/01/2009
- 67 - <http://www.chapecomp.com.br/> acedido em 17/01/2009
- 68 - <http://www.socontentores.pt/> acedido em 17/01/2009
- 69 - <http://www.gofrontrow.com/> acedido em 17/01/2009
- 70 – “Classroom Acoustics to Support Student Learning” – John Bradley – National Research Council Canada, 2007
- 71 – Project profile *K13* ceiling systems – S.T.I.E.R – Sociedade Técnica de Isolamentos e Energias Renováveis, Ldt
- 72 – A Educação em números – GEPE Gabinete de Estatística e Planeamento da Educação; Ministério da Educação - Portugal, 2008