

CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE GRANDES AUDITÓRIOS

O caso do auditório da FEUP

MÓNICA HENRIQUES ABRANCHES PINTO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES CIVIS

Orientador: Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho

JULHO DE 2012

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2011/2012

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 - 2011/2012 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2012.*

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.

*Strive for perfection in everything you do.
Take the best that exists and make it better.
When it does not exist, design it.
Sir Henry Royce*

AGRADECIMENTOS

Ao concluir o presente trabalho, gostaria de manifestar o meu apreço por todos aqueles que permitiram e contribuíram para a sua realização.

Muito especialmente, desejo agradecer ao meu orientador Prof. Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho, pela disponibilidade, atenção dispensada, paciência, dedicação e profissionalismo. Um Muito Sincero Obrigado.

Ao Engenheiro António Eduardo Batista da Costa, pela contribuição na realização dos ensaios no auditório da FEUP e pela disponibilidade, atenção e interesse demonstrados durante a realização deste trabalho.

À minha família, em particular, aos meus pais, aos meus avós e aos meus irmãos pelo apoio incondicional ao longo de todo o curso e em todas as fases da minha vida.

Aos meus amigos, que sempre estiveram presentes e transformaram momentos menos fáceis em momentos de alegria e motivaram, incessantemente, a realização de um bom trabalho.

RESUMO

O presente trabalho tem como intuito a caracterização acústica de um tipo específico de espaço: auditórios com fins múltiplos.

A referida caracterização surge associada à avaliação da qualidade acústica deste género de locais, os quais se destacam por albergarem grandes audiências sendo, deste modo, assunto de grande relevância.

O auditório da FEUP é utilizado como caso de estudo. É um auditório com múltipla funcionalidade, contendo cerca de 500 lugares. Dado pertencer a um estabelecimento de ensino, a Palavra acaba por ser realçada como a sua função principal, pelo que a inteligibilidade da palavra adquire a maior importância. Esta está inteiramente dependente das características interiores do auditório, dos seus materiais de absorção sonora e da sua reverberação, assim como do seu isolamento sonoro relativamente ao exterior e a espaços interiores próximos.

Este trabalho começa com uma abordagem genérica de alguns conceitos teóricos na área da Acústica sendo, posteriormente, aprofundado o tema dos grandes auditórios.

É exposta, simplificadamente, a evolução dos conhecimentos acústicos aplicados em auditórios ao longo dos últimos séculos. São indicados valores recomendados por diversos autores para os parâmetros acústicos estudados, advindo estes de conhecimentos adquiridos, em grande parte, pela experiência e pelos erros praticados sucessivamente nos projetos deste tipo de espaços.

Com o recurso a medições efetuadas no local, procedeu-se à caracterização objetiva do auditório em estudo através de determinados parâmetros acústicos: tempo de reverberação, nível de pressão sonora do ruído de fundo e RASTI. O nível de pressão sonora do ruído de fundo foi determinado para diferentes configurações de climatização possibilitando, desta forma, determinar se, em alguma das situações, é gerada incomodidade para os utilizadores. No que diz respeito à inteligibilidade da palavra, o parâmetro RASTI foi também avaliado para diversas disposições, com o objetivo de averiguar o efeito dos sistemas de amplificação sonora existentes no local em estudo. Do diagnóstico da condição acústica do auditório nobre da FEUP, resultaram algumas propostas de melhoria, com vista a atingir um melhor desempenho acústico do espaço.

Após a avaliação dos valores obtidos nas medições efetuadas, foi possível fazer uma análise comparativa com os valores recomendados e regulamentares e averiguar se o espaço possui condições adequadas para as suas funcionalidades.

Por fim, são sugeridas algumas pistas para desenvolvimentos futuros a aplicar no auditório da FEUP, face às conclusões retiradas do estudo efetuado.

PALAVRAS-CHAVE: Acústica, Auditórios, Absorção, Reverberação, RASTI.

ABSTRACT

This thesis has as subject the acoustic characterization of a specific kind of room: multipurpose auditoriums (with multiple ends).

That characterization comes associated to the evaluation of the acoustic quality of this type of rooms, which are able to receive large audiences, and so, it becomes a relevant matter.

The FEUP auditorium will be the case-study of this thesis. It's an auditorium with a multitude of purposes, having about 500 seating. Given that it belongs to a scholar establishment, where the Word is enlightened as its major function, the word's intelligibility acquires the highest importance. It is entirely dependent on the auditorium interior design, the sound absorption materials, its reverberation time, as well as the sound insulation related to the outside and nearby enclosed spaces.

This thesis begins with a generic approach of some theoretic concepts in Acoustics, followed by a deep analysis of large auditoriums.

It is exposed, in a simplified way, the evolution of the acoustics knowledge applied to auditoriums in the last centuries. The recommended acoustic parameters by several authors are showed in this thesis. Those values arose from knowledge acquired with experience and the errors usually made in projects of this nature.

Using site measurements, the next step was the objective characterization of the auditorium through some chosen acoustic parameters: reverberation time, sound pressure level of the background noise and RASTI. The background noise's level was determined to different AVAC configurations, allowing to determine if, in any of the situations, the users feel uncomfortable. With regards to the word's intelligibility, the RASTI parameter was also evaluated for different conditions, with the objective of investigating the influence of sound system existing in the local. Diagnosis of the acoustic conditions of the auditorium of FEUP led to some proposals aimed to achieve better acoustic performance of that space.

After assessing the values obtained from the measurements made, it was possible to make a comparative analysis with the recommended and regulations values and determine if the space has the adequate conditions for its functionality.

Finally, some hints are suggested for future development to be applied in the auditorium of FEUP, given the conclusions drawn from this study.

KEYWORDS: Acoustics, Auditorium, Absorption, Reverberation, RASTI.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE QUADROS	xv
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	xvii

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS.....	1
1.2. ESTRUTURA DA TESE	2
2. CONCEITOS ACÚSTICOS	3
2.1. INTRODUÇÃO	3
2.2. PROPRIEDADES DO SOM	3
2.3. REFLEXÕES	8
2.4. ABSORÇÃO SONORA.....	12
2.4.1. GENERALIDADES	12
2.4.2. MATERIAIS E SISTEMAS ABSORVENTES SONOROS	13
2.5. TEMPO DE REVERBERAÇÃO	15
2.5.1. PRINCÍPIOS GERAIS	15
2.5.2. TEMPO DE DECAIMENTO CURTO (EDT).....	18
2.5.3. RÁCIOS DE BAIXOS (TR).....	18
2.6. ISOLAMENTO SONORO.....	19
2.6.1. GENERALIDADES	19
2.6.2. ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS AÉREOS	20
2.6.3. ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS DE PERCUSSÃO.....	22
2.7. RUÍDO DE FUNDO E INCOMODIDADE.....	23
2.8. INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA.....	27
2.8.1. ABORDAGEM GERAL	27
2.8.2. CARACTERÍSTICAS DA EMISSÃO DA VOZ.....	27

2.8.3. RELAÇÃO ENTRE TEMPO DE REVERBERAÇÃO E INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA	28
2.8.4. RELAÇÃO ENTRE SINAL/RUÍDO E INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA	29
2.8.5. PARÂMETROS DE MEDIDA - RASTI	29
2.9. PARÂMETROS ACÚSTICOS ENERGÉTICOS	30
2.9.1. CLARIDADE (C_{80})	30
2.9.2. DEFINIÇÃO (D_{50})	31
2.9.3. TEMPO CENTRAL (TS)	32

3. ACÚSTICA DE AUDITÓRIOS	33
3.1. A ORIGEM DO AUDITÓRIO	33
3.2. ESTADO ATUAL DA ACÚSTICA DE AUDITÓRIOS	36
3.3. AUDITÓRIOS E SUAS EXIGÊNCIAS FUNCIONAIS	40
3.3.1. AUDITÓRIOS PARA PALAVRA	40
3.3.2. AUDITÓRIOS PARA TEATRO	41
3.3.3. AUDITÓRIOS PARA MÚSICA	42
3.3.4. AUDITÓRIOS COM FINS MÚLTIPLOS	44

4. ESTUDO DE CASO	47
4.1. O AUDITÓRIO DA FEUP	47
4.1.1. ENQUADRAMENTO GERAL	47
4.1.2. CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA E ARQUITETÓNICA	49
4.2. METODOLOGIA E EQUIPAMENTOS	52
4.2.1. PARÂMETROS ACÚSTICOS MEDIDOS	52
4.2.2. EQUIPAMENTO UTILIZADO	52
4.2.3. METODOLOGIA DO TRABALHO	54
4.3. ANÁLISE DE RESULTADOS	56
4.3.1. PREÂMBULO	56
4.3.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO	57
4.3.3. TIPOS DE RUÍDO	61
4.3.3.1. Ruído de Fundo	61
4.3.3.2. Ruído de Equipamentos – um aparelho em funcionamento (AVAC-1)	63
4.3.3.3. Ruído de Equipamentos – dois aparelhos em funcionamento (AVAC-2)	64
4.3.3.4. Curvas de Incomodidade	67

4.3.3.5. Conclusões	72
4.3.4. RASTI	73
4.3.4.1. Preâmbulo.....	73
4.3.4.2. RASTI sem Amplificação Sonora	73
4.3.4.3. RASTI com Amplificação Sonora – duas colunas PA (<i>public address</i>)	74
4.3.4.4. RASTI com Amplificação Sonora – duas colunas PA (<i>public address</i>) e sistema <i>surround</i>	75
4.3.4.5. Conclusões	76

5. ANÁLISE A CONSIDERAÇÕES DE PROJETO 81

5.1. INTRODUÇÃO	81
5.2. ANÁLISE AO TEMPO DE REVERBERAÇÃO	81
5.3. ANÁLISE AO RUÍDO DE FUNDO	82
5.4. ANÁLISE AO RUÍDO DOS EQUIPAMENTOS	83
5.5. POSSÍVEIS MEDIDAS CORRETIVAS	85
5.5.1. ANÁLISE GERAL.....	85
5.5.2. VARIAÇÃO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO	85
5.5.3. DIMINUIÇÃO DO NÍVEL SONORO DO RUÍDO DOS EQUIPAMENTOS	86
5.5.4. AUMENTO DO GRAU DE INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA (AUMENTO DO RASTI).....	87

6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS 89

6.1. CONCLUSÕES	89
6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	90

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 93

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.2.1 – Propagação da onda sonora (analogia a 2D).....	3
Fig.2.2 – Propagação de ondas: alternância de áreas de compressão e rarefação numa onda sonora	4
Fig.2.3 – Propagação do som no ar (a energia é distribuída ao longo de superfícies esféricas. A intensidade sonora é inversamente proporcional ao quadrado da distância à fonte)	5
Fig.2.4 – Diagrama de audibilidade (valores de intensidade sonora e de frequência, aproximados, normalmente audíveis (voz, música e outros) e não audíveis)	7
Fig.2.5 – Curvas de igual sensação auditiva.....	7
Fig.2.6 – Curvas de ponderação	8
Fig.2.7 – Reflexão das ondas sonoras.....	9
Fig.2.8 – Refletograma (intensidade sonora em função do tempo sentida pelo recetor)	9
Fig.2.9 – Eco do som com origem na fonte sonora situada no palco, refletido por duas superfícies ...	10
Fig.2.10 – O efeito Haas no sistema auditivo humano	11
Fig.2.11 – Diagramas das frentes de ondas sonoras ao encontrar um obstáculo (ocorre difração nas baixas frequências onde o obstáculo é pequeno relativamente ao comprimento de onda)	11
Fig.2.12 – Esquema da divisão do som ao encontrar um obstáculo	12
Fig.2.13 – Representação esquemática do tubo de ondas estacionárias	13
Fig.2.14 – Lã de rocha (manta)	14
Fig.2.15 – Ressonadores utilizados em igrejas medievais	14
Fig.2.16 – Painel absorvente.....	15
Fig.2.17 – Tempo de reverberação.....	15
Fig.2.18 – Tempos de reverberação ideais em função do uso	17
Fig.2.19 – Transmissão do ruído: por via direta e por via marginal	20
Fig.2.20 – Propagação de ruídos aéreos.....	21
Fig.2.21 – Propagação de ruídos de percussão.....	22
Fig.2.22 – Curvas para determinação do parâmetro NC com um exemplo (NC-37)	25
Fig.2.23 – Curvas para determinação do parâmetro NR	26
Fig.3.1 – Planta do teatro clássico grego	34
Fig.3.2 – Plantas historicamente dominantes das estruturas dos auditórios: (a) teatro clássico grego (planta em forma de leque); (b) arena romana clássica; (c) teatro barroco (planta em forma de ferradura); (d) sala de concertos retangular do século XIX	35
Fig.3.3 – Propagação das ondas sonoras no interior de um recinto	38

Fig.3.4 – Projeto do balcão: a) Desenvolvimento de zona de sombra acústica das ondas sonoras refletidas devido ao errado projeto do balcão; b) Relação entre a profundidade da plateia por baixo do balcão e a sua altura, de forma a não ocorrerem sombras acústicas	39
Fig.4.1 – Localização do auditório da FEUP, Paranhos, Porto	47
Fig.4.2 – Plantas do auditório: a) plateia e palco; b) balcão	48
Fig.4.3 – Planta do auditório da FEUP	49
Fig.4.4 – Cadeira do auditório	49
Fig.4.5 – a) Ressorador agrupado, b) Ressorador agrupado na parede de fundo, em parte da parede lateral e no teto rebaixado, ambos na zona mais afastada do palco	50
Fig.4.6 – Teto falso, de altura variável, com grelhas de ventilação verticais	51
Fig.4.7 – Balcão superior e saliência na parede lateral (parede falsa)	51
Fig.4.8 – Fonte Sonora <i>Brüel & Kjær</i> , 4224	53
Fig.4.9 – Sonómetro <i>Brüel & Kjær</i> , 2260	53
Fig.4.10 – Equipamento de RASTI <i>Brüel & Kjær</i> : a) Emissor 4225, b) Recetor 4419	53
Fig.4.11 – Plantas do auditório com a localização dos quatro pontos de medição do tempo de reverberação e fonte sonora (FS) no palco: a) plateia, b) balcão	54
Fig.4.12 – Plantas do auditório com a localização dos três pontos de medição do nível de pressão sonora do ruído de fundo e dos equipamentos de climatização (AVAC) e fonte sonora (FS)	55
Fig.4.13 – Plantas do auditório com a localização dos oito pontos de medição do RASTI e fonte sonora (FS)	55
Fig.4.14 – Medição do parâmetro RASTI: a) recetor, b) emissor	56
Fig.4.15 – Tempos de reverberação médios nos quatro pontos de medição, para as bandas de frequência dos 125 Hz aos 4000 Hz	58
Fig.4.16 – Esquema síntese dos tempos de reverberação regulamentar, avaliado no caso de estudo e ideal	58
Fig.4.17 – Níveis de pressão Sonora do ruído de fundo, em dB, por banda de frequência de oitava, dos 31 Hz aos 16000 Hz, nos três pontos de medição	62
Fig.4.18 – Variação dos níveis de pressão sonora, L_{Aeq} em dB, por banda de frequência de oitava, dos 31 Hz aos 16000 Hz, nos três pontos de medição	62
Fig.4.19 – Curvas da média dos níveis de pressão sonora do ruído AVAC-1 nos três pontos de medição, sem e com ponderação do filtro A	64
Fig.4.20 – Curvas da média dos níveis de pressão sonora do ruído AVAC-2 nos três pontos de medição, sem e com ponderação do filtro A	65
Fig.4.21 – Variação do nível de pressão sonora, em dB(A) ao longo dos três pontos de medição, para as três situações estudadas	66
Fig.4.22 – Comparação dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo nos três pontos com as curvas NC	67

Fig.4.23 – Comparação dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo nos três pontos com as curvas NR.....	68
Fig.4.24 – Comparação dos níveis de pressão sonora do ruído de equipamentos AVAC-1 nos três pontos com as curvas NC	68
Fig.4.25 – Comparação dos níveis de pressão sonora do ruído de equipamentos AVAC-1 nos três pontos com as curvas NR	69
Fig.4.26 – Comparação dos níveis de pressão sonora do ruído de equipamentos AVAC-2 nos três pontos com as curvas NC	69
Fig.4.27 – Comparação dos níveis de pressão sonora do ruído de equipamentos AVAC-2 nos três pontos com as curvas NR	70
Fig.4.28 – Curvas dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo e do ruído dos equipamentos (AVAC-1 e AVAC-2), em dB, por banda de frequência de oitava, dos 16 Hz aos 16000 Hz, para os três pontos de medição.....	72
Fig.4.29 – Curvas dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo e do ruído dos equipamentos (AVAC-1 e AVAC-2), em dB(A), por banda de frequência de oitava, dos 16 Hz aos 16000 Hz, para os três pontos de medição.....	73
Fig.4.30 – Curvas das médias das medições do RASTI nos diversos pontos: sem amplificação sonora (tracejado a azul) e com amplificação sonora (AS), duas colunas <i>public address</i> (PA) (a vermelho) e duas colunas PA mais sistema <i>surround</i> (a verde)	76
Fig.4.31 – Variação do RASTI com a distância à fonte sonora, nos pontos 1, 3 e 5 (zona central do auditório).....	77
Fig.4.32 – Variação do RASTI com a distância à fonte sonora, nos pontos 2, 4 e 6 (zona lateral do auditório).....	78
Fig.5.1 – Tempos de reverberação, em segundos, regulamentar, medido e medido associado à incerteza sugerida pelo RRAE.....	84

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro.2.1 – Limiares de audição.....	6
Quadro.2.2 – Valores de BR e TR para diversas salas de concertos, com ocupação.....	19
Quadro.2.3 – Valores máximos do indicador NC na avaliação de ambientes acústicos.....	26
Quadro.2.4 – Valores máximos do parâmetro NR para ruído de fundo	27
Quadro.2.5 – Características mais revelantes da mensagem oral.....	28
Quadro.2.6 – Relação qualificada dos valores do RASTI.....	30
Quadro.2.7 – Valores característicos de C_{80}	31
Quadro.3.1 – Valores recomendados da área e volume por assento	39
Quadro.3.2 – Valores ideais do tempo de reverberação para espaços dedicados à palavra	41
Quadro.3.3 – Valores máximos ideais de NC e NR	41
Quadro.3.4 – Valores ideais do tempo de reverberação para espaços dedicados ao teatro	42
Quadro.3.5 – Valores ideais do tempo de reverberação para espaços dedicados à música.....	44
Quadro.4.1 – Valores dos diversos parâmetros arquitetónicos.....	50
Quadro.4.2 – Tempo de reverberação médio, em cada ponto de medição, por bandas de frequências de oitava.....	57
Quadro.4.3 – Comparação dos valores ideais do tempo de reverberação (500 – 1kHz) em função do tipo de utilização [26] com o valor obtido no auditório da FEUP (1,42 s)	59
Quadro.4.4 – Comparação dos valores ideais do tempo de reverberação (500 - 1kHz) em função do tipo de utilização [1] com o valor obtido no auditório da FEUP (1,42 s)	60
Quadro.4.5 – Níveis de pressão sonora do ruído de fundo, em dB, em cada ponto de medição, para as bandas de frequência dos 16 Hz aos 16000 Hz, e nível sonoro equivalente, sem e com filtro A....	61
Quadro.4.6 – Níveis de pressão sonora do ruído de AVAC-1, em dB, em cada ponto de medição, para as bandas de frequência dos 16 Hz aos 16000 Hz, e nível sonoro equivalente, sem e com filtro A....	63
Quadro.4.7 – Variação dos níveis de pressão sonora do ruído, L e L_A , devida à integração de um sistema de AVAC (AVAC-1)	64
Quadro.4.8 – Níveis de pressão sonora do ruído de AVAC-2, em dB, em cada ponto de medição, para as bandas de frequência dos 16 Hz aos 16000 Hz, e nível sonoro equivalente, sem e com filtro A....	65
Quadro.4.9 – Variação dos níveis de pressão sonora do ruído, L e L_A , devida à integração do segundo sistema de AVAC (AVAC-2), relativamente aos ambientes sem AVAC e com AVAC-1	66
Quadro.4.10 – Valores dos parâmetros NC e NR para as diferentes medições efetuadas	70
Quadro.4.11 – Frequências condicionantes dos valores de NC e NR	71
Quadro.4.12 – Valores máximos recomendados dos níveis de NC e NR	71
Quadro.4.13 – Valores de RASTI, sem amplificação sonora (AS).....	74
Quadro.4.14 – Valores de RASTI, com amplificação sonora (AS) - duas colunas <i>public address</i> (PA).....	75

Quadro.4.15 – Valores de RASTI, com amplificação sonora (AS) - duas colunas <i>public address</i> (PA) e sistema <i>surround</i>	75
Quadro.5.1 – Valores dos níveis sonoros contínuos equivalentes do ruído de fundo, L_{Aeq} em dB	85
Quadro.5.2 – Valores dos níveis sonoros contínuos equivalentes do ruído de equipamentos (registados e regulamentares), L_{Aeq} em dB.....	86
Quadro.5.3 – Valores dos níveis sonoros contínuos equivalentes do ruído de equipamentos, L_{Aeq} em dB, associados ao fator incerteza (- 3dB ao valor registado)	86
Quadro.6.1 – Resumo dos principais parâmetros acústicos do auditório da FEUP	90

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

α – Coeficiente de absorção sonora

δ – Coeficiente de transmissão sonora

A – Absorção sonora equivalente [m^2]

AVAC – Sistema de aquecimento, ventilação e ar condicionado

AS – Amplificação sonora

BR – Rácio de baixos

C_t – Claridade [dB]

D – Isolamento sonoro bruto a ruídos de condução aérea [dB]

D_{50} – Definição (50ms) [dB]

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

EDT – Tempo de decaimento curto

I – Intensidade sonora (W/m^2)

I_0 – Intensidade sonora de referência [$10^{-12} \text{ W}/\text{m}^2$]

K_{tonal} – penalização (em 3 dB) devida à tonalidade (RGR)

L_e – Nível de pressão sonora no espaço emissor [dB]

L_r – Nível de pressão sonora no espaço recetor [dB]

L_A – Nível sonoro contínuo equivalente do equipamento, medido durante um intervalo de tempo específico no compartimento recetor (com um tempo de reverberação T)

$L_{ar,nT}$ – Nível de avaliação do ruído particular de equipamentos [dB]

L_{eq} – Nível de pressão sonora equivalente [dB]

L'_{nT} – Nível de pressão sonora padronizado [dB/oit]

L_i – Nível de pressão sonora média no compartimento recetor [dB/oit]

L_i – Nível de intensidade sonora [dB]

L_p – Nível de pressão sonora [dB]

L_W – Nível de potência sonora [dB]

MTF – *Modulation Transfer Function*

NC – *Noise Criteria*

NCB – *Balanced Noise Criteria*

NR – *Noise Rating*

p – Pressão Sonora [Pa]

p_0 – Pressão sonora de referência [$2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$]

PA – Colunas *public address*

r – Distância [m]

R – Redução sonora [dB]

RASTI – *Rapid Speech Transmission Index*

RC – *Room Criteria*

S – Superfície real do material [m^2]

S/N – Relação sinal/ruído

STI – *Speech Transmission Index*

T_0 – Tempo de reverberação de referência [0,5 s]

TR – Tempo de reverberação [s]

TS – Tempo central [ms]

V – Volume [m^3]

W – Potência sonora [W]

W_0 – Potência sonora de referência [10^{-12}]

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS

Tipicamente, no passado, os projetos de locais para grandes audiências centravam-se apenas na sua imagem visual, negligenciando o seu comportamento acústico. A insignificante, ou mesmo nula, intervenção acústica encontrada em muitas salas deve-se ao desconhecimento, por parte dos arquitetos, da interferência da acústica na forma e no design interior dos seus trabalhos.

Um auditório é um recinto que se destina à realização de espetáculos, desde concertos a peças de teatro, conferências e palestras. Estes desenvolvem-se na presença de um conjunto de ouvintes, a assistência, aos quais é direcionado o evento.

Tendo em conta as suas finalidades, torna-se imprescindível que o espaço garanta uma boa acústica de forma a não afetar a qualidade do espetáculo, proporcionando ao recetor uma experiência auditivamente agradável.

Nos meados do século XX, a caracterização acústica de auditórios teve um progresso notável com o aparecimento de aparelhos de medição com precisão. É ainda neste século que os intervenientes na construção do espaço, dono de obra e arquiteto, assim como os intervenientes nas atividades desenvolvidas dentro dele, oradores e ouvintes, começam a ganhar uma maior consciencialização de que, num qualquer espetáculo, o fundamental é o som.

O objetivo fundamental desta dissertação é caracterizar acusticamente grandes auditórios, tendo como caso de estudo o auditório nobre da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). Sendo a perceção da palavra o principal propósito deste auditório, é da máxima importância avaliar a sua inteligibilidade. Através de um conjunto de medições realizadas *in situ*, foi possível determinar vários parâmetros acústicos objetivos:

- Tempo de reverberação (TR);
- *Rapid Speech Transmission Index (RASTI)*, com e sem Sistema de Amplificação Sonora (SAS);
- Ruído de fundo, com e sem sistemas aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC).

Estes parâmetros permitirão analisar a qualidade acústica do auditório da FEUP, fazendo a comparação com alguns requisitos de qualidade.

Quando se trata de recintos de grande dimensão, para grandes audiências, a correção acústica ganha grande relevância, sendo abordadas neste trabalho alguns tipos de tratamento acústico de interiores.

O auditório em estudo serve a comunidade da FEUP em inúmeras atividades que decorrem ao longo do ano letivo, oferecendo também a possibilidade de ser utilizado por outras entidades, com fins indiferenciados, pois é passível de ser alugado ou cedido para a realização de eventos. Tendo em conta as atividades para as quais é palco e a dimensão da comunidade a que serve, é importante a sua análise acústica.

1.2. ESTRUTURA DA TESE

Esta tese encontra-se dividida em seis capítulos.

No primeiro capítulo faz-se uma breve abordagem ao tema, fazendo o seu enquadramento, indicam-se os objetivos e apresenta-se a estrutura da tese.

No segundo capítulo são abordados conceitos teóricos considerados fundamentais para a compreensão do trabalho que se segue. Não se pretende dar uma visão de todos os campos da Acústica mas apenas dos que serão abordados numa fase posterior do trabalho.

No capítulo três a análise é centrada na Acústica de Auditórios e apresentam-se os diferentes tipos de auditórios, em termos de funcionalidades e características geométricas.

No quarto capítulo é abordada a parte experimental desta dissertação. Apresenta-se o caso de estudo, o Auditório da FEUP, é feita a sua caracterização e são descritas todas as medições acústicas efetuadas, os equipamentos utilizados, assim como os resultados obtidos para os parâmetros acústicos. É feita uma análise comparativa, a valores ideais e são determinados os aspetos que funcionam bem ou não, em termos acústicos. De forma a melhorar o comportamento acústico do auditório são apresentadas possíveis medidas corretivas.

No capítulo cinco são comparados os valores obtidos nas medições com valores regulamentares e valores recomendados por alguns autores. Tendo em conta a inexistência de regulamento em vigor na data de projeto do auditório da FEUP, a análise não é feita em termo de legalidade, mas sim considerando os valores do regulamento como ideais.

No capítulo seis faz-se uma exposição das principais conclusões de toda a dissertação e são propostos estudos futuros, de forma a dar desenvolvimento ou a completar o tema desenvolvido ao longo do presente trabalho.

Por último são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas.

2

CONCEITOS ACÚSTICOS

2.1. INTRODUÇÃO

A Acústica é o ramo da Física que estuda e analisa as ondas sonoras, a sua propagação em meios elásticos, tanto fluidos como sólidos, e as suas inter-relações com o ser humano. Estas distinguem-se consoante possuam ou não carácter de agradabilidade e significado, correspondendo a som ou a ruído, respetivamente [1][2].

Depreende-se que, de forma a assegurar a transmissão acústica, são necessários três elementos fundamentais: uma fonte sonora, um recetor e um meio de propagação [3].

2.2. PROPRIEDADES DO SOM

A formação, a propagação e a perceção do som está relacionada com a vibração de um meio elástico. Um exemplo óbvio de um estimulador do meio são as cordas vocais. Esse estímulo é transmitido às partículas de ar adjacentes, modificando as suas posições de equilíbrio e estas, por sua vez, transmitem o movimento às partículas vizinhas, sob a forma de uma onda esférica - a onda sonora [3].

A criação de ondas concêntricas (2D) num lago, com centro no ponto de embate de um qualquer objeto, é um efeito análogo ao da propagação de uma onda sonora (Fig. 2.1).

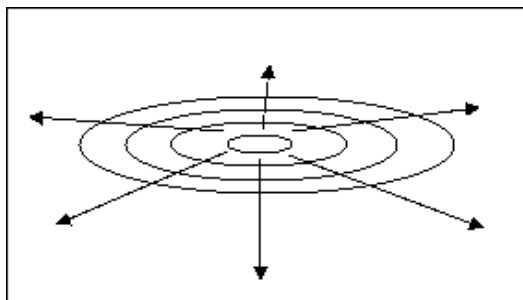


Fig. 2.1 – Propagação da onda sonora (analogia a 2D)
(Adaptado de [4])

A passagem de uma onda sonora provoca um movimento para a frente e para trás das partículas, paralelamente à direção da mesma. As ondas sonoras nos gases são apenas longitudinais, enquanto que nos materiais sólidos, coesos, pode haver propagação de outro tipo de ondas, como é o exemplo das

ondas transversais que percorrem uma corda. O movimento das partículas do ar origina áreas localizadas de compressão ou rarefação, conforme ilustrado na Fig. 2.2; estas indicam, respetivamente, zonas de altas pressões e zonas de baixas pressões [5].



Fig. 2.2 - Propagação de ondas: alternância de áreas de compressão e rarefação numa onda sonora
(Adaptado de [5])

Duas características das ondas sonoras são de interesse particular para a acústica de edifícios:

- Intensidade;
- Frequência.

A **intensidade sonora** (I) traduz o fluxo de energia sonora, produzida por uma fonte sonora, que atravessa uma unidade de área, perpendicular à direção da onda sonora, por unidade de tempo e quantifica-se em W/m^2 .

A energia total que num segundo atravessa uma esfera fictícia de raio qualquer centrada na fonte sonora, denomina-se por **potência sonora** (W) e é quantificada em watt (W). Esta é uma característica da fonte e não do estímulo criado por essa fonte.

A intensidade e a potência sonora relacionam-se, juntamente com a **pressão sonora** (p), através da expressão 2.1 [1].

$$I = \frac{W}{4 \times \pi \times r^2} = \frac{p^2}{\rho \times c} \quad (2.1)$$

Onde:

- I - intensidade sonora (W/m^2);
- W - potência sonora (W);
- r - distância (m);
- p - pressão sonora (Pa);
- ρ - massa volumica (ar) $\approx 1,2 \text{ kg/m}^3$;
- c - celeridade (m/s), $c = 20,045 \times \sqrt{T}$ com $T(K) = 273,15 + \theta(^{\circ}C)$.

Quando uma fonte sonora se encontra no exterior, a energia acústica propaga-se no espaço livre ao longo de uma superfície esférica (Fig. 2.3). Por cada duplicação da distância à fonte, verifica-se um decaimento de 6 dB [6].

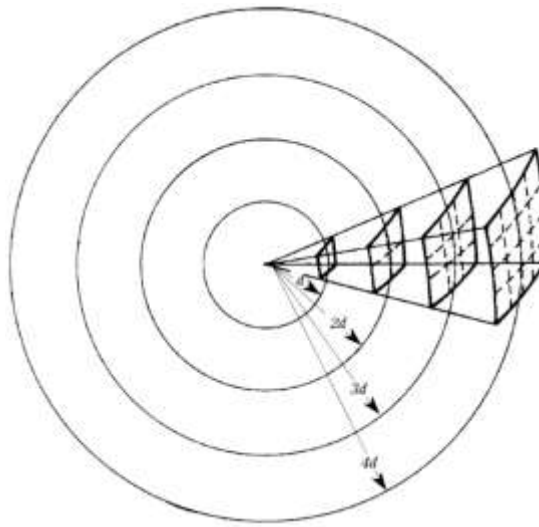


Fig. 2.3 – Propagação do som no ar (a energia é distribuída ao longo de superfícies esféricas. A intensidade sonora é inversamente proporcional ao quadrado da distância à fonte) [6]

A **frequência** (f) abrange todos os aspetos da acústica. Esta característica é medida em hertz (Hz). Um som composto unicamente por uma frequência é denominado por som puro. No entanto, os sons comuns do dia-a-dia, tais como a palavra, a música e o ruído, são sons complexos ou compostos, resultantes da sobreposição de dois ou mais sons puros [5].

O ouvido humano não ouve todos os sons. No que diz respeito à frequência, os sons audíveis situam-se entre os 20 Hz e os 20000 Hz, decrescendo este valor máximo com a idade.

Em termos de **níveis**, a gama audível tem como limitativo um aspeto: a pressão sonora. Os seus limites, inferior e superior, são valores representativos dos limiares da audição e da dor, respetivamente.

A unidade dos níveis é o **decibel** (dB), em escala logarítmica, correspondendo a um décimo do *bel*. Esta denominação foi atribuída em honra do cientista Alexander Graham Bell [1]. Surge de forma a assemelhar-se ao comportamento aproximadamente logarítmico do ouvido e a possibilitar a obtenção de valores mais práticos do que os retirados de uma escala linear.

A pressão sonora pode ser convertida em nível de pressão sonora através das fórmulas análogas 2.2 e 2.3. Representam o efeito provocado, no ouvido humano, pela variação de pressão induzida pelas ondas sonoras, tendo como pressão sonora de referência (p_0) um valor igual a 2×10^{-5} Pa [7].

$$L_p = 20 \times \log \frac{p}{p_0} \quad (dB) \quad (2.2)$$

$$L_p = 10 \times \log \frac{p^2}{p_0^2} \quad (\text{dB}) \quad (2.3)$$

O valor mínimo de pressão que o ouvido humano pode ouvir é de cerca de 10^{-5} Pa, sendo o máximo de aproximadamente 100 Pa, que correspondem, respetivamente, a 14 e 134 dB.

Em termos de nível de intensidade sonora, a gama de audibilidade é de aproximadamente 120 dB, para um tom de referência de 1000 Hz. A fórmula de conversão da intensidade em nível de intensidade sonora é exposta na fórmula 2.4. Os seus valores máximos e mínimos, assim como os correspondentes níveis de intensidade sonora (L_I), apresentam-se no Quadro 2.1.

$$L_I = 10 \times \log \frac{I}{I_0} \quad (\text{dB}) \quad (2.4)$$

De forma idêntica, é possível converter a potência sonora em nível de potência sonora (L_W) (2.5):

$$L_W = 10 \times \log \frac{W}{W_0} \quad (\text{dB}) \quad (2.5)$$

sendo:

- $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$
- $W_0 = 10^{-12} \text{ W}$.

Quadro 2.1 – Limiares de audição

Limiar	Intensidade sonora (W/m^2)	Nível de intensidade sonora (dB)	Pressão sonora (Pa)	Nível de pressão sonora (dB)
da audição	$I = 10^{-12}$	$L_I = 0$	$p = 10^{-5}$	$L_p = 14$
da dor	$I \approx 1$	$L_I \approx 120$	$p = 100$	$L_p = 134$

A adição de níveis, efetuada quando se pretende conhecer o efeito conjunto de duas ou mais fontes sonoras, é feita de forma não algébrica, como consequência da existência da fórmula de conversão para *decibel* (2.6).

$$\text{soma} = 10 \log \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}}$$

A relação entre as duas características das ondas sonoras supracitadas é sintetizada na Fig. 2.4.

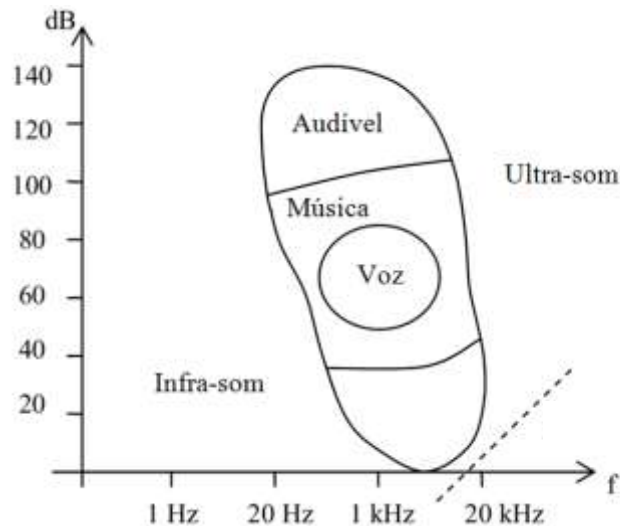


Fig. 2.4 – Diagrama de audibilidade (valores de intensidade sonora e de frequência, aproximados, normalmente audíveis (voz, música e outros) e não audíveis)
(Adaptado de [3])

O ouvido transforma as pressões sonoras em pressões auditivas, contudo a sua sensibilidade é limitada, não sentindo todas as frequências da mesma forma. Isto acontece com sons com o mesmo nível de intensidade e frequências diferentes: não são percebidos como sendo igualmente intensos.

Este carácter subjetivo do aparelho auditivo é representado por um diagrama composto por curvas isófonas (Fig. 2.5). Estas são curvas de igual percepção subjetiva da intensidade sonora, expressas em *fone* [2]. Verifica-se um elevado encurvamento nas baixas frequências que evidencia a perda de sensibilidade do ouvido humano para essas frequências [1]. Cada curva é identificada pelo seu valor na frequência de 1000 Hz.

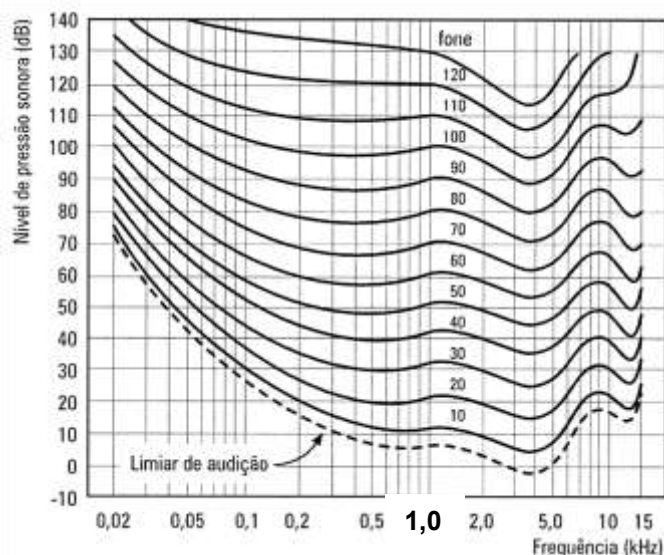


Fig. 2.5 – Curvas de igual sensação auditiva [8]

Na tentativa de assemelhar os níveis sonoros captados pelos equipamentos aos do ouvido humano, é necessária a introdução de filtros eletrónicos nos aparelhos. As curvas que representam as correções

efetuadas em função da frequência são as denominadas curvas de ponderação. Nas normas internacionais estão definidas quatro curvas, designadas pelas letras A, B, C e D (Fig. 2.6) [9]. O nível de pressão sonora captado pelos equipamentos para a frequência de 1000 Hz é igual ao sentido pelo ouvido, razão pela qual não se aplicam os filtros.

A curva A foi pensada para aproximar à resposta humana ruídos até cerca de 90 dB de intensidade, sendo sensivelmente o inverso da curva dos 40 fone [10]. As curvas B e C foram pensadas para ruídos de maior intensidade. A curva D é de uso mais restrito (para sons com nível de intensidade superior a 120 dB). É utilizada em especial com os ruídos de equipamentos e dos aviões.

A curva de ponderação A, sendo o respetivo nível sonoro dado em dB(A), é a mais usual na correção dos ruídos pois é aquela que mais se aproxima ao comportamento do ouvido humano. O caso do tráfego rodoviário, um dos ruídos mais comuns da sociedade, é um dos exemplos nos quais esta curva é considerada a mais representativa [9].

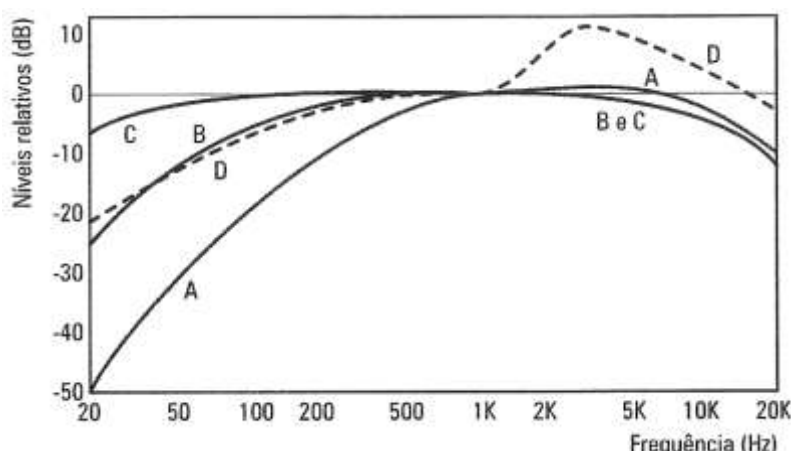


Fig. 2.6 – Curvas de ponderação [2]

2.3. REFLEXÕES

Ao percorrer longas distâncias no ambiente exterior o som é influenciado pelo vento e pelos efeitos da temperatura, entre outros. Mas mesmo na grande escala dos teatros clássicos gregos, com distâncias características de 50 m, não existem evidências óbvias de que os efeitos ambientais influenciem significativamente a acústica destes recintos (exceto que o ruído de fundo aumenta com a ação do vento) [5].

Num espaço fechado, o som direto decresce, em nível, da mesma forma que no exterior. No entanto, não é necessário ser especialista em acústica para perceber que o som quando emitido no interior é percebido de forma diferente do que quando emitido no exterior. A principal razão para isto acontecer é que num espaço fechado, o som aí produzido é refletido pelas superfícies envolventes, ao contrário da propagação livre no exterior [11].

O **som direto** é aquele que atinge o recetor sem ser previamente refletido. Quando as ondas provenientes de uma fonte sonora encontram uma superfície rígida as ondas tendem a voltar para trás - **reflexão** [12].

Em espaços fechados, a maior parte da energia sonora recebida pela audiência resulta de reflexões nas superfícies da envolvente (paredes, teto, etc.). A geometria da reflexão do som é idêntica à da luz, comportando-se a onda refletida como se tivesse sido originada na imagem da fonte. O som continua a

ser sucessivamente refletido entre as superfícies da sala, até que a sua energia seja removida pela absorção (Fig. 2.7).

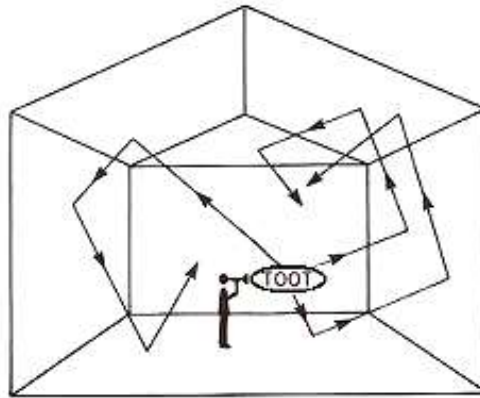


Fig. 2.7 – Reflexão das ondas sonoras [13]

Numa grande sala, no instante um segundo depois da fonte sonora ser desligada, as pessoas continuam a ouvir o som refletido [5]. Em média, numa sala de espetáculos, uma pessoa recebe cerca de 8000 reflexões por segundo [1].

O primeiro som que o recetor ouve é o som direto, que se propaga numa linha reta a partir da fonte sonora. Este é seguido por uma série de reflexões. Se estas reflexões chegarem aos ouvidos do recetor em menos de 50 ms depois do som direto são denominadas por **reflexões iniciais** (*early reflections*) [14]; o restante som é chamado de som tardio (*late sound*) [1]. O som refletido faz um percurso maior do que o som direto, por esta razão chega mais tarde e menos intenso.

Este comportamento pode ser representado num diagrama de intensidade sonora em função do tempo (Fig. 2.8). Esta representação é denominada por refletograma, apesar de por vezes ser chamada, erradamente, de ecograma.

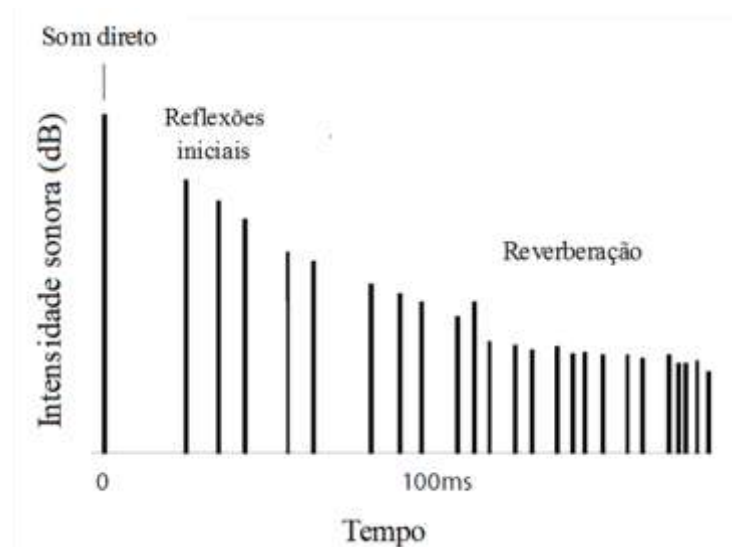


Fig. 2.8 – Refletograma (intensidade sonora em função do tempo sentida pelo recetor)
(Adaptado de [5])

Em grandes salas, o número de reflexões a chegar após 100 ms depois do som direto é tão elevado que as reflexões individuais não são distinguíveis. Em salas mais pequenas o limite já não será de 100 ms mas inferior. O som tardio depois dos cerca de 100 ms é chamado **som reverberado**. Este, normalmente, decresce de forma linear quando traçado em decibéis; esta duração é descrita como reverberação. A reverberação é bastante notável em grandes igrejas ou catedrais [5].

Quando uma onda sonora chega suficientemente atrasada, mais de 50 ms depois do som direto, e é razoavelmente forte podendo ser facilmente distinguível pelo ouvido humano, é denominada de **eco** (Fig. 2.9) [1]. Um eco é uma repetição inteligível e não deve ser confundida com a reverberação, pois esta não é perceptível. Se a parede não estiver muito distante, o intervalo de tempo é demasiado pequeno para permitir perceber algum eco.

No caso da parede refletora ser curva, os ecos podem ser bastante mais pronunciados, visto que pode acontecer uma concentração do som. Uma parede curva, independentemente do local onde se situa na sala, é quase sempre uma ameaça para uma boa acústica [15].

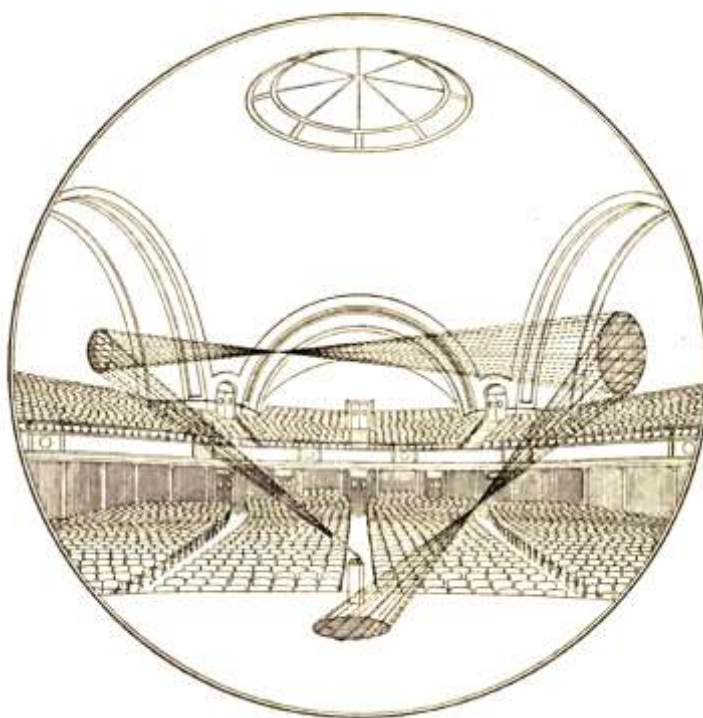


Fig. 2.9 – Eco do som com origem na fonte sonora situada no palco, refletido por duas superfícies [15]

A capacidade do cérebro em associar todas estas reflexões ao som direto, desde que estas não tenham um atraso superior a 35 ms, aumentando a sua intensidade, denomina-se por Efeito de Precedência ou *Efeito Haas*, descrito em 1951 pelo alemão Helmut Haas. Caso o som chegue mais atrasado será distinguido com um som distinto. Haas considera que o efeito provoca “uma agradável modificação da impressão sonora no sentido de um alargamento da fonte primária do som, enquanto não for percebido nenhum eco” [6]. A figura 2.9 quantifica o Efeito Haas: se o nível da reflexão estiver compreendido entre os 5 e os 10 dB acima do nível sonoro do som direto, até aos primeiros 50 ms, esta não será compreendida como eco.

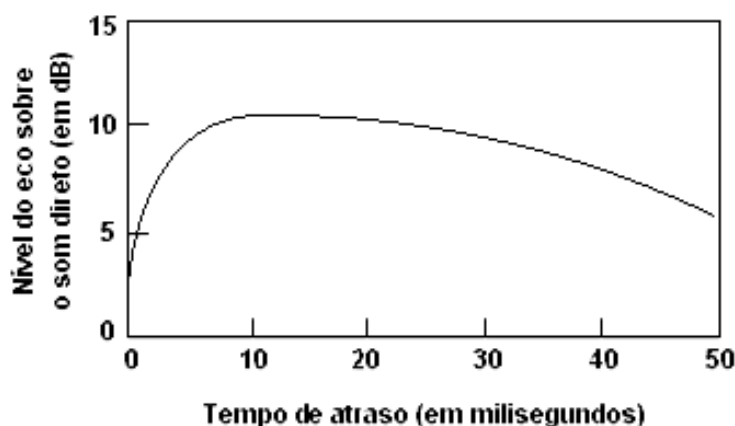


Fig. 2.10 – O efeito Haas no sistema auditivo humano [16]

O efeito de um obstáculo na propagação da onda sonora varia consoante a sua frequência: para um refletor de tamanho finito o comportamento nas baixas frequências é diferente do comportamento nas altas frequências. O som de alta frequência é refletido da mesma forma que a luz, criando-se uma zona de sombra do lado de trás do obstáculo (Fig. 2.10). No entanto, nas baixas frequências, onde o comprimento de onda é, geralmente, maior do que o tamanho do obstáculo, as ondas são difratadas e a frente de onda comporta-se como se o obstáculo não estivesse lá [5].

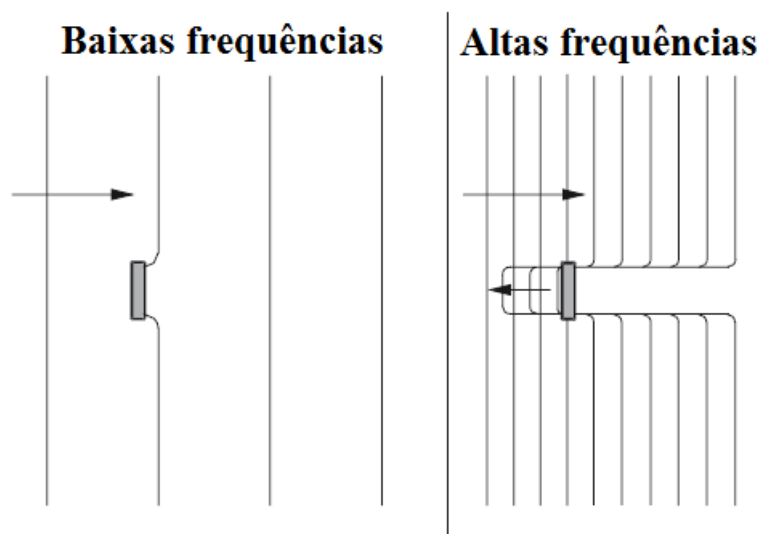


Fig. 2.11 – Diagramas das frentes de ondas sonoras ao encontrar um obstáculo (ocorre difração nas baixas frequências onde o obstáculo é pequeno relativamente ao comprimento de onda)
(Adaptado de [5])

Para além de refletir o som, um material tem também a capacidade de o difundir. A **difusão** permite refletir o som em todas as direções. Para uma superfície ser acusticamente difusora, esta necessita de ter irregularidades. Mais uma vez a natureza das projeções depende do comprimento de onda. Uma superfície com pequenos relevos só difundirá o som nas altas frequências [1].

2.4. ABSORÇÃO SONORA

2.4.1. GENERALIDADES

Dependendo da especificidade do recinto, pretendem-se diferentes características de reverberância: em salas de aula e de cinema pretende-se que o som perca pouco tempo no ar, logo uma baixa reverberância; por outro lado, em salas de concertos alguma reverberação é necessária, de forma ao som não “morrer” instantaneamente.

A energia sonora, para além de ser refletida, também é, em parte, absorvida pela superfície onde embate a onda (Fig. 2.12), transformando-se em calor. A percentagem de energia absorvida pode ser alterada, pois varia consoante o material constituinte da superfície da envolvente. Todos os materiais absorvem uma determinada quantidade de energia, mas passam a ser denominados de **absorventes sonoros** quando a sua principal função é criar condições de conforto acústico através da sua absorção.

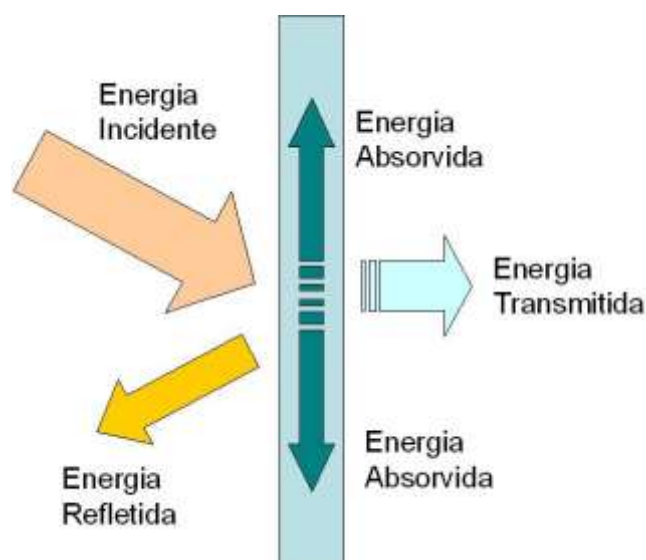


Fig. 2.12 – Esquema da divisão do som ao encontrar um obstáculo [17].

A absorção é medida através do **coeficiente de absorção sonora** (α), definido pela razão entre a energia acústica absorvida e a energia acústica incidente (2.7):

$$\alpha = \frac{\text{a sorvida}}{\text{incidente}} \quad 2$$

Existem dois métodos para a medição do coeficiente de absorção sonora:

- Método do tubo de ondas estacionárias;
- Método da câmara reverberante.

O **tubo de ondas estacionárias** é utilizado com amostras de dimensões reduzidas (0,03 m²).

O coeficiente é obtido através da medição da amplitude de pressão máxima e mínima da onda estacionária criada no tubo por um altifalante. A amostra é colocada numa das extremidades do tubo e

um microfone-sonda deteta as ondas estacionárias criadas pelo altifalante (Fig. 2.13.) Este método é regido pela norma internacional EN ISO 10534-1 [18].



Fig. 2.13 – Representação esquemática do tubo de ondas estacionárias (Adaptado de [18])

No entanto, esta técnica apresenta algumas limitações, sendo uma delas a obrigatoriedade das ondas incidirem perpendicularmente à superfície da amostra [19].

A **câmara reverberante** é, normalmente, o método utilizado para a determinação do coeficiente de absorção sonora sendo, neste caso, usadas amostras de grandes dimensões (10 m^2). As superfícies envolventes da câmara são construídas de maneira a maximizar o som refletido, para desta forma a energia ser absorvida unicamente pela amostra em estudo [20].

Neste método é determinada a média dos resultados em condições de campo difuso. Os valores são obtidos segundo a norma portuguesa NP EN ISO 354:2007 [21], que especifica as condições de medição para a câmara reverberante.

No entanto, é necessário ter em conta que este método pode induzir a valores do coeficiente de absorção sonora um pouco superiores aos reais. Isto acontece devido ao fenómeno de difração que ocorre ao longo dos bordos da amostra, denominado por *edge effect*. Este efeito origina valores do coeficiente de absorção, por vezes, um pouco superiores a 1,0, os quais não devem ser considerados em projeto [18].

2.4.2. MATERIAIS E SISTEMAS ABSORVENTES SONOROS

É possível distinguir um **material absorvente sonoro** de um **sistema absorvente sonoro**. Enquanto que, no primeiro caso, a absorção sonora é devida meramente às características físicas do material, tais como a sua espessura e densidade, no segundo, a mesma é resultado das próprias características assim como também da sua ligação a outros componentes da construção [21].

Os materiais e sistemas absorventes sonoros podem ser classificados em:

- Porosos e fibrosos;
- Ressonadores;
- Membranas.

Os materiais porosos e fibrosos são mais eficientes nas altas frequências, os ressoadores nas médias e as membranas nas baixas. Todos podem ver a sua eficácia aumentada modificando determinadas propriedades: espessura do material, massa específica e largura da caixa de ar.

Os denominados **materiais porosos e fibrosos** são caracterizados por terem apenas parte do seu volume preenchido por material sólido, sendo o restante correspondente a cavidades preenchidas por ar. As ondas sonoras, ao entrarem nos orifícios, ficam submetidas a movimentos oscilatórios devido à fricção das fibras, transformando-se a energia sonora em energia térmica. Como exemplo deste tipo de materiais existem as fibras minerais (lã de rocha e lã de vidro) (Fig. 2.14), alcatifas e tecidos, materiais plásticos (poliuretano, poliestireno, etc.), aglomerados de cortiça, entre outros. É de assinalar que a superfície mais absorvente num local de grandes audiências são os próprios recetores, cujas roupas, constituídas por materiais porosos, absorvem grande parte da energia sonora em alta frequência [5].



Fig. 2.14 – Lã de rocha (manta) [22]

Os materiais porosos e fibrosos podem ainda ser preparados para serem colocados suspensos [23]. Apresentam-se sob a forma de placas flexíveis, com cerca de 1 m^2 , de área. São colocadas na vertical, pelo que permite que ambas as faces atuem na absorção. Este tipo de absorsores são também denominados por *baffles* [1].

Os **ressoadores** de cavidade, também intitulados por *ressoadores de Helmholtz*, atuam com maior eficácia na zona das médias frequências. São sistemas compostos por uma cavidade com uma abertura estreita, de paredes rígidas, assemelhados a uma garrafa (Fig. 2.15). O som ao entrar no gargalo sofre vibração, ocorrendo transformação de energia sonora em energia mecânica e calor, saindo da cavidade já com menos intensidade [3].

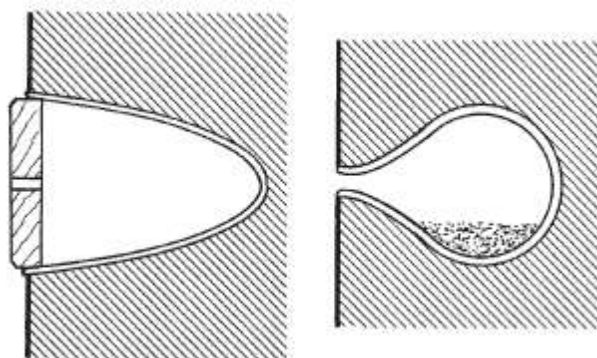


Fig. 2.15 – Ressoadores utilizados em igrejas medievais [6]

Existem também os ressoadores agrupados. Estes consistem num sistema composto por um painel perfurado, afastado do elemento de suporte a uma determinada distância. Podem ter integrado na sua

cavidade material absorvente sonoro, o que permitirá um alargamento, em frequência, da zona de eficácia do sistema [23].

Por último, as **membranas** são utilizadas como materiais absorventes nas baixas frequências (Fig. 2.16). São painéis de espessura fina que através da sua vibração convertem a energia acústica em calor. Há uma gama de frequências para a qual a absorção é máxima, podendo esta variar com a alteração da sua massa e da espessura do espaço de ar que separa as membranas da envolvente interior do recinto [5]. Geralmente, estão complementadas com materiais absorventes porosos vendo assim alargada a gama de frequências para a qual são eficazes.

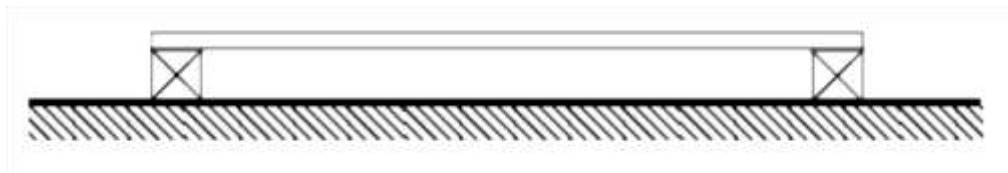


Fig. 2.16 – Painel absorvente [5]

2.5. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

2.5.1. PRINCÍPIOS GERAIS

Segundo o artigo 2º do RRAE, o **tempo de reverberação (TR)**, em termos energéticos, é o “intervalo de tempo necessário para que a energia volúmica do campo sonoro de um recinto fechado se reduza a um milionésimo do seu valor inicial” [24]. Ou seja, é o intervalo de tempo, para uma determinada gama de frequências, que o nível de intensidade demora a decair 60 dB desde que a fonte interrompe a emissão sonora, sendo geralmente representado por T_{60} , expresso em segundos (Fig. 2.17). Neste sentido, é fundamental que o ruído de fundo existente no local seja relativamente baixo de forma a não mascarar o som em questão. Caso não seja possível, podem ser utilizados os parâmetros T_{30} ou T_{20} , os quais correspondem a decréscimos do nível de pressão sonora de 30 dB e 20 dB, respetivamente, sendo posteriormente feita a extrapolação do decaimento obtido para os 60 dB de forma a obter o tempo de reverberação [2].

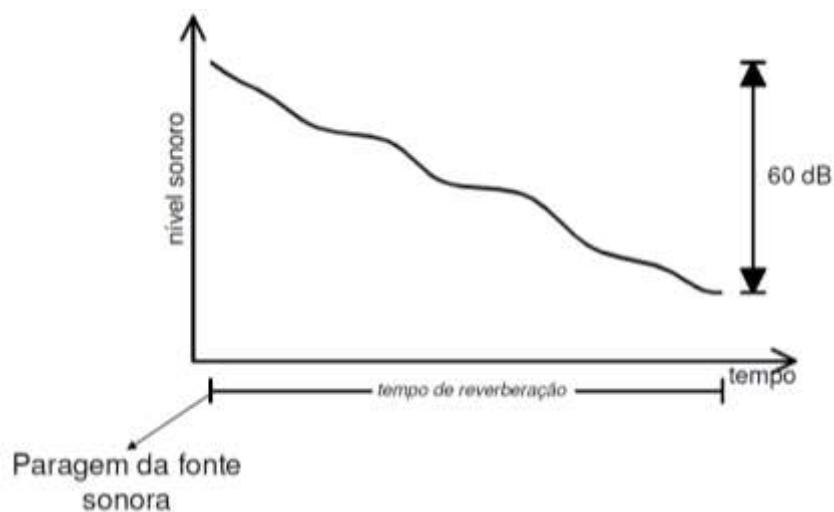


Fig. 2.17 – Tempo de reverberação [23]

Se as ondas, ao serem sucessivamente refletidas, não perdessem energia sonora, o tempo de reverberação seria infinito, pois as ondas continuariam sempre com o mesmo nível do som inicial. As câmaras reverberantes são projetadas de forma a prolongar o efeito da reverberação o máximo de tempo possível, sendo as suas superfícies envolventes o menos absorventes possível, como anteriormente referido. Pelo contrário, as câmaras anecoicas permitem obter um tempo de reverberação mínimo, na medida do tecnicamente possível. Uma câmara anecoica ideal teria um tempo de reverberação igual a zero. Têm como objetivo reduzir os efeitos das reflexões e são, por isso, revestidas por material absorvente.

Wallace Clement Sabine, enquanto era professor na Universidade de Harvard, foi desafiado pelo presidente da instituição a resolver os problemas de acústica do auditório *Fogg Art Museum*. Com o objetivo de descobrir as razões das dificuldades em entender a palavra, Sabine fez estudos em três auditórios. Após este trabalho de investigação já tinha desenvolvido a primeira teoria da absorção sonora dos materiais, uma fórmula para o decaimento do som em recintos fechados (tempo de reverberação) e chegou à conclusão que o produto do tempo de reverberação com o total da absorção, para um determinado volume, é igual a uma constante [25]. Sabine compilou o tempo de reverberação, a absorção sonora e o volume numa expressão (2.8), tendo ficado esta conhecida como a *Fórmula de Sabine*:

$$TR = \frac{0.161}{V} \sum_{i=1}^n S_i \alpha_i \quad (2.8)$$

Onde:

- TR – tempo de reverberação (s);
- V – volume (m³);
- A – absorção sonora equivalente (m²),

$$\text{com } A = \sum_{i=1}^n S_i \alpha_i \quad (2.9)$$

- α_i – coeficiente de absorção sonora do material;
- S – superfície real do material absorvente (m²).

O tempo de reverberação é pois uma característica com enorme relevância na caracterização acústica do ambiente de um recinto fechado. Este tem um duplo e antagónico sentido: o seu valor pode ser favorável, pois aumenta o nível sonoro, ou pode prejudicar consideravelmente a atividade realizada no local, se mascarar o som direto [1]. As salas tornam-se salas “vivas” quando têm tempos de rever e razão mais significativos e “mortas” quando quase não existe reverberação.

É de notar que a reverberação interfere grandemente na inteligibilidade da palavra ou na qualidade musical, sendo portanto importante analisá-la consoante os requisitos do local. Apresenta-se na figura 2.18 um diagrama com os tempos de reverberação ideais em função do uso pretendido do espaço.

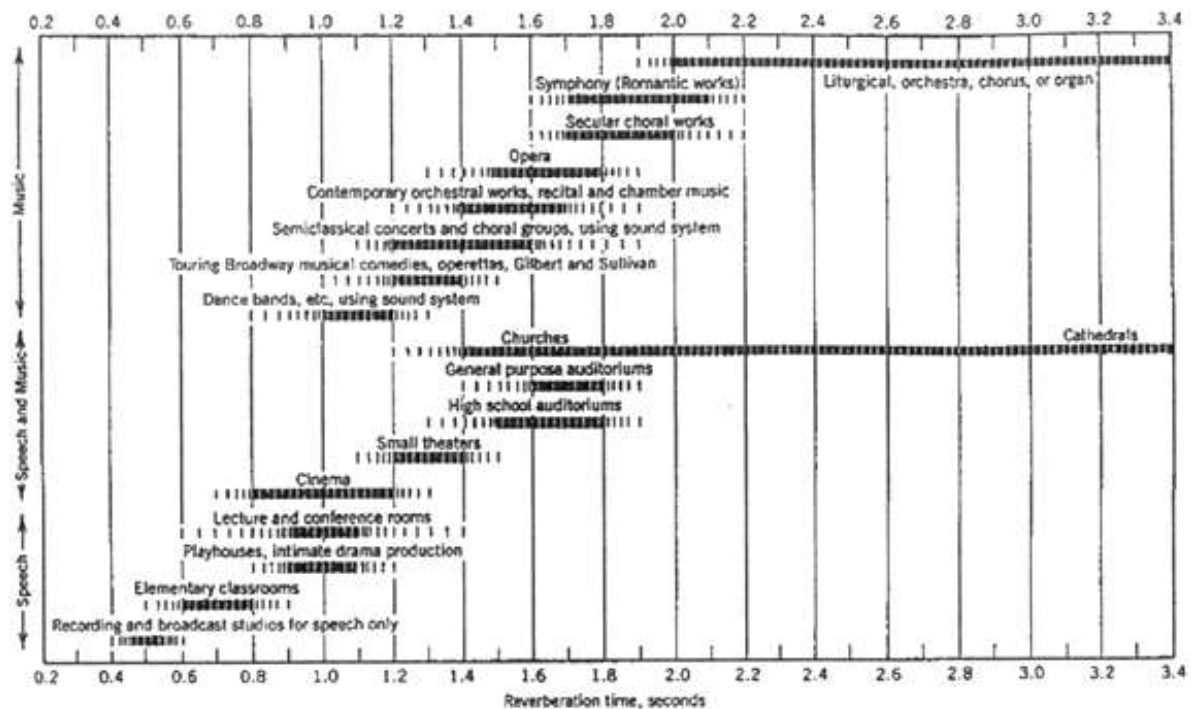


Fig. 2.18 – Tempos de reverberação ideais em função do uso [26]

Um tempo de reverberação baixo é requerido quando acontece a transmissão de mensagens por voz, como são os casos das salas de conferências e dos auditórios, para desta forma não haver dificuldade em perceber o orador. No lado oposto encontram-se as igrejas, em que um tempo de reverberação superior, na ordem dos 2 a 3 segundos, é desejado [27].

De forma a obter um ambiente sonoro agradável é possível fazer um ajustamento do tempo de reverberação modificando:

- A área de superfície envolvente e os materiais que a integram (absorção sonora equivalente);
- O tipo de mobiliário;
- O volume do recinto;
- A localização da fonte sonora;
- Espectro de frequências do som emitido pela fonte.

Uma das atualizações feitas no Regulamento dos Requisitos Acústicos de Edifícios (RRAE), em 2008, foi a inclusão de um artigo acerca do tempo de reverberação em auditórios e salas: Artigo 10.º - A.

Encontra-se agora definido, no RRAE, que os recintos cuja principal valência corresponda a atividades assentes na oratória, nomeadamente auditórios, salas de conferência, salas polivalentes assim como também salas de cinema, devem cumprir os seguintes requisitos:

- O tempo de reverberação médio das bandas de oitava centradas nas frequências de 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz a considerar para estes recintos deve corresponder ao seguinte:
 - $T \leq 12 V^{-1/3}$, se $V < 250 \text{ m}^3$;
 - $T \leq 32 + 17 \log V$, se $25 \leq V < 9000 \text{ m}^3$;
 - $T \leq 5 V^{-1/3}$, se $V \geq 9000 \text{ m}^3$;

onde V corresponde ao volume interior do recinto, em metros cúbicos.

- b) Um estudo específico direcionado a garantir uma reverberação adequada no restante espetro de frequências, assim como também uma boa inteligibilidade da palavra em todos os locais do recinto, deve estar incluído no projeto de condicionamento acústico deste tipo de espaços.

Por outro lado, no caso de auditórios e salas cuja principal finalidade não seja a oratória, designadamente salas de concertos e de teatro, o projeto de condicionamento acústico deve conter um estudo específico que garanta uma acústica adequada às suas exigências funcionais [24].

O RRAE refere ainda que avaliações *in situ* devem ter em conta um fator de incerteza, I , associado à determinação das grandezas em causa. Os valores obtidos para o tempo de reverberação vêem-se diminuídos do fator I , no valor percentual do limite regulamentar, de acordo com o seguinte:

- $I = 25 \%$, se $V < 250 \text{ m}^3$;
- $I = 35 \%$, se $250 \leq V < 900 \text{ m}^3$;
- $I = 40 \%$, se $V \geq 900 \text{ m}^3$.

2.5.2. TEMPO DE DECAIMENTO CURTO (EDT)

O **tempo de decaimento curto** (EDT – *Early Decay Time*) é o intervalo de tempo, medido em segundos, que o som demora a enfraquecer 60 dB. Porém, baseia-se apenas nos primeiros 10 dB de enfraquecimento, sendo este valor multiplicado por um fator de 6, ou seja, seria um T_{10} [1]. Os tempos de reverberação e de decaimento curto são duas grandezas com significado físico muito semelhante, medindo ambas o decaimento do nível de pressão sonora em função de um intervalo de tempo.

Num espaço muito difuso onde o decaimento é completamente linear, as duas grandezas, TR e EDT, são idênticas. Contudo, o tempo de decaimento curto tem demonstrado uma melhor relação com a apreciação subjetiva da reverberação, a chamada reverberância, do que o tempo de reverberação tradicional [5].

2.5.3. RÁCIOS DE BAIXOS (TR)

O parâmetro **rácios de baixos** (BR), *bass ratios*, foi inicialmente proposto por Beranek, em 1962, como medida da sensação de calor de uma sala. O calor é uma característica subjetiva que está relacionada com a predominância dos sons graves face aos sons médios.

É definido pela razão entre a soma dos tempos de reverberação para as bandas de oitava centradas nas frequências de 125 Hz e 250 Hz e a soma dos tempos de reverberação para as bandas de oitava centradas nas frequências de 500 Hz e 1000 Hz [25]. Exprime-se matematicamente por (2.10):

$$R = \frac{TR_{125} + TR_{250}}{TR_{500} + TR_{1000}} \quad (2.10)$$

Quando numa sala se utilizam materiais muito absorventes dos sons de altas de frequências e refletores dos sons de baixas frequências obtém-se um valor baixo *bass ratio*. Um valor alto para este parâmetro é alcançado, por exemplo, quando os materiais utilizados na sala são absorventes nas baixas frequências e refletores nas altas.

Segundo Beranek, os valores ideais do *bass ratio* estão associados ao tempo de reverberação da sala e situam-se entre determinados valores [28]:

- Para tempos de reverberação altos (na ordem dos 2,2 s): $1,1 \text{ s} < \text{BR} < 1,25 \text{ s}$;
- Para tempos de reverberação até 1,8 s: $1,1 \text{ s} < \text{BR} < 1,45 \text{ s}$.

Uma lista dos resultados desta característica em várias salas de concertos, assim como os respetivos tempos de reverberação, é apresentada no Quadro 2.2.

Quadro 2.2 – Valores de BR e TR para diversas salas de concertos, com ocupação [29]

Sala de Concertos	BR (s)	TR (s)
Amesterdão, Concertgebouw	1,08	2,0
Boston, Symphony Hall	1,03	1,9
Viena, Gr. Musikvereinssaal	1,11	2,0
Basileia, Stadt-Casino	1,17	1,8
Berlim, Konzerthaus	1,23	2,1
Cardiff, Wales, St. David's Hall	0,96	2,0
Nova Iorque, Carnegie Hall	-	1,8
Tóquio, Hamariky Asahi	-	1,7
Zurique, Großer Tonhalleaal	1,23	2,1

2.6. ISOLAMENTO SONORO

2.6.1. GENERALIDADES

Entende-se como **isolamento sonoro** a proteção de um determinado espaço contra a penetração de ruídos provenientes de outro local. Ao invés da correção acústica, cujo objetivo é corrigir o som que é produzido dentro do próprio espaço, o isolamento sonoro refere-se ao tratamento da transmissão de ruídos entre espaços contíguos [1].

O isolamento sonoro implica então dois espaços, um onde se encontra a fonte sonora e outro onde está o recetor, havendo uma transmissão de ruído entre os dois.

Ao estudar o isolamento sonoro torna-se essencial distinguir dois tipos de ruído:

- Ruído de percussão;
- Ruído de condução aérea.

Por vezes distingue-se ainda o ruído gerado por equipamentos e instalações, tais como canalizações, instalações elétricas, equipamentos individuais de aquecimento ou climatização, etc.

Quando as ondas sonoras incidem num obstáculo, para além de poderem ser refletidas e absorvidas, como anteriormente referido, veem parte da sua energia a ser transmitida através dos elementos construtivos. Esta transmissão pode ocorrer por duas formas (Fig. 2.19):

- Via direta;
- Via marginal.

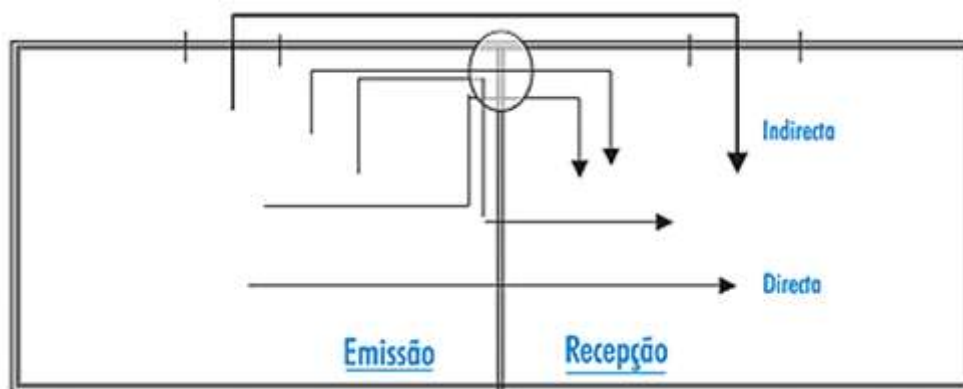


Fig. 2.19 – Transmissão do ruído: por via direta e por via marginal [30]

Outra grande divisão, relativamente aos ruídos aéreos, pode ser feita em termos da origem das fontes:

- Interior ao edifício;
- Exterior ao edifício.

Neste enquadramento, compreende-se que os ruídos provenientes do exterior condicionam o tipo de isolamento sonoro da envolvente dos edifícios e os produzidos no interior determinam o isolamento sonoro dos elementos separadores de compartimentos [2].

2.6.2. ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS AÉREOS

Os **ruídos aéreos** resultam da excitação direta do ar provocada por uma fonte sonora (Fig. 2.20). A conversação, a música, os ruídos de tráfego rodoviário, ferroviário ou aéreo, são exemplos de fontes de ruídos aéreos.

A transmissão dos sons aéreos deve-se essencialmente às deformações provocadas pelas ondas de pressão que o elemento de separação sofre. O seu isolamento depende de três propriedades: da inércia, da massa e também das características elásticas (rigidez e amortecimento interno).

As melhores formas de reduzir este tipo de transmissão são atuar no elemento separador:

- Aumentando a sua massa;
- Duplicando fisicamente o elemento (com caixa de volume).

A envolvente do edifício deve ser alvo de atenção relativamente ao seu comportamento face aos ruídos de condução aérea, no entanto, são as paredes divisórias que carecem de especial preocupação pois, geralmente, possuem massas superficiais reduzidas e é frequente a necessidade de introduzir muitas aberturas, como é o caso das portas.

A **redução sonora** (R , em dB) é o parâmetro que define o isolamento sonoro a ruídos aéreos de um elemento construtivo, definido pela fórmula 2.11. Quanto maior o seu valor, mais eficiente será o elemento no que diz respeito ao isolamento sonoro.

$$R = 10 \log \left(\frac{1}{\tau} \right) \quad 2.11$$

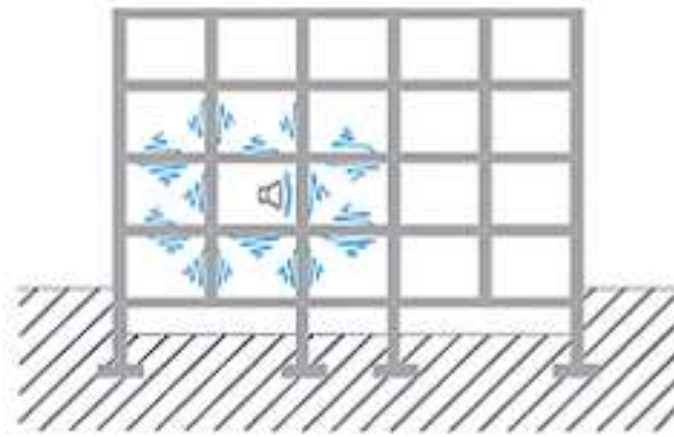


Fig. 2.20 – Propagação de ruídos aéreos [30]

A redução sonora é função do **coeficiente de transmissão** () que é definido pela razão da energia sonora transmitida face à energia sonora incidente [1].

$$\frac{\text{transmitida}}{\text{incidente}} \quad 2.12$$

Neste contexto surge também o conceito de **isolamento sonoro bruto** (D). Este representa o isolamento sonoro efetivamente percecionado entre dois compartimentos e pode ser obtido *in situ* a partir da diferença dos níveis de pressão sonora medidos no espaço emissor e no espaço recetor (Fórmula 2.13).

$$D = L_e - L_r \quad 2.1$$

Sendo:

- D – isolamento sonoro bruto a ruídos de condução aérea (dB);
- L_e – nível de pressão sonora no espaço emissor (dB);
- L_r – nível de pressão sonora no espaço recetor (dB).

O valor obtido para este parâmetro é ligeiramente inferior ao valor de R do elemento separador dado que, quando se trata do isolamento sonoro de um elemento (R), não se têm em conta as que ocorrem em simultâneo, contribuindo estas para um aumento do nível de pressão sonora no compartimento recetor.

A nível regulamentar (RRAE), está limitado o **índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea padronizado**, $D_{nT,w}$. A partir dos valores do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea para cada banda de frequências, D_{nT} (Fórmula 2.14), e por ajuste de acordo com a Norma NP EN ISO 717-1 [31] obtém-se um índice único, o $D_{nT,w}$.

$$D_{nT} = 10 \log \left(\frac{T}{T_0} \right) - 21$$

Sendo:

- D – definido em 2.13;
- T – tempo de reverberação existente no compartimento recetor (s);
- T_0 – tempo de reverberação de referência (geralmente igual a 0,5 s).

Abreviando, o isolamento sonoro bruto, D, difere da redução sonora, R, pois contabiliza:

- O efeito das transmissões marginais;
- A dimensão do elemento de separação;
- A absorção do compartimento recetor.

2.6.3. ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS DE PERCUSSÃO

A transmissão do som por via aérea apenas afeta as zonas adjacentes ao local onde o som é emitido porém, quando se trata do **ruído de percussão**, verifica-se que este atinge locais muito afastados da fonte [23].

Entende-se por ruído de percussão aquele que se propaga através da via sólida, ou seja, através dos elementos constituintes da estrutura de um edifício. Esta transmissão resulta quase exclusivamente de impactos que têm origem na solicitação mecânica direta da fonte sobre os materiais construtivos e ocorre com relativa facilidade devido à rigidez das ligações do edifício, podendo mesmo haver a criação de campos sonoros intensos em locais razoavelmente afastados do local onde se encontra a fonte (Fig. 2.21) [9].

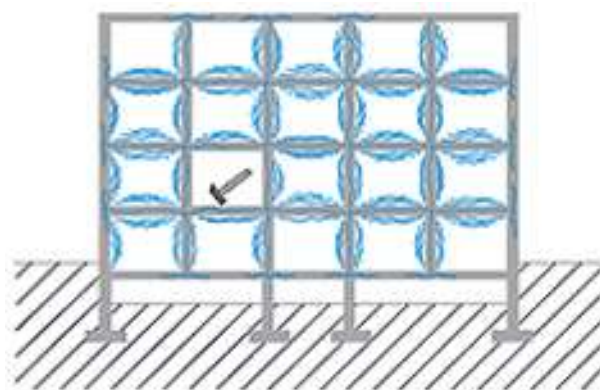


Fig. 2.21 – Propagação de ruídos de percussão [30]

A queda de objetos, a deslocação de pessoas e o arrastar de móveis são exemplos de fontes de impacto que originam os ruídos de percussão. Para além destes, fontes estáticas também podem estar na origem deste tipo de ruídos, como é o caso dos sistemas de ar condicionado, sistemas de bombagem e máquinas de lavar [1]. Locais como cozinhas e casas de banho estão mais sujeitos à existência destes ruídos.

Quando um material sólido está sujeito a um impacto originam-se ondas de vibração. Estas têm capacidade de se propagarem ao longo do material sólido, com uma velocidade superior à da

propagação no ar, atingindo as fronteiras dos elementos. Já nos compartimentos recetores, as moléculas de ar adjacentes são agitadas pelas ondas de vibração originando a produção de som [23].

Tendo em conta que, na maior parte das situações, as ações de impacto ocorrem quase exclusivamente nos pavimentos, o isolamento aos ruídos de percussão é regulamentado apenas para estes elementos, ou seja, para ruídos que se estabeleçam na direção vertical. Define-se então o **índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão**, padronizado, $L'_{nT,w}$. Este índice representa o isolamento sonoro conferido pelo elemento de separação, sendo este melhor quanto mais baixo for o valor do índice. Este é obtido a partir dos valores de L'_{nT} para cada banda de frequências (Fórmula 2.15) por ajuste de acordo com a Norma NP EN ISO 717-2 [32].

$$L'_{nT} = L_i + 1 - 10 \log(T/T_0) \quad 2.1$$

Sendo:

- L'_{nT} – nível de pressão sonora padronizado (dB/oit. ou dB/terço de oitava);
- L_i – nível de pressão sonora média no compartimento recetor (dB/oitava ou dB/terço de oitava);

As melhores formas de atuar de forma a reduzir os ruídos de percussão são:

- Interromper o meio de propagação das ondas (entre elementos construtivos e nas ligações destes aos revestimentos);
- Atuar nos revestimentos das superfícies, tornando-os resilientes.

Pavimentos revestidos a alcatifa, tetos suspensos, assim como lajes flutuantes, são soluções construtivas que apresentam grande eficiência face aos ruídos de percussão.

2.7. RUÍDO DE FUNDO E INCOMODIDADE

O ruído, como anteriormente mencionado, é um estímulo sonoro indesejável ou sem conteúdo informativo para o auditor. Assim fica patente que o ruído envolve os sentimentos das pessoas e fornece uma imagem das condições de ambiente. As intensidades do ruído traduzem-se em sensações, as quais podem adquirir outra denominação: **incomodidade** [33].

Os auditórios são talvez os locais públicos mais silenciosos que as pessoas gostam de visitar ou estar. No entanto, em salas mais antigas, era notório que o ruído de tráfego podia por vezes ser ouvido durante um concerto. Constata-se então que uma das maiores evoluções no projeto de auditórios, no último século, foi a obstrução criada ao ruído exterior [34]. Para além do referido ruído de tráfego, as vibrações provocadas pelos meios de transporte subterrâneos, tais como comboios e metros, podem também ser fonte de ruído dentro de um auditório inserido num centro urbano. A solução para este tipo de ruído, já executada em algumas salas recentes, passa por construir as fundações do edifício sobre materiais resilientes [5].

Neste contexto, o conceito de **ruído de fundo** pode ser considerado como qualquer ruído existente num determinado local que não seja alvo de apreciação [35]. No caso de auditórios, o ruído de fundo é todo o ruído que não é produzido pelos oradores/artistas.

Uma das principais fontes de ruído de fundo é o sistema de ventilação. Estes sistemas produzem ruído, não só pelos movimentos mecânicos, como também pelo fluxo de ar criado. Controlar este tipo de

ruído passa por reduzir a velocidade de saída do ar [5]. Contudo, esta não é a única fonte de ruído de fundo: todo o tipo de equipamentos e instalações dos edifícios produzem ruído. Relativamente ao ruído de equipamentos, para além do referido sistema de ventilação, elevadores e bombas sobreprensoras são exemplos de fontes desse tipo de ruído; já no que diz respeito ao ruído de instalações faz-se referência ao que decorre das instalações de abastecimento de água e drenagem de águas residuais [2].

Em Portugal, o ruído de equipamentos encontra-se limitado no RRAE, sendo analisado da seguinte forma (2.16):

$$L_{ar,nT} = L_A + K_{tonal} - 10 \log(T/T_0) \quad (2.16)$$

sendo:

- $L_{ar,nT}$ – nível de avaliação padronizado do ruído particular de equipamentos (dB);
- L_A – nível sonoro contínuo equivalente do equipamento, medido durante um intervalo de tempo específico no compartimento recetor (com um tempo de reverberação T);
- K_{tonal} – penalização (em 3 dB) devida à tonalidade (se pelo menos uma banda de 1/3 de oitava sobressair em pelo menos 5 dB em relação às duas bandas adjacentes, na gama dos 50 aos 8000 Hz, avaliado com o filtro A);
- $T_0 = 0,5$ s (em geral).

Estão ainda, no referido regulamento, definidos os valores máximos legais para os níveis sonoros contínuos equivalentes do ruído de fundo em auditórios, na presença de sistema de ar condicionado, com a sala vazia:

- $L_{Aeq} \leq 38$ dB – salas de cinema;
- $L_{Aeq} \leq 35$ dB – outras salas.

Ambos os valores limites preveem o uso de uma margem de incerteza de 3 dB(A) a diminuir aos valores obtidos [1].

No que respeita ao ruído de fundo e à avaliação da incomodidade, surgem ainda outros critérios de conforto acústico, válidos para ruídos de fundo estáveis e contínuos. Os critérios europeus mais comuns são o *Noise Rating* (NR) e o *Noise Criterion* (NC), ou a sua atualização o *Preferred Noise Criterion* (PNC), e mais recentemente o *Room Criteria* (RC) [5]. A utilização destas curvas é feita através da sobreposição da distribuição espectral dos valores dos níveis de pressão sonora obtidos no local onde está instalado o equipamento. O respetivo valor do parâmetro é o correspondente à curva imediatamente acima da curva de distribuição espectral, através do método tangencial.

Em 1957, nos Estado Unidos da América, Beranek desenvolveu as **curvas NC** (*Noise Criterion*) a partir de um conjunto de inquéritos feitos a um grupo alargado de pessoas que permaneciam longos intervalos de tempo em ambientes como escritórios, fábricas e espaços públicos assim como também da caracterização dos respetivos níveis sonoros de cada ambiente, com descrição espectral por bandas de oitava. Os resultados deste estudo propiciaram melhorias na área da inteligibilidade do discurso e a possibilidade de criar ambientes com condições acústicas adequadas para diversas atividades, desde o desfrute de programas de televisão à música, na sua globalidade. Beranek viu o culminar destes estudos no estabelecimento do critério NC [36]. Na figura 2.22 encontram-se representadas as curvas NC, que se estabelecem para oito bandas de frequência, entre os 63 Hz e os 8 kHz, e a caracterização

dos níveis sonoros de um ambiente, como exemplo. Para este caso, estima-se um valor de NC igual a 37 dB.

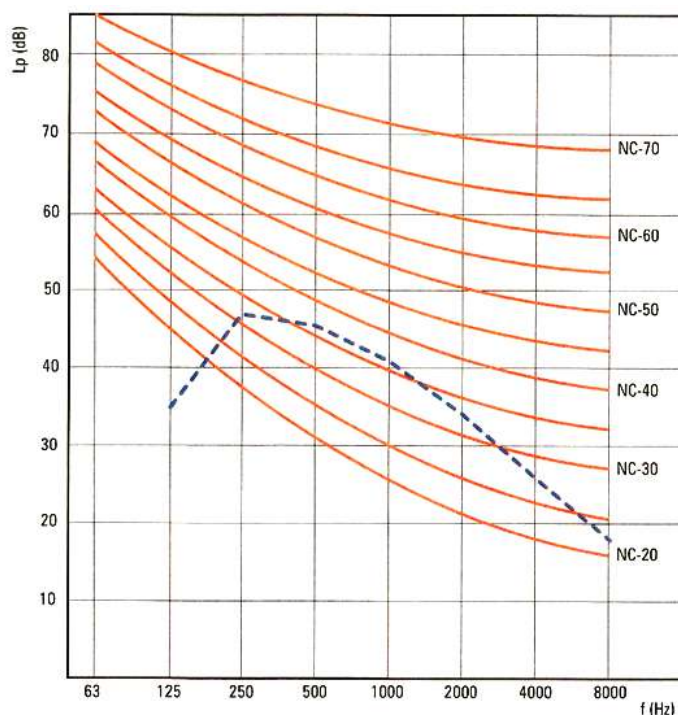


Fig. 2.22 – Curvas para determinação do parâmetro NC com um exemplo (NC-37) [2]

Para além da obtenção do valor do parâmetro, de forma a proceder à apreciação do ambiente de um dado espaço recorre-se também a limites tabelados, em função das exigências funcionais do espaço (Quadro 2.3).

Em 1962, os investigadores Kosten e Van Os estabeleceram um novo conjunto de curvas, as **curvas NR** (*Noise Rating*), sendo este um método mais comum na Europa. Este método é análogo ao NC, recorrendo também ao método da tangente, utilizando-se neste caso as bandas de frequências de 31 Hz a 8 kHz (Fig. 2.23). Este critério foi institucionalizado em 1971 por norma ISO [1].

Os limites fornecidos pelo critério NR para diferentes tipos de auditórios são dados no quadro 2.4.

Quadro 2.3 – Valores máximos do indicador NC na avaliação de ambientes acústicos (adaptado de [33])

Tipo de recinto	Valor do indicador NC
Estúdios radiofónicos	20
Salas de concertos	20
Teatros (500 lugares, sem amplificação de som)	25
Salas de aulas	25
Estúdios de televisão	25
Quartos em hotéis	30
Salas de reunião (com amplificação de som)	35
Salas de cinema	30
Hospitais	40
Igrejas (sem amplificação de som)	25
Salas de audiência (sem amplificação de som)	25
Bibliotecas	40
Restaurantes	45

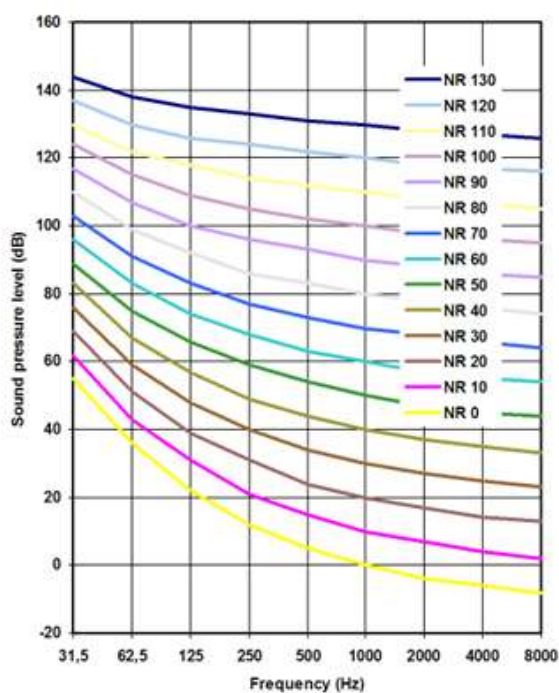


Fig. 2.23 – Curvas para determinação do parâmetro NR [10]

Quadro 2.4 – Valores máximos do parâmetro NR para ruído de fundo [5]

Tipo de sala	NR máximo
Salas de concerto de grandes dimensões	NR 15
Salas de ópera e teatros	NR 20
Pequenos auditórios (menos de 500 lugares)	NR 25

Posteriormente, em 1981, Blazier propôs um novo critério: as **curvas RC** (*Room Criterion*). Este parâmetro tem aplicação preferencial para ruídos de ar condicionado. Estas curvas permitem uma análise mais alargada no que respeita às baixas frequências, pois utiliza as bandas de frequências de 16 Hz a 4 kHz com o método da média com zonas de vibração.

Beranek, como forma de aperfeiçoamento das curvas NC por si anteriormente definidas, estabelece, em 1989, as **curvas NCB** (*Balanced Noise Criterion*). A mais notória evolução é a extensão das curvas até à banda de frequência de 16 Hz, abrangendo assim os estímulos sonoros de baixa frequência. Este parâmetro considera, assim como o parâmetro RC, o método da média com zonas de vibração.

2.8. INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA

2.8.1. ABORDAGEM GERAL

Inteligibilidade é um conceito que pode ser definido como a razão pela qual são compreendidos os sons. Dito por outras palavras, é a medida direta e relativa do número de palavras ou frases compreendidas pelo ouvinte [25]. Pode ser aplicado em diversos contextos (linguagem – palavra articulada, canto, etc.) sendo o mais comum o da linguagem, uma vez que a palavra é o som ouvido em mais de 90% dos casos no dia-a-dia [37].

As exigências quanto à inteligibilidade variam de acordo com o propósito do espaço. Por um lado, os locais onde a comunicação é primordial, como é o caso de salas de aula, auditórios, cinemas, igrejas, entre outros, a inteligibilidade torna-se um fator decisivo da qualidade acústica do espaço. Por outro, há espaços onde se pretende **privacidade**, que consiste no contrário da inteligibilidade [25], como é o caso dos escritórios *open-space*: as palavras ouvidas das secretárias vizinhas tornam-se uma fonte de ruído perturbadora, diminuindo o grau de concentração de qualquer trabalhador. O objetivo num local como este é um baixo grau de inteligibilidade entre postos de trabalho, alcançando-se, por exemplo, com *masking sound* [38].

2.8.2. CARACTERÍSTICAS DA EMISSÃO DA VOZ

Na emissão de uma mensagem oral, uma pessoa dispensa mais tempo na emissão das vogais do que nas consoantes. As vogais funcionam como elementos de ligação, constituem o regime permanente da fala, enquanto as consoantes estão associadas ao regime transitório, entre as vogais [1].

No que respeita a **duração**, a emissão de uma vogal dura, em média, cerca de 90 ms sendo a emissão de uma consoante bastante menos duradoura, na ordem dos 20 ms [39]. Para além de terem maior duração, o **nível de pressão sonora** associado às vogais é superior ao das consoantes em cerca de 12

dB. Em termos de comparações, ainda é possível avaliar as palavras quanto à **frequência**: as vogais estão associadas às gamas de baixas frequências e as consoantes às gamas das altas frequências [1].

O grau de inteligibilidade da palavra está estritamente dependente da correta percepção nas altas frequências, ou seja, das consoantes [5]. Estudos revelam que se uma pessoa perceber cerca de 85 a 90% das palavras que lhe são ditas consegue ter uma compreensão muito boa, praticamente a totalidade das frases; com uma compreensão superior a 60% das palavras que são emitidas, o ouvinte consegue decifrar cerca de 90% das frases, correspondendo ainda a uma compreensão boa; quando menos de 60% das palavras são entendidas pelo ouvinte a inteligibilidade reduz rapidamente [25]. Esta capacidade do cérebro é tanto maior quanto maior for a compreensão das consoantes, pois são estas que permitem a “intuição” das sílabas inteligíveis.

As características mais relevantes da palavra encontram-se no quadro 2.5.

Quadro 2.5 – Características mais revelantes da mensagem oral [40]

Palavras	Duração (ms)	Conteúdo em frequência	Nível de pressão sonora	Contribuição para a inteligibilidade da palavra
Vogais	90	Baixas frequências	Nível das consoantes cerca de 12 dB superior às vogais	Baixa
Consoantes	20	Altas frequências		Alta

A emissão da voz varia também com a direccionalidade da emissão. Uma fonte sonora não irradia com igual potência para todas as direções, há uma em que a potência é mais forte. A voz humana emite preferencialmente para a frente, sendo esta característica determinada pelo sistema de fonação e pela forma da cabeça. Esta variabilidade direcional é dependente da frequência: as baixas frequências não apresentam grande instabilidade em relação à direção, no entanto, as altas frequências perdem até 25 dB com a direção da escuta [1].

2.8.3. RELAÇÃO ENTRE TEMPO DE REVERBERAÇÃO E INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA

Quando, num determinado recinto, o tempo de reverberação é excessivo, o problema da redução do grau de inteligibilidade é iminente: tendo em conta que as consoantes têm um baixo nível sonoro e um curto período de duração, estas são suplantadas pelo “rasto sonoro” das vogais antecedentes, com duração e nível sonoro superiores, agravados pelo elevado tempo de reverberação [1].

A simultaneidade temporal, os correspondentes níveis sonoros, assim como as características espectrais dos sons de uma vogal e de uma consoante são as causas do mascaramento provocado pela vogal na consoante, podendo este ser parcial ou total.

Segundo Fernandez [37], a reverberação e a inteligibilidade relacionam-se da seguinte forma:

- A inteligibilidade varia com o inverso do quadrado do tempo de reverberação;
- Para se obter uma boa inteligibilidade da palavra o tempo de reverberação deve ser inferior a 1 segundo;
- Em algumas avaliações da inteligibilidade é usado o parâmetro EDT (*Early Decay Time*).

2.8.4. RELAÇÃO ENTRE SINAL/RUÍDO E INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA

O grau com que o ruído inibe a inteligibilidade é dependente da **relação Sinal/Ruído** (S/N). Esta relação corresponde simplesmente à diferença entre o nível sonoro da fonte e o ruído de fundo, em dB. Em princípio, quanto maior o valor da relação Sinal/Ruído maior será a inteligibilidade da palavra. Pode dar-se o caso do ruído de fundo ser superior ao ruído da fonte e, neste caso, a relação S/N toma um valor negativo. A inteligibilidade é ainda possível nesta situação (até certos limites), devido à capacidade do cérebro, anteriormente referida, não necessitar de perceber tudo que é emitido para compreender parcialmente ou na totalidade da mensagem [25].

Tipicamente a relação S/N tem um valor menor quanto:

- Maior for a distância à fonte sonora;
- Menor for a distância à fonte de ruído sonoro.

Mais uma vez, Fernandez [37] relaciona a inteligibilidade com outro fator, o ruído:

- A relação Sinal/Ruído (S/N) é fundamental para a inteligibilidade;
- A direção em que o ruído mascarante chega ao ouvido é importante: quando a direção é a mesma do som principal o mascaramento será maior;
- O mascaramento do ruído será maior quando o seu espectro for mais intenso na banda de transmissão de informações (1 a 4 kHz).

Bradley [38] assume 15 dB como o limite entre uma inteligibilidade aceitável (valores superiores) ou não aceitável (valores inferiores), sendo que, Fernandez, admite que valores com S/N superior a 30 dB correspondem a uma inteligibilidade excelente.

2.8.5. PARÂMETROS DE MEDIDA – RASTI

Durante o projeto acústico de um recinto, é importante saber como é que a palavra pode ser entendida nos vários locais do mesmo. Através de determinado tipo de medições é possível determinar a inteligibilidade em cada ponto específico.

A inteligibilidade da palavra, é um parâmetro subjetivo percentual, numa escala de zero a um, que avalia a quantidade de palavras compreendidas por um determinado ouvinte relativamente à quantidade total de sons ou palavras emitidos. O valor “0” corresponde a uma inteligibilidade nula enquanto que o valor “1” corresponde a uma inteligibilidade perfeita.

O método mais direto para medir a inteligibilidade da palavra é o uso de frases que contenham palavras individualizadas ou sílabas sem sentido, as quais são lidas para os ouvintes a quem é pedido para as identificar. Este método pode ser realizado em ambientes com diversos níveis de ruído de fundo assim como tempos de reverberação. Nestes testes, tanto vozes diretas como vozes gravadas são utilizadas, no entanto, as gravações conseguem por vezes ser mais fidedignas: mais consistentes e controláveis [25].

Existem diversos métodos objetivos para determinar o grau de inteligibilidade da palavra dos quais se destacam os seguintes:

- Índice de transmissão da palavra – **STI** (*Speech Transmission Index*);
- Índice de transmissão rápida da palavra – **RASTI** (*Rapid Speech Transmission Index*).

Os dois indicadores, STI e RASTI, são muito semelhantes, sendo o RASTI uma simplificação do STI.

O **STI** foi desenvolvido com o objetivo de avaliar objetivamente a inteligibilidade da palavra tanto em situações de comunicação direta como em situações em que a voz é amplificada, por exemplo, com sistemas de som PA (*Public Address System*). Este parâmetro tem em conta diversas distorções irregulares do som como, por exemplo, ecos [39].

O **RASTI** é uma simplificação do STI. Desta forma, o RASTI é mais adequado a situações onde não existam distorções do som não lineares. A reverberação e o ruído de fundo não devem ser muito dependentes da frequência e o ruído de fundo não deve ser impulsivo [39].

Em ambos os casos o sistema começa por calcular a **função de transferência de modulação** (MTF – Modulation Transfer Function) de forma a determinar a redução da modulação do sinal entre o ponto de emissão e o de receção. As características de reverberação da sala e a razão entre o sinal e o ruído de fundo são fatores determinantes na MTF. Este teste de sinal é feito com um altifalante posicionado no local do orador, com direccionalidade semelhante à da boca de uma pessoa, e medido com um microfone na posição do ouvinte. Faz-se a comparação entre os sinais transmitido e recebido e deteta-se a redução da modulação do sinal.

No cálculo do STI, as MTF's são medidas em sete bandas de oitava, desde os 125 aos 8000 Hz. Todas as MTF são medidas com catorze frequências de modulação em bandas de terço de oitava, desde os 0,63 aos 12,5 Hz. No final, são obtidos 98 fatores de redução da modulação. A complexidade deste método revela-se a sua maior desvantagem, já que requer uma quantidade muito grande de medições para cada situação.

O cálculo do RASTI é feito com base em apenas duas bandas de frequência: 500 Hz e 2000 Hz, com quatro frequências de modulação. Após transformados em relações S/N, é feita a média dos nove valores obtidos e esta é transformada num único valor, numa escala de zero a um. Como neste método são utilizadas apenas duas bandas de frequências, é necessário que o ruído de fundo e a reverberação da sala não sejam fortemente dependentes da frequência [42].

No quadro 2.6 apresenta-se uma relação qualificada dos valores de RASTI.

Quadro 2.6 – Relação qualificada dos valores do RASTI [1]

RASTI	[0,00 - 0,30]	]0,30 – 0,45]	]0,45 – 0,60]	]0,60 – 0,75]	]0,75- 1,00]
	Mau	Pobre	Razoável	Bom	Excelente

2.9. PARÂMETROS ACÚSTICOS ENERGÉTICOS

2.9.1. CLARIDADE

A **claridade** refere-se ao grau com que as notas são ouvidas separadamente. Pretende-se uma grande claridade em locais onde a inteligibilidade da palavra é o fator preponderante, assim como para ópera; já para salas de música alguma mistura entre as notas é importante.

A claridade, C_t (*early to late sound index*) expressa em dB, é um parâmetro acústico objetivo que define a razão entre a energia sonora recebida pelo auditor nos primeiros “t” milissegundos e a energia recebida posteriormente a este período e é dada pela fórmula 2.17.

$$C_t = 10 \log \left(\frac{\int_t^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^t p^2(t) dt} \right) \quad (2.1)$$

A qualidade acústica dos recintos pode ser avaliada através do valor deste parâmetro acústico, destacando-se:

- C_{50} ($t = 50$ ms) – claridade para a voz, quantifica a inteligibilidade, devendo ser superior a 0 dB;
- C_{80} ($t = 80$ ms) – claridade para a música, traduz o grau de separação entre os estímulos musicais [2].

Este último parâmetro, C_{80} , é o mais utilizado na caracterização acústica de auditórios. Tal como muitos outros parâmetros acústicos, a claridade é dependente da frequência. Sendo assim, C_{80} tem sido desenvolvido de forma a dar uma ideia geral da claridade da sala. Tem sido definida como a média dos valores C_{80} das bandas de frequência centradas nos 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz. São apresentados no quadro 2.7 os valores característicos de algumas boas salas de concerto mundiais.

Quadro 2.7 – Valores característicos de C_{80} [29]

Salas de concerto	C_{80} – Sala vazia (dB)
Amsterdão, Concertgebouw	- 3,3
Boston, Symphony Hall	- 2,7
Viena, Gr. Musikvereinssaal	- 3,7
Basileia, Stadt-Casino	- 2,3
Berlim, Konzerthaus	- 2,5
Cardiff, Gales, St. David's Hall	- 0,9
Nova Iorque, Carnegie Hall	-----
Tóquio, Hamarikyu Asahi	- 0,2
Zurique, Großer Tonhalleaal	- 3,6

2.9.2. DEFINIÇÃO

A **definição** (D_{50}), também um parâmetro acústico objetivo, é a razão entre a energia recebida nos primeiros 50 ms e a energia total recebida, expresso em dB. Este é o parâmetro considerado para definir o limite de percetibilidade da palavra. Encontra-se definido pela fórmula 2.18 [2].

$$D_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{50 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (2.18)$$

2.9.3. TEMPO CENTRAL

O **tempo central** (TS) é mais um parâmetro acústico objetivo que permite quantificar as condições acústicas de uma sala. Este parâmetro é o ponto no tempo onde a energia sonora recebida até então representa metade da energia total recebida pelo ouvinte, ou de outra forma, o ponto onde a energia recebida anteriormente é igual à energia que chegará depois. É usual, em salas de concerto, ter valores de tempo central entre 140 a 180 ms. Este conceito é definido pela fórmula 2.19, expresso em ms [1].

$$T = \frac{\int_0^T p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} = 0.5$$

3

ACÚSTICA DE AUDITÓRIOS

3.1. A ORIGEM DO AUDITÓRIO

Um **auditório** é uma sala construída com o objetivo de permitir a uma audiência ouvir e ver atuações, em espaços como teatros. O termo provém do latim, *auditorium*, que significa relativo à audição (espaço onde se ouve).

A realização de grandes festas em honra a Dioniso, deus grego do vinho e das festas, provocava o agrupamento de um grande número de pessoas, que participavam e assistiam às enormes procissões com cantos e danças. Com a evolução das procissões para formas literárias mais estruturadas, as conhecidas, atualmente, tragédias e comédias gregas – *Tragós* e *Komós*, respetivamente – a duração dos espetáculos foi aumentando, tornando-se importante manter o público confortável enquanto assistia às encenações. Foi nesta época que surgiu o **teatro**, tanto no sentido de espetáculo como no sentido de um local dedicado à reunião de um grande número de pessoas, esta com diversos fins [42].

Nesta época da Antiguidade Grega foram construídos diversos teatros. Estes eram construídos ao ar livre e aproveitavam as montanhas e colinas para servirem como suporte às arquibancadas. Geralmente situavam-se em locais afastados das zonas ruidosas, tais como centros de comércio, sendo que, quando próximos destas zonas, ficavam separadas por muralhas. A excelência da acústica do teatro grego, a qual permitia às pessoas sentadas nas últimas filas (parte superior da arquibancada) ouvir tão bem a voz dos atores como as pessoas sentadas na primeira fila, surge como resultado de diversos fatores: a forte inclinação da arquibancada, o silêncio do local onde eram inseridos, a boa linha de visão para o palco, a orientação relativamente ao vento, entre outros.

O teatro grego era composto por três elementos principais: a *Cavea*, ou plateia, a *Skéne*, ou palco-camarim e a *Orkhestra*, o espaço circular onde atuavam os artistas (Fig. 3.1).

Os gregos estavam constantemente a renovar os seus teatros, de acordo com a necessidade de acomodar grandes audiências, a mudança do estilo de representação teatral, etc. O teatro de Dioniso, por exemplo, em Atenas, sofreu inúmeras renovações durante a sua vida. As fileiras de degraus, inicialmente talhadas na encosta em torno da orquestra, passaram a ter assentos de madeira sendo que a primeira fileira da *cávea* passou a ter bancos de pedra (destinados aos nobres); a *skéne*, que começou por ser uma estrutura de madeira provisória, a qual permitia aos artistas mudarem de máscaras e vestuário, no final do século V a.C. foi substituída por uma estrutura de pedra, permanente [43].

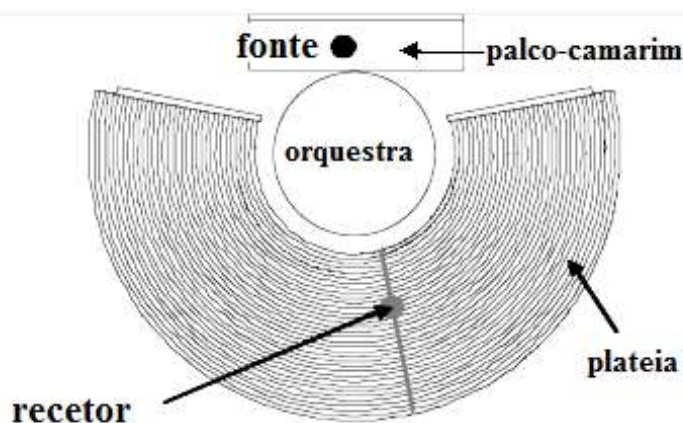


Fig. 3.1 – Planta do teatro clássico grego
(adaptado de [43])

Paralelamente a estas evoluções, o teatro foi sendo ampliado, suportando plateias cada vez maiores, agravando-se desta forma os problemas de acústica, característicos de espaços ao ar livre. Com o objetivo de projetar a voz até aos lugares mais afastados, as máscaras que os atores utilizavam passaram a ter uma espécie de megafone interno [42]. Itúvius Atrius, em parte, a “perfeição acústica” do teatro grego à existência de vasos ressonantes em utilizados nos degraus da plateia. Estes são mencionados pelo arquiteto e engenheiro romano na sua obra: “façam-se vasos de bronze proporcionais à grandeza do teatro; sejam fabricados de tal forma que, ao serem percutidos, possam fazer com que os sons musicais ressoem em sequência, de um intervalo de Quarta, passando pela Quinta, até chegar à Décima Sexta. Após o que, construídas celas entre os assentos do teatro, serão aí dispostos de tal forma que não encostem em nenhuma parede e tenham ao seu redor espaços vazios, segundo proporções musicalmente estabelecidas” [44]. Um ressoador sem material absorvente no seu interior permite uma amplificação do som, sendo de extrema importância num recinto ao ar livre.

A forte inclinação da arquibancada é um aspeto que influencia fortemente a boa audibilidade neste tipo de espaço. Num espaço fechado existem imensas reflexões nas superfícies envolventes, que devolvem grande parte da energia sonora sobre a audiência, já num espaço ao ar livre a inclinação é decisiva na absorção, sendo que quanto maior a inclinação (até certo limite) maior será a absorção. A existência da *Skéne*, atrás do palco, era um fator relevante para a acústica dos teatros, pois funcionavam como elemento refletor, permitindo assim um aumento do nível sonoro.

O sucessor do teatro clássico grego foi o teatro helénico, distinguindo-se do anterior em algumas características como, por exemplo, o palco elevado, a área da orquestra em pedra (no teatro clássico o piso da “orquestra” era a terra), aumento notável da *Cavea*, com capacidade para um maior número de pessoas, entre outros.

Com origem no teatro grego, surgiu o teatro romano, o qual segue aproximadamente o mesmo modelo. Enquanto os gregos utilizavam os teatros essencialmente para fins religiosos, os romanos faziam dos teatros espaços para diversão do público. A área de audiência do teatro romano era semicircular e estava unida ao edifício do palco, tornando-se num corpo arquitetónico único e fechado. O teatro romano era erigido em solo plano, não seguindo a topografia do terreno, sendo construído dentro da cidade. O palco do teatro romano era longo e as suas paredes alcançavam a mesma altura da *Cavea*, projetando, conseqüentemente, mais energia sonora para a audiência. O crescimento dos espetáculos, que tiveram a sua origem em arenas de lutas, levou à necessidade de espaços mais amplos e não,

necessariamente, frontalistas. Por este motivo, vários anfiteatros, arenas de forma circular ou oval, foram construídos naquela época [42].

A figura 3.2 apresenta, esquematicamente, um pouco da evolução dos espaços dedicados a espetáculos para grandes audiências.

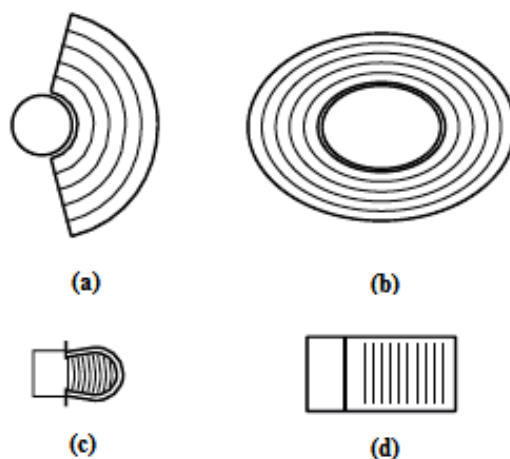


Fig. 3.2 – Plantas historicamente dominantes das estruturas dos auditórios:
 (a) teatro clássico grego (planta em forma de leque); (b) arena romana clássica;
 (c) teatro barroco (planta em forma de ferradura); (d) sala de concertos retangular do século XIX [5]

Foi no século XI que o teatro surgiu na Europa, surgindo como meio de divulgação de ensinamentos da Igreja. As principais características dos teatros da época em questão eram o grande volume e as superfícies construídas com materiais acusticamente reflexivos, tais como pedra e alvenaria, conferindo aos recintos uma grande sobreposição sonora.

Já no século XVI, em Itália, surgiu o teatro moderno, que veio reintroduzir elementos clássicos e formas proporcionais. Na ausência de luz elétrica, estes locais eram iluminados naturalmente, através de aberturas na cobertura ou de grandes janelas, sendo que os espetáculos aconteciam principalmente durante o dia. Em ocasiões noturnas poderiam ser iluminados por velas e tochas tendo como desvantagem uma limitação do tamanho do recinto.

Os teatros renascentistas surgiram como um novo marco para os projetos de teatros e auditórios, assim como para a acústica arquitetónica [45]. Algumas características da antiguidade foram recuperadas, porém estes desenvolveram-se em espaços fechados, tendo dois espaços acusticamente distintos interligados por uma abertura: um de grande volume (para a audiência) e outro de menor volume. Devido às suas diferentes condições acústicas, de permanência do som e reflexões, criava-se um desafio acústico.

No século XVII deu-se novo desenvolvimento da acústica devido à crescente estima pela música erudita. As famílias nobres amantes da música e o crescimento das cidades e da burguesia ditaram a necessidade de espaços maiores para escutar música. E aqui surge o novo desafio para os arquitetos da época: a realização de espaços fechados para uma plateia cada vez maior. Estudaram formas de propagação do som em recintos fechados e as melhores formas de reforçar o som através de reflexões. Estes espaços proliferaram ainda mais nos séculos seguintes, XVIII e XIX na Europa, e os problemas acústicos eram cada vez mais notáveis, atuando os construtores de forma intuitiva e com recurso à experiência adquirida pelos auditórios construídos até então.

3.2. ESTADO ATUAL DA ACÚSTICA DE AUDITÓRIOS

Wallace Clement Sabine foi um físico que, na virada do Séc. XIX para o Séc. XX, se dedicou seriamente à Acústica, na interseção entre a física e a arquitetura. Explicou como essas duas áreas se deveriam coordenar de forma a que as comunicações sonoras, verbais e musicais fossem corretamente percebidas pelo público dos auditórios. Em diversos escritos Sabine refere que, de forma a obter o melhor resultado prático em termos acústicos, a solução deve ser anterior e não posterior à construção do edifício. Diz que, com o objetivo de conseguir obter um som com qualidade num auditório, é necessário que:

- O som seja suficientemente forte;
- As componentes simultâneas de um som complexo mantenham as suas intensidades relativas;
- Os sons sucessivos em rápida articulação, tanto de palavras como na música, sejam claros e diferenciados, livres uns dos outros e de ruídos alheios [46].

Barron [5] refere que estas são as condições necessárias e suficientes para uma boa audição. Para o som ser forte é preciso estar próximo da fonte, pois com o afastamento a intensidade diminui. Contudo, quando a audiência é maior uma forma de contornar este problema é a criação de balcões. A inclinação apresenta influência também, pois se a audiência estiver num plano horizontal, as ondas sonoras alcançarão a área dos ouvintes perdendo energia em função de parte delas ser absorvida pelos espetadores, sendo que alguma inclinação permitirá que ouvintes numa zona mais afastada recebam ondas que ainda não sofreram absorção.

É no século XX que o valor da acústica é comprovado, já após Sabine, no século anterior, ter correlacionado o volume, os materiais e o tempo de reverberação, permitindo um desenvolvimento rápido dos princípios acústicos. Esta evolução permitiu alcançar uma homogeneidade na receção sonora da plateia, ao contrário do que acontecia até então, onde existia uma hierarquia social que facultava a existência de lugares onde a receção sonora era mais fraca do que nos chamados lugares nobres, com boas condições de receção sonora.

A forma retangular do recinto foi uma resposta arquitetónica que permitiu a referida evolução da qualidade acústica, em conjunto com formulações matemáticas do tempo de reverberação. No entanto, é necessário evitar que a sala fique em forma de paralelepípedo, pois pode promover a existência de ressonâncias e ondas estacionárias, as quais podem comprometer a qualidade acústica do espaço. Note-se, que paredes lisas e paralelas não são recomendadas, sendo possível quebrar o paralelismo com recurso a painéis, relevos e saliências que permitam conduzir o som desde o palco até à zona do auditório mais afastada do palco. Paredes convexas permitem também quebrar o paralelismo e a aplicação de revestimentos com capacidade de absorção das reflexões das ondas sonoras são também opções que podem evitar os efeitos indesejados [47]. Quanto mais abertas forem as paredes melhor será o desempenho, tanto acústico como visual para a audiência.

Leo Beranek é, provavelmente, o acústico que mais estudo dedicou aos auditórios para música até aos dias de hoje. Em 1962 fez um trabalho exaustivo de análise de 47 auditórios para música mundialmente conhecidos e sete casas de ópera (54 no total). No seu livro *Music, Acoustics and Architecture* de 1962 [48], Beranek faz uma apresentação e análise de cada um dos auditórios, encontrando falhas e qualidades acústicas em todos eles.

A literatura do projeto de salas de concertos é mais recente do que a dos teatros. A primeira grande revisão da acústica de salas de concertos surgiu no livro anteriormente referido de Beranek. Foi o pioneiro a analisar acusticamente os auditórios com base num grande número de parâmetros acústicos

subjetivos, tais como intimidade, vivacidade e calor. Beranek fez revisões à sua própria publicação em 1996 e em 2004, sendo que a mais recente considera 82 salas de concertos 18 salas de ópera.

Langhans [49] publicou, em 1810, um livro notável no qual não mostra apenas que as reflexões iniciais melhoram a inteligibilidade, como também tem percepção de que a reverberação pode proporcionar vantagens na qualidade acústica de um espaço [50].

Outro avanço foi conseguido por Scott Russell [51] ao calcular o perfil ideal do piso ao longo da profundidade do auditório, com vista a uma boa visão e audição adequada. Determina que o perfil adequado deve ser curvado, de forma a proporcionar condições de visualização e audição equivalentes para toda a plateia.

Em 1930, foram publicados dois livros influentes, os quais permitiram consolidar o progresso da acústica de salas: *Plannin for good acoustics*, de Bagenal e Wood [52], e *Architectural acoustics*, de Knudsen [53]. Com eles ficou registado o progresso no conhecimento de novos parâmetros, adquirindo estes uma significativa importância para a música.

Apesar do grande conhecimento adquirido até à altura, a excelência da acústica dos auditórios ainda não tinha sido atingida. O tempo de reverberação assumia um papel de grande importância, no entanto, não garantia, só por si, uma boa acústica do auditório, tendo-se concluído que outros aspetos requeriam consideração para o sucesso da conceção do espaço: a sua forma e o seu tamanho, por exemplo.

Há vários aspetos a ter em conta no projeto de um auditório sendo que o palco é um espaço com bastante importância. Pode assumir as mais variadas formas e localizações, em função da plateia, podendo esta localizar-se em frente ao palco ou circunda-lo por dois ou mais lados. As suas dimensões estão dependentes do uso e da capacidade do auditório. Caso o espaço seja dedicado apenas para leitura, um palco de betão, por exemplo, será aceitável; para espaços multifuncionais torna-se mais recomendado um palco com tábuas de madeira, com um espaço de ar por baixo do piso, de forma a proporcionar amplificação do som nas baixas frequências, a facilitar a fixação de um possível cenário (no caso de teatros) e mesmo a garantir a segurança e conforto de bailarinos, no caso de danças.

A conceção do projeto arquitetónico de um auditório inicia-se com o estudo da volumetria e da geometria. O formato do auditório é considerado um dos aspetos mais relevantes na fase de projeto e está diretamente relacionado com a qualidade acústica do espaço.

Desta forma, definir a forma do auditório para, posteriormente, introduzir a função a que se destinará, com uma tentativa de adequação à arquitetura, é um procedimento que deve ser evitado por profissionais que desenvolvem este tipo de projetos, assim como outros espaços de natureza semelhante.

O volume do auditório deve ser escolhido em função da utilização que o espaço virá a ter. Para concertos é recomendado um grande volume, possibilitando uma maior dispersão sonora. No caso da palavra, caracterizada por sons de fraca intensidade, um espaço de volume reduzido é o mais recomendado sendo que, em caso contrário, se pode optar pela utilização de sistemas de amplificação sonora, permitindo assim que a palavra possa ser compreendida por toda a plateia, mesmo a mais distante [54].

Estes parâmetros, forma e volume, assim como também os materiais utilizados, são definidores da propagação do som no interior do espaço, determinando a qualidade acústica do auditório. O som percebido por um ouvinte dentro de um recinto fechado é resultado do som direto, da fonte sonora, e das suas múltiplas reflexões. A arquitetura do espaço deve então ser moldada tendo em conta os objetivos do espaço, utilizando superfícies refletoras de forma a aumentar a intensidade sonora e a distribuir o som pelo auditório, especialmente importante para os lugares mais afastados do palco. Na

figura 3.3 apresenta-se um esquema do comportamento das ondas sonoras no interior de um espaço, sendo visíveis as múltiplas reflexões, as quais podem ser manipuladas através do diferente posicionamento das superfícies envolventes [45].

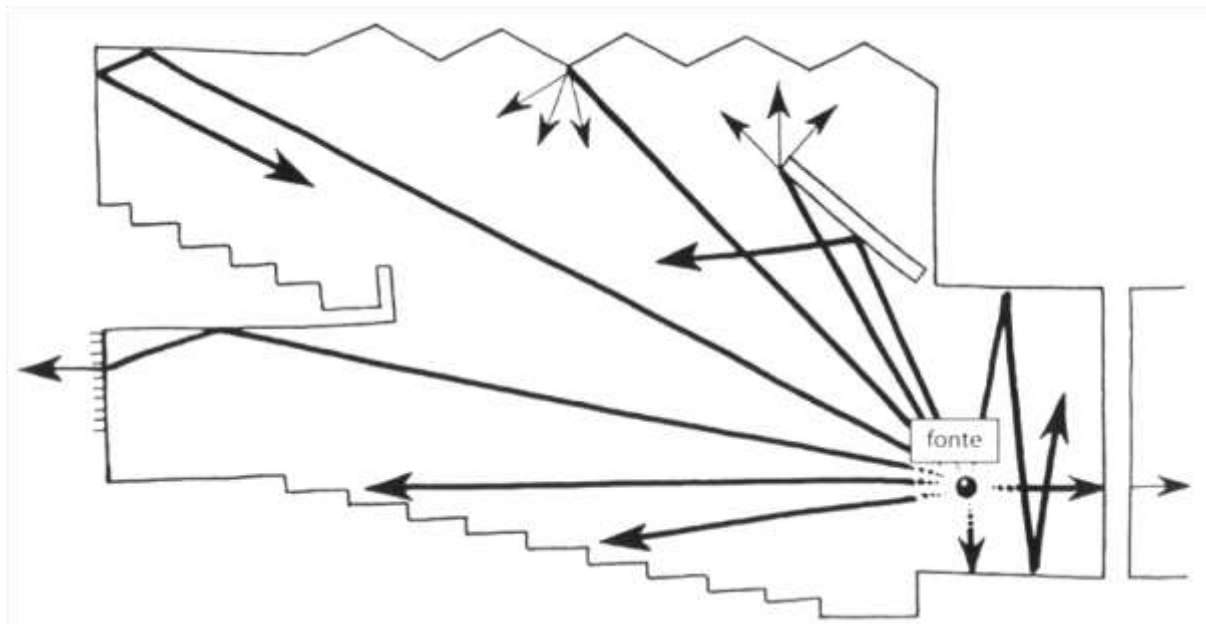


Fig. 3.3 – Propagação das ondas sonoras no interior de um recinto [54]

O projeto de um auditório deve passar por várias etapas, sendo que o produto final deve ter em conta o objetivo final do espaço e as suas características, como por exemplo a dimensão da plateia que irá usufruir do auditório. Simplificadamente, o processo deverá ser o seguinte [55]:

1. Determinar a dimensão da plateia;
2. Determinar a área de piso da plateia (ver quadro 3.1);
3. Definir a forma do piso da plateia, considerando a capacidade do auditório;
4. Verificar a distância entre o palco e a última fila: se esta for maior que 25 m, para auditórios, e 20 m, para teatros, será necessário um balcão superior de forma a diminuir a respetiva distância. Caso não seja suficiente, será necessário aumentar a largura das paredes laterais, mudar o formato da plateia ou, simplesmente, aceitar alguma não conformidade.
5. Analisar a saliência do balcão e a sua abertura para o palco (ver figura 3.4);
6. Escolher o modelo das cadeiras a ser utilizado e definir o fabricante;
7. Definir a inclinação da plateia, incluindo a do balcão, caso exista;
8. Definir a altura do palco e desenhar as placas refletoras do teto;
9. Calcular o volume do auditório e verificar se está dentro dos valores recomendados (ver quadro 3.1). Caso não esteja, redefinir os painéis refletores, aceitando alguma não conformidade;
10. Verificar o trajeto das ondas sonoras, diretas e refletidas, garantindo que não excedem uma diferença de 20 m entre elas;
11. Estabelecer um tempo de reverberação ideal e calcular a necessidade de absorção do auditório;
12. Determinar a necessidade de absorção do espaço, começando pela parede do fundo, seguindo pelo fundo das paredes laterais e, finalmente, as zonas do teto adjacentes às paredes laterais;
13. Analisar as condições de ruído de fundo e providenciar equipamento de reforço sonoro para espaços com mais de 100 lugares.

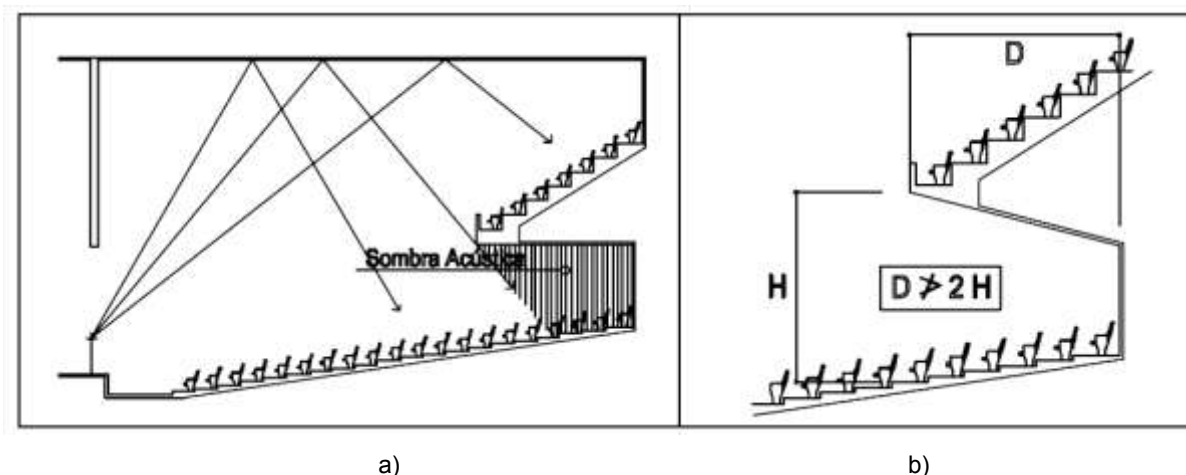


Fig. 3.4 – Projeto do balcão:

- a) Desenvolvimento de zona de sombra acústica das ondas sonoras refletidas devido a um errado projeto do balcão;
- b) Relação entre a profundidade da plateia por baixo do balcão e a sua altura, de forma a não ocorrerem sombras acústicas.

Quadro 3.1 – Valores recomendados da área e volume por assento [55]

Valores recomendados	
Área por assento (m ²)	0,55 – 0,7
Volume por assento (m ³)	2,0 – 5,0

É recomendado que se complemente esta metodologia com uma análise de projetos de tipologias semelhantes ao projeto em estudo e conhecimentos técnicos e históricos do projeto de auditórios.

Cada espaço acústico deve ter como principal preocupação o desempenho do som na sua arquitetura, sendo que:

- Espaços de leitura devem absorver o som e permitir aconchego;
- Espaços de gravação devem estar isolados, de forma a que os sons não sofram alterações;
- Auditórios devem desempenhar diversas variações de tonalidade e reverberação, de acordo com seu uso, sendo que o mais correto seria que se projetassem diferentes espaços em função das suas finalidades.

O objetivo tido como ideal é que cada auditório seja projetado para apenas uma funcionalidade, no entanto, este torna-se, usualmente, inviável e dispendioso. Para contornar esta limitação existem recursos que possibilitam um melhor desempenho, seja qual for a funcionalidade do espaço (auditórios de música, teatro, cinema, conferências, etc.). A denominada acústica variável baseia-se em diversos métodos, sendo que um dos que se mostra mais eficaz é a variação do volume interno da sala, por meio de variações de altura do teto. Além disso, outra vantagem que o teto pode apresentar é a possibilidade de, por meio de painéis, direcionar o som para áreas preferenciais, sendo que o melhor desempenho, logo objetivo principal, é conseguido quando o som é direcionado para toda a plateia homogeneamente, sem que se criem zonas de sombreamento para o som.

3.3. AUDITÓRIOS E SUAS EXIGÊNCIAS FUNCIONAIS

3.3.1. AUDITÓRIOS PARA PALAVRA

É uma observação comum que uma boa acústica para a palavra é, geralmente, incompatível com uma boa acústica para a música. Até há pouco tempo, considerava-se que as diferenças podiam ser explicadas com base, apenas, no tempo de reverberação. No entanto, é sabido que para a música, por exemplo, é necessário ter em conta uma série de outros parâmetros, dos quais o tempo de reverberação é apenas um.

Com a palavra a situação é ligeiramente mais simples. Um bom nível de inteligibilidade, associado a um reduzido nível de pressão sonora de ruído de fundo, garante, à partida, satisfação da parte do ouvinte. Na generalidade, espaços com um tempo de reverberação próximo de um segundo funcionam bem para a palavra.

Saunders [56] conduziu experiências com a transmissão da palavra em espaços abertos. O seu maior resultado foi concluir que a distância máxima para uma correta audição da palavra é de 28 metros. No entanto, caso o ruído de fundo seja audível, este terá influência no resultado, provocando um decréscimo no limite máximo da distância a que poderá estar o ouvinte.

Em espaços fechados a propagação do som já se comporta de outra forma. Neste caso, um perfil acústico tem de ter em conta a acústica do auditório, incluindo o seu tempo de reverberação. Para se conseguir uma boa inteligibilidade, uma grande fração de energia sonora inicial é necessária, simultaneamente com uma reduzida energia sonora tardia. Esta grande fração de energia sonora inicial consiste no som direto e nas reflexões iniciais. Se as superfícies envolventes estiverem direcionadas para refletir o som para a audiência, conseguir-se-á não apenas um aumento da energia inicial, como também uma diminuição da energia mais tardia, revelando-se esta técnica duplamente útil [5].

Em espaços dedicados à palavra, pode ser aplicado apenas um simples critério, ao contrário de uma necessária análise multicritério para espaços dedicados à música. Sendo o critério de projeto consideravelmente mais restrito, este torna-se mais absoluto, sendo a margem para erro menor. Em espaços pequenos é relativamente simples conseguir uma boa inteligibilidade da palavra, um adequado tempo de reverberação pode ser suficiente para atingir este objetivo; em espaços de grande dimensão tempos de reverberação mais curtos tornam-se mais apropriados, associados a um grande número de reflexões iniciais, podendo este último requisito ser crucial para uma boa qualidade acústica.

A qualidade acústica de um auditório depende da sua funcionalidade, sendo que os valores ideais dos parâmetros acústicos que a determinam também variam consoante a utilização do espaço. No que diz respeito ao tempo de reverberação, já se referiu que deve ser reduzido, aspeto que revela unanimidade para a totalidade dos autores. No quadro 3.2 apresentam-se os valores ideais propostos por Cavanaugh [26] para espaços onde as principais atividades são baseadas na palavra.

Carvalho [1] apresenta intervalos de valores ideais relativamente mais curtos:

- Auditório (palavra) – $0,7 < TR < 0,8$ (s);
- Cinema – $0,8 < TR < 1,0$ (s).

Quadro 3.2 – Valores ideais do tempo de reverberação para espaços dedicados à palavra [26]

Função	TR recomendado (s)		
	Limite mínimo	Ideal	Limite máximo
Salas de leitura e de conferências	0,6	0,9 – 1,1	1,4
Cinema	0,7	0,8 – 1,2	1,3
Auditórios escolares	1,3	1,5 – 1,8	1,9

Outro parâmetro com grande influência na qualidade acústica de um auditório para a palavra é nível de pressão sonora do ruído de fundo. Valores elevados deste parâmetro podem provocar incomodidade para o orador, podendo ter uma grande influência negativa na inteligibilidade da palavra. A incomodidade é avaliada com recurso às designadas curvas de incomodidade. No quadro 3.3 indicam-se valores ideais máximos de NC e NR para atividades que assentam na palavra, os quais são determinados através das curvas do nível de pressão sonora do ruído de fundo.

Quadro 3.3 – Valores máximos ideais de NC e NR [33], [5]

Tipo de espaço	Máximo ideal	
	NC [33]	NR [5]
Salas de cinema	30	-
Salas de conferências	30	30
Pequenos auditórios (até 500 lugares)	-	25

3.3.2. AUDITÓRIOS PARA TEATRO

Uma boa linha de visão é um requisito importante para todo o tipo de auditórios, sendo que para teatro este aspeto ganha ainda uma maior importância. Esta necessidade introduz diversas restrições no projeto dos auditórios as quais, em conjunto com a introdução do cenário no palco, reduzem o leque de opções para os teatros. A distância entre o palco e o espetador mais afastado fica também limitada caso se ambicione registar as expressões faciais e os gestos dos atores. Pressões comerciais para aumentar o tamanho da plateia dos teatros têm provocado que os seus projetos tenham sido estabelecidos até então com uma sucessão de erros, sendo que o principal objetivo nesta área passa por reduzi-los ao máximo, ou mesmo até, eliminá-los.

O teatro requer uma boa inteligibilidade da palavra, sendo que uma boa qualidade da fala requer atenção em dois aspetos: a proporção da energia sonora inicial e o rácio sinal/ruído. Entre os dois, a energia sonora inicial requer uma maior preocupação e verifica-se que problemas com o rácio sinal/ruído normalmente só surgem quando existem deficiências com as reflexões iniciais [5].

Relativamente ao tempo de reverberação, Carvalho [1] apresenta um intervalo de valores ideais entre 0,7 e 0,9 segundos para teatros, enquanto Cavanaugh [26] sugere os valores indicados no quadro 3.4, diferenciando espaços para drama e pequenos teatros.

Quadro 3.4 – Valores ideais do tempo de reverberação para espaços dedicados ao teatro [26]

Função	TR recomendado (s)		
	Limite mínimo	Ideal	Limite máximo
Drama	0,8	0,9 – 1,1	1,2
Pequenos teatros	1,1	1,2 – 1,4	1,5

Quanto às curvas de incomodidade, Barron [5] sugere um NR máximo de 20 para teatros de grandes dimensões e Silva [33] um valor de 25 para o NC. Verifica-se que os valores para teatros são ligeiramente menores do que para a fala, significando que em ambientes de teatro o ruído ainda é menos tolerado do que em auditórios para palavra.

Existem diversas tipologias de configuração para envolver o espaço destinado ao teatro (o palco) com a disposição dos ouvintes (a plateia), podendo esta disposição dar-se em um ou mais níveis. A relação entre o palco e a audiência deve ser o primeiro ponto desenvolvido no projeto arquitetónico de um auditório.

De entre as diversas tipologias existentes, destacam-se as seguintes:

- Teatro de arena – o palco encontra-se num nível inferior ao da plateia, estando esta disposta em todos os lados ou ao longo de toda a circunferência do palco;
- Teatro Isabelino – a plateia envolve o palco em três lados (frente e laterais);
- Teatro com proscénio – o palco situa-se num nível superior e a plateia tem uma disposição frontal;
- Teatro múltiplo – possibilita a montagem do palco em diversas posições.

O tipo de teatro é bastante determinante na realização acústica, maioritariamente devido ao grau de envolvimento com a plateia. Este pode assumir ângulos pequenos, como acontece no teatro com proscénio, até ângulos de 360°, no teatro de arena. Devido à direccionalidade da voz humana, quanto maior for o ângulo de envolvimento palco/plateia, menor deverá ser a distância entre o palco e o lugar mais afastado. Como tal, o teatro com proscénio é, provavelmente, o teatro que apresenta a maior capacidade de audiência de todos os teatros referidos. No entanto, alguns problemas poderão surgir nesta tipologia de teatro em casos de volumes excessivos. Um método simples que pode ajudar a contornar este problema, providenciando boas condições acústicas nos lugares mais afastados do palco, é a colocação de superfícies refletoras junto a estes [5].

Um volume pequeno para um auditório é, geralmente, um benefício para a acústica. Desta forma, será mais provável obter um reduzido tempo de reverberação e evitar a existência de lugares demasiadamente afastados do palco.

3.3.3. AUDITÓRIOS PARA MÚSICA

O projeto de uma sala de música não passa apenas por uma tarefa técnica ou científica mas também por um trabalho de arte. O recinto deve, para além de propiciar boas condições para a execução de trechos musicais, permitir a sua transmissão, em condições adequadas, para as pessoas presentes na plateia. Em geral, um auditório deve proporcionar ao espetador conforto, segurança, boa iluminação, boa visão e condições acústicas convenientes [57].

Atualmente, para além de deverem acomodar reportórios musicais com vários séculos, os auditórios devem ser capazes de arcar grandes assistências, pelo que se tornam recintos suscetíveis a problemas acústicos bem diferenciados dos que são levantados por recintos de menores dimensões. Acresce o facto de que lhes é exigido um carácter polivalente, em termos de estilos musicais, o que torna complexo o projeto destes recintos.

Atingir o grau de satisfação num auditório de música não implica apenas que cada ouvinte tenha visão e audição adequadas, mas também que todos os componentes do grupo em atuação se ouçam adequadamente uns aos outros e sintam que funcionam como um conjunto, equilíbrio que, para além de depender das características do grupo, deriva das condições acústicas proporcionadas, principalmente, pela envolvente da zona do palco.

Uma observação usual revela que a acústica de uma sala depende fortemente do lugar de audição, podendo existir os denominados lugares “on s” e “maus”, quase vizinhos na audição direta. A definição da qualidade acústica depende amplamente das condições físicas no ponto do recetor, para além da sua própria audição, uma fonte de julgamentos de coerência difícil [58].

Anteriormente, considerava-se que o tempo de reverberação deveria crescer com o aumento do volume, para em certa medida, compensar a diminuição da intensidade do som em salas de grandes dimensões. No entanto, esta forma de raciocínio já foi ultrapassada, sendo que, atualmente, considera-se que o tempo de reverberação ideal é praticamente independente do volume. Após dúvidas perante diversos resultados, Kuhl [59] chegou a esta conclusão após um estudo exaustivo de salas com volumes compreendidos entre 200 m³ e 1400 m³.

O tempo de reverberação oferece uma primeira indicação global da qualidade acústica do auditório, se o seu valor se encontrar dentro dos valores recomendados (quadro 3.5). No entanto, não deixa de ser apenas uma aproximação de qualidade, pois não é condição suficiente de qualidade. Uma difusão conseguida, abrangendo toda a plateia, é pretendida, assim como da mesma forma, o atraso das primeiras reflexões deve ser conveniente e a sucessão de reflexões posteriores deve apresentar uma diminuição harmoniosa.

rever eração determina a “vida” de um auditório. Silva [57] considera que um tempo de reverberação inferior a 1,6 segundos, para as frequências de 500 Hz e 1000 Hz, conduz a auditórios pouco vivos.

O intervalo de tempo que decorre entre as incidências do som direto e da primeira componente de reflexão é, praticamente, o aspeto determinante da intimidade acústica de um auditório. Este está, em parte, dependente das dimensões do espaço e, do ponto de vista acústico, auditórios com grandes volumes apresentam problemas à obtenção de uma intimidade acústica adequada. Em auditórios para a música o valor do intervalo entre as duas incidências não deverá exceder os 20 milissegundos (um valor superior é aceitável para óperas). Caso este valor seja ultrapassado num auditório já construído, a solução pode passar pela introdução de superfícies refletoras, dispostas adequadamente.

Outro atributo com relativa importância na acústica de um auditório de música é a razão entre os tempos de reverberação nas baixas frequências e os valores correspondentes nas médias frequências, designado de “calor”, em muito semelhante à anteriormente referida “vida”. utilização de superfícies absorventes nas baixas frequências provocará uma redução do calor do recinto. Esta razão deverá ser, dentro dos possíveis, na ordem de 1,25.

Quadro 3.5 – Valores ideais do tempo de reverberação para espaços dedicados à música [26]

Função	TR recomendado (s)		
	Limite mínimo	Ideal	Limite máximo
Comédia musical tipo Broadway, operetas	1,0	1,2 – 1,4	1,5
Concertos semi-clássicos com sistema de amplificação sonora	1,1	1,2 – 1,6	1,9
Música de câmara	1,2	1,4 – 1,7	1,9
Ópera	1,3	1,5 – 1,8	1,9
Coros	1,6	1,7 – 2,0	2,2
Sinfónica (romântica)	1,6	1,7 – 2,1	2,2
Orquestra	1,9	2,0 – 3,4	-

A criação de um campo sonoro difuso, característica particularmente importante para a qualidade acústica do espaço, evitará que os trechos musicais produzidos no auditório tenham um soar “áspero”. Além de evitar faltas de uniformidade do campo sonoro, eliminar ecos, distorções e ruídos estranhos ao espetáculo é fundamental para o ouvinte conseguir ter uma boa receção do som produzido.

Quanto à análise da incomodidade, gerada por ruídos alheios ao espetáculo, através das curvas de incomodidade, é recomendado, como valor máximo, um valor de 20 para as curvas NC [33] em salas de concertos.

3.3.4. AUDITÓRIOS COM FINS MÚLTIPLOS

O maior problema no momento da construção de um auditório é decidir qual será a sua principal funcionalidade. A acústica para uma orquestra tem exigências claramente diferentes da acústica de uma sala de conferências. No entanto, muitas instituições, tais como auditórios de escolas e pequenos colégios, não têm fundos nem espaço para construir mais do que um auditório. E é neste âmbito que surgem os auditórios com fins múltiplos.

Como resultado, a boa acústica para algumas atividades é, por vezes, sacrificada. Contudo, os auditórios podem ser planeados para proporcionar uma boa acústica para diferentes tipos de atuações, sendo projetados com condições que possibilitem alterações nas suas características acústicas.

O problema mais crítico na variação da acústica do auditório é determinar como modificar o seu tempo de reverberação. Muitos auditórios modernos dispõem de cortinas compostas por material absorvente que permitem afinar o valor deste parâmetro, no entanto, é quase imprescindível uma grande variação de volume para alterar o tempo de reverberação significativamente. A solução para esta alteração passa pela colocação de um teto retrátil na zona da audiência. Caso exista um balcão no auditório, este deve ser suprimido pelo teto assim como também cerca de um terço do volume da audiência, para se conseguir uma redução significativa do volume da sala. As superfícies do teto devem ser revestidas por material absorvente, de forma a evitar que ocorra um excesso de reflexões

prejudiciais na sua superfície. Esta alteração de volume provoca uma perda no número de lugares do auditório, no entanto, como a maioria dos lugares se encontra no piso inferior, a redução não será assim tão significativa [60].

De forma a criar condições de boa acústica para a fala, num auditório de grandes dimensões e com elevado tempo de reverberação, é também necessária a redução do volume. Este problema é solucionado com a utilização de uma cortina forte amovível entre duas secções do piso principal. A escolha da cortina deve-se ao facto de esta não refletir o som de volta para audiência, o que poderia afetar negativamente a inteligibilidade da palavra. Esta solução produz uma redução substancial da área de audiência, mas mesmo nas maiores palestras e conferências, raramente é ultrapassada uma audiência de 500 pessoas.

Para um auditório poder comportar diversas funcionalidades é necessário recorrer à acústica variável, conforme foi explicado, através da manipulação do volume do espaço e das características de absorção das superfícies envolventes. O aumento da absorção é a abordagem mais simples para alterar o tempo de reverberação, porém, esta alteração tem o efeito adicional de reduzir o nível sonoro, o que pode ser inaceitável para as configurações com um baixo tempo de reverberação [5].

Cavanaugh [26] sugere que o tempo de reverberação ideal deve estar compreendido entre 1,6 e 1,8 segundos, podendo este intervalo ser alargado, de forma aceitável, para os valores de 1,4 e 1,9 segundos.

O desenvolvimento de técnicas sofisticadas para salas com múltiplos fins tem sido uma área com um desenvolvimento notável nos últimos anos. Uma maior compreensão do comportamento acústico de recintos tem permitido desenvolver esta habilidade de satisfazer a diversos requisitos num só espaço. Este desenvolvimento advém do conhecimento desenvolvido até então para salas com fins únicos, espaços mais simples, onde é possível, geralmente, atingir uma melhor qualidade acústica.

4

ESTUDO DE CASO

4.1. O AUDITÓRIO DA FEUP

4.1.1. ENQUADRAMENTO GERAL

O espaço em estudo é o auditório nobre da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (Fig. 4.1), a qual está inserida no polo da Asprela, uma área que engloba diversos edifícios universitários e o Hospital de S. João, em Paranhos, Porto. Trata-se de um edifício recente inaugurado em 2001.



Fig. 4.1 – Localização do auditório da FEUP, Paranhos, Porto
(adaptado de [61])

O auditório da FEUP compreende uma sala com capacidade máxima de 416 lugares na plateia e de 99 lugares no balcão, perfazendo um total de 515 lugares. Tendo em conta as dimensões e capacidades de diversos auditórios, o auditório em causa é considerado um pequeno auditório. No entanto, realçando o aspeto que este auditório está inserido numa faculdade, abrangendo um universo de cerca de 7 mil alunos, e comparando-o com os espaços comuns existentes neste tipo de espaço como, por exemplo, salas de aula e anfiteatros, é entre a comunidade da FEUP considerado um “grande auditório”.

O recinto encontra-se equipado com modernos sistemas de som, meios de apresentação e de comunicação multimédia, iluminação cénica e projeção de cinema. Em espaços anexos ao auditório existem três camarins, três gabinetes para tradução simultânea, uma sala de acolhimento, uma área de apoio com 173 m², um bengaleiro e sanitários.

O auditório é prioritariamente um espaço vocacionado para eventos institucionais, seminários, conferências ou outras reuniões científicas. As qualidades acústicas do espaço e os equipamentos de que está dotado permitem ainda a realização de eventos culturais de baixa complexidade cénica, tais como recitais e concertos de pequena dimensão ou a projeção de cinema, e que este seja utilizado como espaço para gravação de *performances* musicais [62].

Na figura 4.2 apresenta-se a planta do auditório, em forma de leque [63]. Quinze filas de lugares, divididas a meio pela coxia central, perfazem a totalidade dos 416 lugares, sendo o número de lugares por fila ligeiramente variável. No piso superior, existem mais 99 lugares ao longo de 4 filas, separadas, na zona central, pela entrada nesta zona superior do auditório.

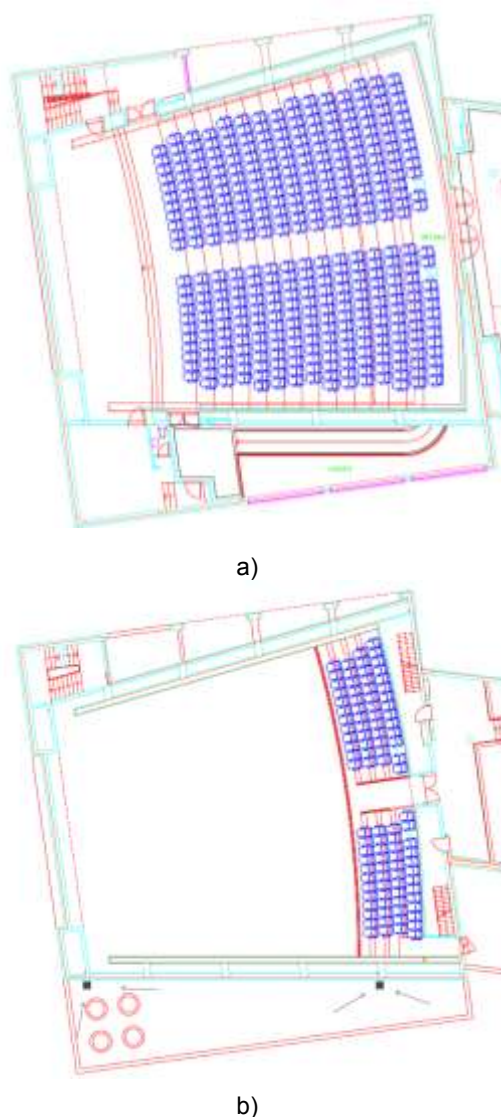


Fig. 4.2 – Plantas do auditório: a) plateia e palco, b) balcão [63]

Um corte, na zona central, do auditório, é apresentado na figura 4.3. É notório que a altura no interior do recinto não varia de forma constante, sendo ainda possível visualizar o balcão superior que limita, em altura, a zona mais afastada do palco, o qual é também limitado superiormente por uma zona de apoio ao auditório.

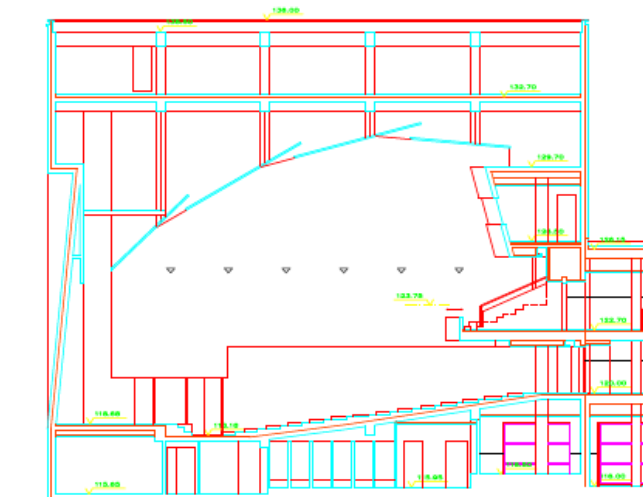


Fig. 4.3 – Corte do auditório da FEUP [63]

4.1.2. CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA E ARQUITETÓNICA

O auditório da FEUP apresenta determinados pormenores que evidenciam o tratamento acústico deste espaço. O revestimento das superfícies torna-se determinante para este aspeto:

- O pavimento, excetuando os degraus em madeira que dão acesso ao palco, é todo revestido a alcatifa (material absorvente sonoro, com especial relevância nas altas frequências);
- As cadeiras são de madeira, sendo grande parte revestida de estofa (Fig. 4.4);
- As paredes de fundo, da plateia e do piso superior – balcão, parte das paredes laterais, junto às paredes de fundo, assim como também o teto rebaixado na mesma zona do auditório, englobam ressoadores agrupados (Fig. 4.5);



Fig. 4.4 – Cadeira do auditório [foto da autora]

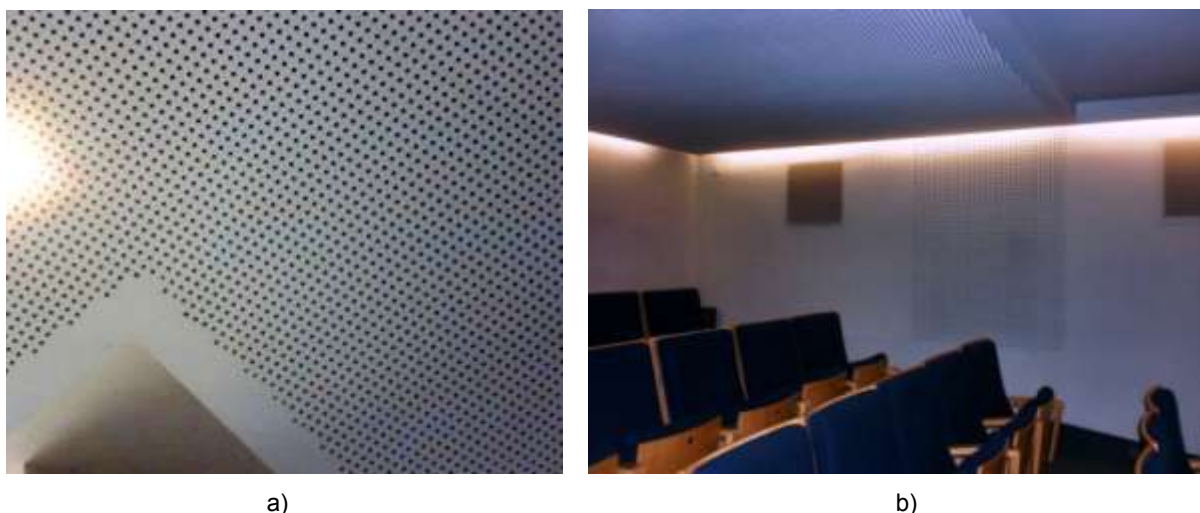


Fig. 4.5 – a) Ressorador agrupado, b) Ressorador agrupado na parede de fundo, em parte da parede lateral e no teto rebaixado, ambos na zona mais afastada do palco [fotos da autora]

Através de cálculos simples, e com recurso a ficheiro em AutoCAD, foi possível aferir os parâmetros arquitetónicos do recinto: comprimento, largura, superfície e volume, conforme se encontram no quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Valores dos diversos parâmetros arquitetónicos

Parâmetros arquitetónicos		
Comprimento (m)	Mínimo	20,37
	Máximo	22,27
	Médio	21,60
Largura (m)	Mínima	14,60
	Máxima	19,60
	Média	17,10
Altura (m)	Mínima	2,00
	Máxima	12,15
Superfície (m ²)	Plateia	287
	Palco	86
	Balcão	72
Volume (m ³)	Total	3317

Tendo em conta que a altura do auditório não varia de forma de constante, não faz sentido a apresentação do seu valor médio. É um teto falso, constituído por placas de gesso cartonado, com caixa de ar considerável, o qual integra grelhas de ventilação na vertical entre as placas de gesso, as

quais são visíveis na figura 4.4. É de notar que, na zona de entrada, o teto encontra-se rebaixado, a uma altura de 2 m, devido à existência do balcão superior, como foi referido anteriormente. É de prever que esta característica se revele uma vantagem em termos acústicos, considerando que possibilita o aumento do número de reflexões na zona mais afastada do palco (zona onde se encontra a fonte sonora), à qual o som direto chega com menos intensidade.

Destaca-se a existência de um avanço na parede, relativamente ao plano do pavimento, ao longo de ambas as paredes laterais do auditório, com uma espessura de 12 cm. Este engloba um sistema de iluminação, como é possível observar na figura 4.7..



Fig. 4.6 – Teto falso, de altura variável, com grelhas de ventilação verticais [64]

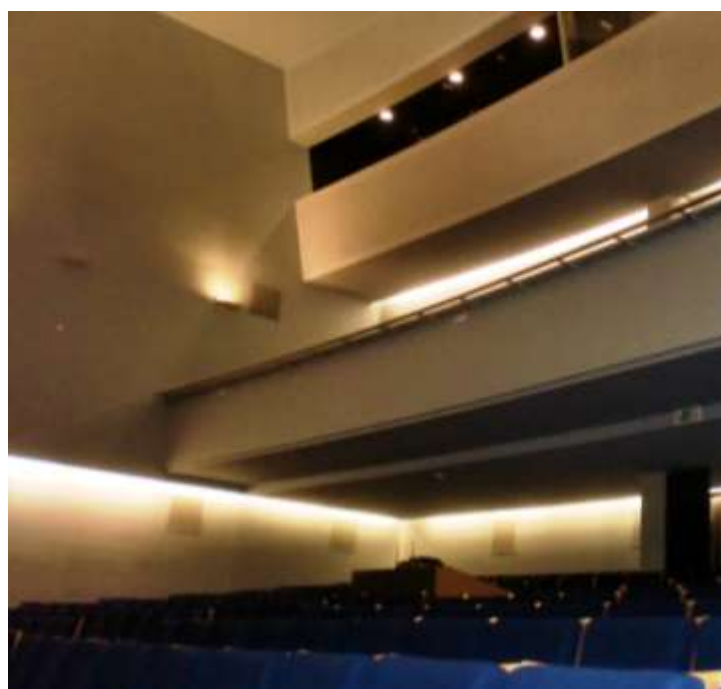


Fig. 4.7 – Balcão superior e saliência na parede lateral (parede falsa)
[foto da autora]

4.2. METODOLOGIA E EQUIPAMENTOS

4.2.1. PARÂMETROS ACÚSTICOS MEDIDOS

De forma a caracterizar acusticamente o auditório nobre da FEUP é necessário conhecer determinados parâmetros acústicos objetivos. Neste sentido, e com recurso a equipamentos disponibilizados pelo Laboratório de Acústica da FEUP, o Engenheiro António Eduardo Batista da Costa procedeu à realização da medição de determinados parâmetros acústicos:

- Tempo de reverberação;
- Nível de pressão sonora do ruído de fundo;
- Nível de pressão sonora do ruído de equipamentos;
- RASTI (*Rapid Speech Transmission Index*).

O tempo de reverberação, como previamente referido, é o tempo, em segundos, que o som demora a extinguir-se, correspondendo esta extinção a um decaimento de 60 dB, desde a cessação da fonte sonora. Contudo, devido às limitações dos equipamentos, este parâmetro é obtido com base em decaimentos de 20 dB ou 30 dB sendo feita, posteriormente, a extrapolação correspondente a um decaimento de 60 dB (T_{20} ou T_{30} , respetivamente). Este parâmetro está estreitamente relacionado com a geometria e a absorção do auditório sendo que, por regra, quanto maior o seu valor menor será a inteligibilidade da palavra no espaço.

O ruído de fundo é avaliado sem ocupação e com os sistemas de climatização desligados, sendo possível desta forma aferir os níveis de pressão sonora existentes no interior do auditório devidos unicamente ao ruído proveniente do exterior. A avaliação deste parâmetro é feita através da medição do nível de pressão sonora contínuo equivalente, L_{eq} , em dB, sendo posteriormente ponderado com o filtro A – L_{Aeq} , em dB, através de correções que visam assemelhar a sensibilidade dos equipamentos às do ouvido humano.

Efetuiu-se a medição do ruído dos equipamentos de climatização (AVAC), desta feita com os mesmos em funcionamento, permitindo determinar os níveis de pressão sonora existentes no auditório e perceber se a sua utilização se torna, ou não, incomodativa para os utilizadores. São obtidos, similarmente, o nível de pressão sonora contínuo equivalente, L_{eq} , em dB, e o mesmo com a ponderação do filtro A.

Visto que a vertente principal do auditório em estudo é a palavra, a inteligibilidade da palavra é crucial. O RASTI é o parâmetro que permite tirar conclusões acerca desta característica do espaço. O som emitido por uma fonte sonora não é sentido pelo recetor de forma igual ao original, pois sofre distorções e é mascarado pelo ruído de fundo, assim como também está sujeito às características reverberantes do recinto. Foram feitas medições do RASTI para os casos de situações sem recurso a qualquer sistema de amplificação sonora e com a utilização do mesmo.

4.2.2. EQUIPAMENTO UTILIZADO

Para a realização dos ensaios acústicos foram utilizados os seguintes equipamentos (pertencentes ao Laboratório de Acústica da FEUP):

- Fonte sonora *Brüel & Kjær*, modelo 4224 (Fig. 4.8);
- Sonómetro *Brüel & Kjær*, modelo 2260 (Fig. 4.9);
- Equipamento de RASTI *Brüel & Kjær* (Fig. 4.10):
 - Emissor, modelo 4225;
 - Recetor, modelo 4419;

- Microfone de 13 mm *Brüel & Kjær*, modelo 4189;
- Tripé portátil *Brüel & Kjær*, modelo UA0049;
- Medidor de distância *Bosch* DLE-40.



a)



b)

Fig. 4.8 – Fonte sonora *Brüel & Kjær*, 4224
[fotos da autora]



Fig. 4.9 – Sonómetro *Brüel & Kjær*, 2260
[foto da autora]



a)



b)

Fig. 4.10 – Equipamento de RASTI *Brüel & Kjær*: a) Emissor 4225, b) Recetor 4419
[fotos da autora]

4.2.3. METODOLOGIA DE TRABALHO

A avaliação do **tempo de reverberação** foi feita com recurso a uma fonte sonora (FS), a qual deve gerar um nível de pressão sonora suficientemente elevado de forma a não ser “contaminada” pela influência do ruído de fundo, e a um recetor, um sonómetro. A fonte foi colocada na zona central do palco e o sonómetro a uma altura de, aproximadamente, 1,30 m. O ruído emitido pela fonte tem características semelhantes a um ruído rosa e tem uma duração de 10 segundos. O sonómetro regista o nível de pressão sonora e o tempo de decaimento de 30 dB nas bandas de frequência de oitava entre os 63 Hz e os 8000 Hz, no entanto neste trabalho apenas serão utilizadas as bandas de frequência dos 125 Hz aos 4000 Hz. O tempo de reverberação é o valor resultante da extrapolação para 60 dB (T_{30}).

Para a avaliação deste parâmetro, foram feitas medições em quatro pontos distintos da sala, esquematizados na figura 4.11 (um dos quais no balcão, figura 4.11 – b). Em cada um dos pontos foram registados dois valores, obtidos rodando o sonómetro em cerca de 45° para a esquerda e, posteriormente, aplicando uma rotação de 90° para a direita, relativamente à primeira medição, resultando o valor do tempo de reverberação do cálculo efetuado pelo sonómetro da média dos dois valores medidos.

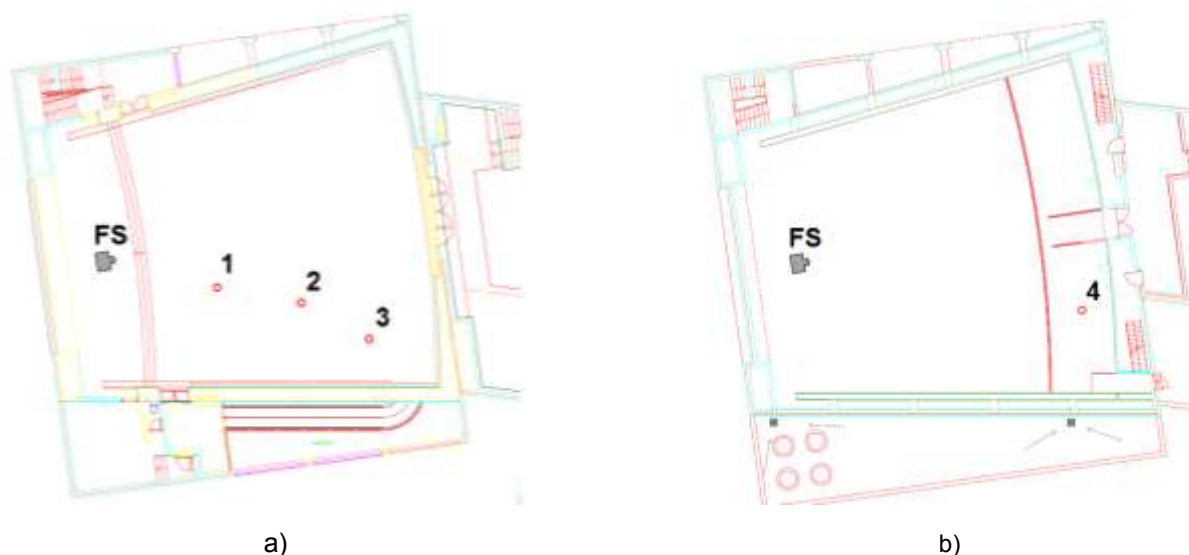


Fig. 4.11 – Plantas do auditório com a localização dos quatro pontos de medição do tempo de reverberação e fonte sonora (FS) no palco: a) plateia, b) balcão

Os **níveis de pressão sonora do ruído de fundo** e do **ruído dos equipamentos de climatização** (AVAC) foram avaliados em três lugares distintos do auditório, conforme se encontram representados na figura 4.12, sendo que os pontos de medição 1 e 2 correspondem a posições na zona do corredor central. Com recurso ao sonómetro *Brüel & Kjær*, modelo 2260, e com o auxílio de um tripé portátil *Brüel & Kjær*, modelo UA0049, efetuaram-se as medições dos níveis de pressão sonora nos respetivos pontos, com a duração de dois minutos. Para cada ponto, foram registados os valores para as bandas de frequência de oitava dos 16 Hz aos 16 kHz, foi calculado o nível de pressão sonora equivalente, L_{eq} , e este último também com o filtro A, L_{Aeq} . Na avaliação do ruído dos equipamentos AVAC, inicialmente registou-se o nível de pressão sonora com apenas um equipamento em funcionamento (Ruído de AVAC-1) e, posteriormente, com mais um segundo equipamento semelhante ligado (Ruído de AVAC-2).



Fig. 4.12 – Plantas do auditório com a localização dos três pontos de medição do nível de pressão sonora do ruído de fundo e dos equipamentos de climatização (AVAC) e fonte sonora (FS)

Para a determinação dos valores do parâmetro **RASTI** realizaram-se medições em oito pontos do recinto conforme esquematizados na figura 4.13. Foram utilizados um emissor (FS) e um recetor *Brüel & Kjær*, modelos 4225 e 4419 respetivamente. O emissor é uma unidade fixa, tendo sido colocado no mesmo local que a fonte sonora utilizada para as outras medições (zona central do palco), enquanto que o recetor é uma unidade móvel, tendo sido deslocada pelo engenheiro António Eduardo Costa ao longo dos ensaios (Fig. 4.14 - a).

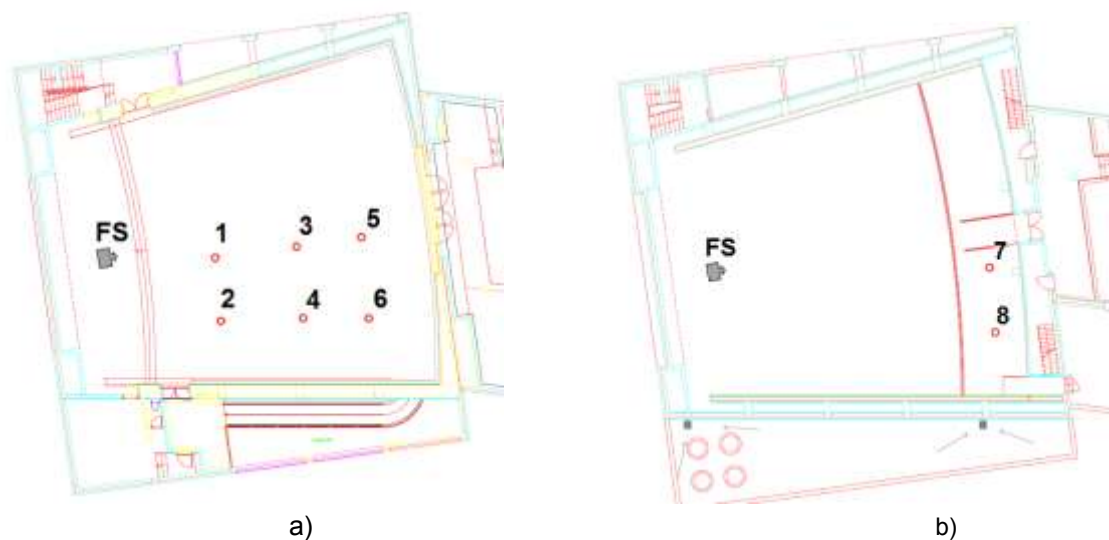


Fig. 4.13 – Plantas do auditório com a localização dos oito pontos de medição do RASTI e fonte sonora (FS)



Fig. 4.14 – Medição do parâmetro RASTI: a) recetor, b) emissor
[foto da autora]

Nesta avaliação, o recetor filtra o ruído emitido pela fonte sonora apenas nas bandas de frequência de oitava de 500 Hz e 2000 Hz, efetuando medições simples, “*single*”, com a duração de 8 segundos cada. Os níveis de pressão sonora de referência, “Ref.”, podem ser de 59 dB na banda de 500 Hz e 50 dB na banda de 2000 Hz. No entanto, tendo em conta as dimensões do auditório, utilizou-se o modo “Ref. + 10 d ”, correspondendo a um aumento dos níveis de pressão sonora de 10 dB.

O emissor de RASTI, colocado num tripé (Fig. 4.14 - b) a cerca de 1,30 m de altura, direciona o ruído na direção do eixo longitudinal do auditório. Em cada um dos oito pontos de medição, o recetor é posicionado a uma altura de aproximadamente 0,80 m, o correspondente à altura dos ouvidos de uma pessoa sentada na plateia, efetuando repetidamente cinco leituras, sobre as quais é calculada uma média aritmética.

Este parâmetro foi avaliado de três formas distintas: sem recurso a sistemas de amplificação de som (AS), com recurso ao sistema PA (*public address*), que corresponde a duas colunas colocadas nas paredes laterais do palco e, por último, a junção deste último sistema com o sistema *surround*, um conjunto de colunas dispersas ao longo das paredes laterais da plateia.

4.3. ANÁLISE DE RESULTADOS

4.3.1. PREÂMBULO

Neste subcapítulo são apresentados os resultados das medições efetuadas no auditório nobre da FEUP. Estes serão comparados com os valores regulamentares sendo possível retirar algumas conclusões acerca da qualidade acústica do espaço em estudo.

Para além dos referidos valores, são também apresentados valores ideais para todos os parâmetros analisados e feitas comparações com espaços semelhantes ao do caso em estudo.

No caso do ruído de fundo serão consideradas as curvas NC e NR, com o objetivo de classificar o ambiente sonoro do auditório face à incomodidade.

4.3.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

O quadro 4.2 apresenta as médias dos valores medidos pelo sonómetro do tempo de reverberação, para as orientações anteriormente referidas, nos quatro pontos de medição e a sua média, por banda de frequência.

O ponto de medição 1 reporta-se ao lugar número sete da fila três (F3-L7), sendo a mesma simbologia adotada para todos os restantes pontos de medição.

Quadro 4.2 – Tempo de reverberação médio, em cada ponto de medição, por bandas de frequências de oitava

TR ₃₀ médio (s)					
Freq. (Hz)	Posição				Média
	1	2	3	4	
	F3-L7	F8-L13	F12-L23	Balcão F2-L11	
125	1,44	1,40	1,29	1,16	1,3
250	1,33	1,33	1,31	1,29	1,3
500	1,55	1,45	1,41	1,41	1,5
1k	1,43	1,37	1,41	1,32	1,4
2k	1,24	1,22	1,30	1,21	1,2
4k	1,06	1,08	1,12	1,05	1,1

Os valores reunidos no quadro 4.2 encontram-se também representados por curvas de valores médios, por frequência na figura 4.15. Observa-se que os maiores valores de TR obtidos nas medições correspondem às médias frequências, sendo que, unanimemente, o maior valor se encontra sempre na banda de frequência de oitava de 500 Hz.

Conforme já descrito em 2.5.1., o RRAE indica um tempo de reverberação máximo para auditórios, sendo este função do volume do respetivo auditório. O auditório da FEUP tem um volume de 3317 m³.

Aplicando este valor do volume à fórmula ditada pelo RRAE para o cálculo do tempo de reverberação em auditórios com volumes compreendidos entre 250 m³ e 9000 m³, o resultado que se obtém para o tempo de reverberação máximo é de 0,92 segundos.

O RRAE indica que, para o cálculo do TR, apenas devem ser considerados os valores obtidos para as bandas de frequência dos 500 Hz aos 2000 Hz (valores sombreados no quadro 4.2). Como tal, o valor do TR obtido para o auditório em estudo é de 1,36 segundos. O regulamento refere também que os valores obtidos das avaliações *in situ* devem ser diminuídos do fator de incerteza, o qual para o volume em questão é de 35%. Como resultado da aplicação desta incerteza, surge o valor do tempo de reverberação caracterizador do caso em estudo igual a 1,04 segundos. Deste modo, a situação apresenta indícios de incumprimentos do RRAE.

A informação exposta encontra-se sintetizada no esquema da figura 4.16.

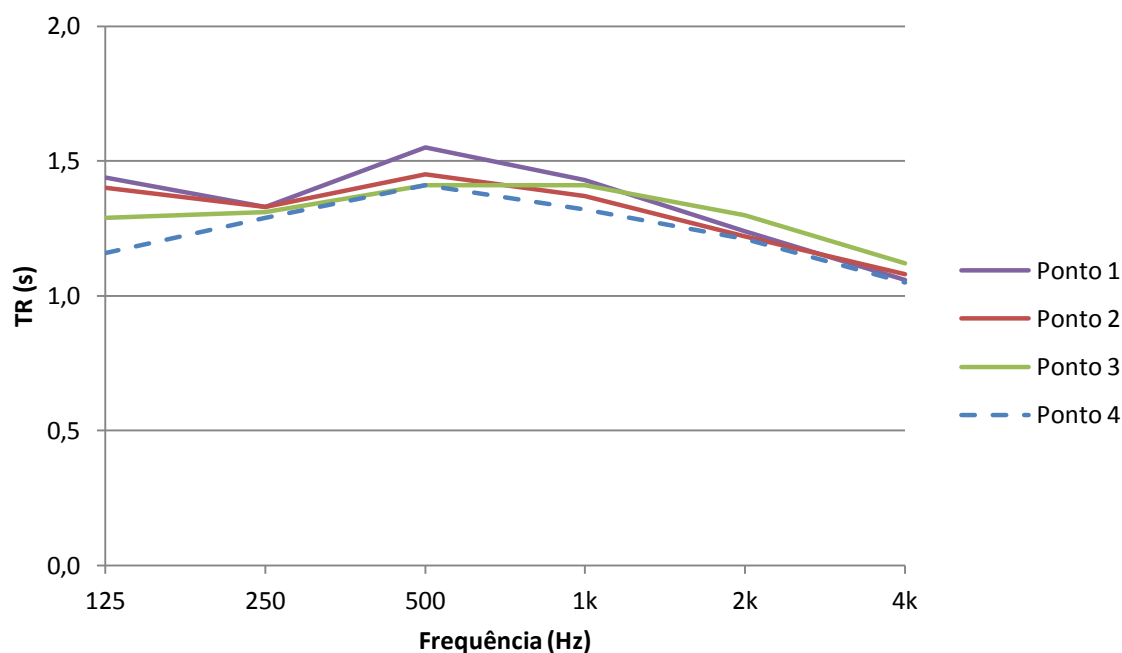


Fig. 4.15 – Tempos de reverberação médios nos quatro pontos de medição, para as bandas de frequência dos 125 Hz aos 4000 Hz

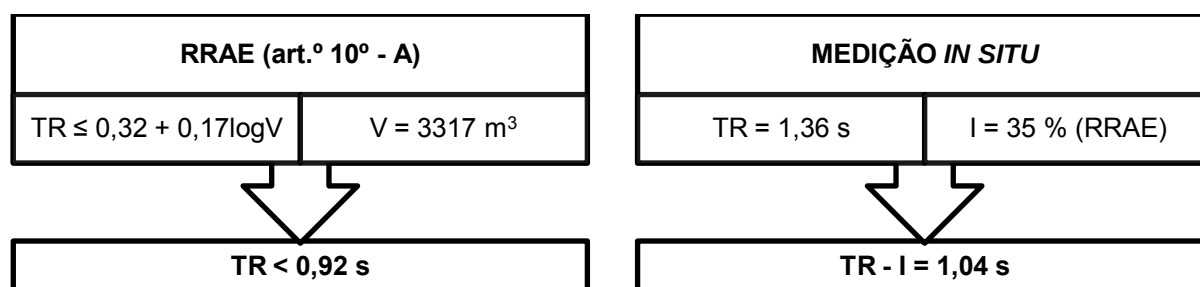


Fig. 4.16 – Esquema síntese dos tempos de reverberação regulamentar, avaliado no caso de estudo e ideal

O tempo de reverberação ideal de um espaço varia consoante os diversos tipos de atividades que nele se pretendam realizar, sendo que os seus valores são indicados nas obras de diversos autores.

Cavanaugh [26] indica valores ideais do tempo de reverberação em função do uso, para as frequências de 500 Hz e 1000 Hz, dos quais os que se revelam mais importantes no presente trabalho, retirados da figura 2.18, estão reunidos no quadro 4.3.

Em *Acústica Ambiental e de Edifícios* são também referidos como ideais, para as bandas de frequência de oitava de 500 Hz e 1000 Hz, os tempos de reverberação indicados no quadro 4.4 [1].

O valor do tempo de reverberação obtido no auditório da FEUP, para as mesmas frequências dos valores sugeridos como ideais, é de 1,42 segundos. Este é o valor utilizado nas comparações efetuadas com os valores ideais nos quadros 4.3 e 4.4.

Quadro 4.3 – Comparação dos valores ideais do tempo de reverberação (500 – 1kHz) em função do tipo de utilização [26] com o valor obtido no auditório da FEUP (1,42 s)

Função	TR recomendado (s)			Comparação com o auditório da FEUP
	Limite mínimo	Ideal	Limite máximo	
Drama	0,8	0,9 – 1,1	1,2	✖
Salas de leitura e de conferências	0,6	0,9 – 1,1	1,4	✓
Cinema	0,7	0,8 – 1,2	1,3	✖
Pequenos teatros	1,1	1,2 – 1,4	1,5	✓✓
Auditórios escolares	1,3	1,5 – 1,8	1,9	✓
Auditórios com fins múltiplos	1,4	1,6 – 1,8	1,9	✓
Grupos musicais de dança, com sistema de amplificação sonora	0,8	1,0 – 1,2	1,3	✖
Comédia musical tipo Broadway, operetas	1,0	1,2 – 1,4	1,5	✓
Concertos semi-clássicos com sistema de amplificação sonora	1,1	1,2 – 1,6	1,9	✓✓
Música de câmara	1,2	1,4 – 1,7	1,9	✓✓
Ópera	1,3	1,5 – 1,8	1,9	✓
Coros	1,6	1,7 – 2,0	2,2	✖
Sinfónica (romântica)	1,6	1,7 – 2,1	2,2	✖
Orquestra	1,9	2,0 – 3,4	-	✖

✓✓ – o TR do auditório da FEUP é ideal para a função

✓ – o TR do auditório da FEUP encontra-se dentro dos limites recomendados para a função

✖ – o TR do auditório da FEUP não é adequado para a função

Nos quadros apresentados verificam-se algumas semelhanças, entre as quais o facto das atividades assentes na palavra (conferências, teatros e cinemas) requererem um tempo de reverberação reduzido e a música exigir valores mais elevados, apresentando, contudo, uma variação considerável consoante o género musical em causa.

O auditório nobre da FEUP, conforme anteriormente referido, para além de servir à comunidade da faculdade onde se encontra inserido, maioritariamente no âmbito académico, é também disponibilizado para a realização de uma grande diversidade de eventos, entre os quais conferências e concertos dos mais variados tipos de música.

Por este motivo, uma análise discriminada para as distintas atividades é mais adequada, permitindo desta forma concluir para que atividades o espaço em estudo apresenta um melhor comportamento acústico.

Quadro 4.4 – Comparação dos valores ideais do tempo de reverberação (500 - 1kHz) em função do tipo de utilização [1] com o valor obtido no auditório da FEUP (1,42 s)

Função	TR ideal (s)	Comparação com o auditório da FEUP
Auditório (palavra)	0,7 – 0,8	✖
Teatro	0,7 – 0,9	✖
Cinema	0,8 – 1,0	✖
Ópera	1,3 – 1,9	✓
De câmara	1,4 – 1,7	✓
Música		
Sinfónica	1,4 – 2,2	✓
De órgão	2,5 – 3,5	✖
Coros gregorianos	3,0 – 4,0	✖

✓ – o TR do auditório da FEUP é ideal para a função

✖ – o TR do auditório da FEUP não é adequado para a função

Em primeira instância vale a pena realçar que o limite imposto pelo RRAE ($TR < 0,92$ s) não é cumprido, pois o resultado das medições, já associado à incerteza prevista pelo mesmo regulamento ($TR - I = 1,04$ s), é superior a esse limite, embora tenuemente. No entanto, uma análise qualitativa é considerada mais rigorosa e apropriada se, em alternativa ao limite máximo imposto pelo RRAE, forem ambicionados os valores ideais apresentados pelos diversos autores. Neste contexto, a palavra, o cinema e a música serão analisadas separadamente, permitindo concluir acerca do comportamento acústico específico do auditório da FEUP.

No entanto, considerando o valor da incerteza enunciada no regulamento (de 35% para o volume em questão) demasiado “generosa”, crê-se que seja mais prudente ter como valor de estudo o valor médio realmente medido igual a 1,42 s.

Nesta perspetiva, verifica-se que o tempo de reverberação do auditório não corresponde aos valores ideais das atividades que implicam um valor do parâmetro reduzido, direcionadas para a *palavra*, assim como das atividades que requerem um TR mais elevado, como é o caso de alguns géneros musicais.

Nas comparações feitas no quadro 4.3, as salas de leitura e de conferências, pequenos teatros e auditórios escolares e com fins múltiplos revelam-se como funções para as quais o auditório em estudo é adequado. Já no que diz respeito ao quadro 4.4, para todas as atividades com base na *palavra* o auditório em estudo não apresenta valores razoáveis. Um maior tempo de reverberação poderá implicar uma menor inteligibilidade da palavra, característica que será abordada mais à frente no subcapítulo 4.3.4 onde o parâmetro RASTI será analisado, permitindo desta forma aferir acerca do grau de inteligibilidade atingida no caso de estudo.

Por outro lado, as exigências da música sinfónica, orquestra e coros em termos de tempo de reverberação a rondar (ou mesmo superiores) os 2 segundos, indiciam que as características acústicas para este tipo de atuações não serão as melhores, pois a diferença entre o valor existente e o valor ambicionado já se torna mais proeminente.

4.3.3. TIPOS DE RUÍDO

4.3.3.1. Ruído de Fundo

Encontram-se no quadro 4.5 os valores das medições efetuadas dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo no auditório da FEUP.

São também apresentados os parâmetros L_{eq} (nível de pressão sonora equivalente, em dB, um descritor energético que permite avaliar o nível de ruído num local específico, num determinado intervalo de tempo) e L_{Aeq} , em dB, correspondente ao parâmetro anterior mas desta feita com a ponderação do filtro A.

Quadro 4.5 – Níveis de pressão sonora do ruído de fundo, em dB, em cada ponto de medição, para as bandas de frequência dos 16 Hz aos 16000 Hz, e nível sonoro equivalente, sem e com filtro A

L _{Ruído de Fundo} (dB)					
Ponto		1	2	3	Média Energética
Posição	F1 - centro	F8 - centro	Balcão F1-L11		
Freq. (Hz)	16	44,0	46,6	49,5	47,3
	31	43,9	44,2	45,9	44,8
	63	35,9	35,5	35,5	35,6
	125	30,9	30,1	29,7	30,3
	250	27,1	28,2	27,5	27,6
	500	23,6	23,7	23,2	23,5
	1k	19,2	21,4	21,9	21,0
	2k	17,0	17,2	19,2	17,9
	4k	16,0	15,2	16,7	16,0
	8k	14,0	14,1	14,5	14,2
	16k	12,4	12,6	12,8	12,6
L _{eq}		48,1	49,7	52,2	50,3
L _{Aeq}		26,3	26,9	27,3	26,9

Na figura 4.17 estão representados graficamente os valores dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo nos três pontos de medição nas bandas de frequência de oitava dos 31 Hz aos 16000 Hz. É notória que a variação dos valores ao longo das bandas de frequência é sempre decrescente e bastante semelhante. É evidente que os maiores valores dos níveis sonoros do ruído de fundo são registados nos graves, atingindo-se valores próximos de 50 dB.

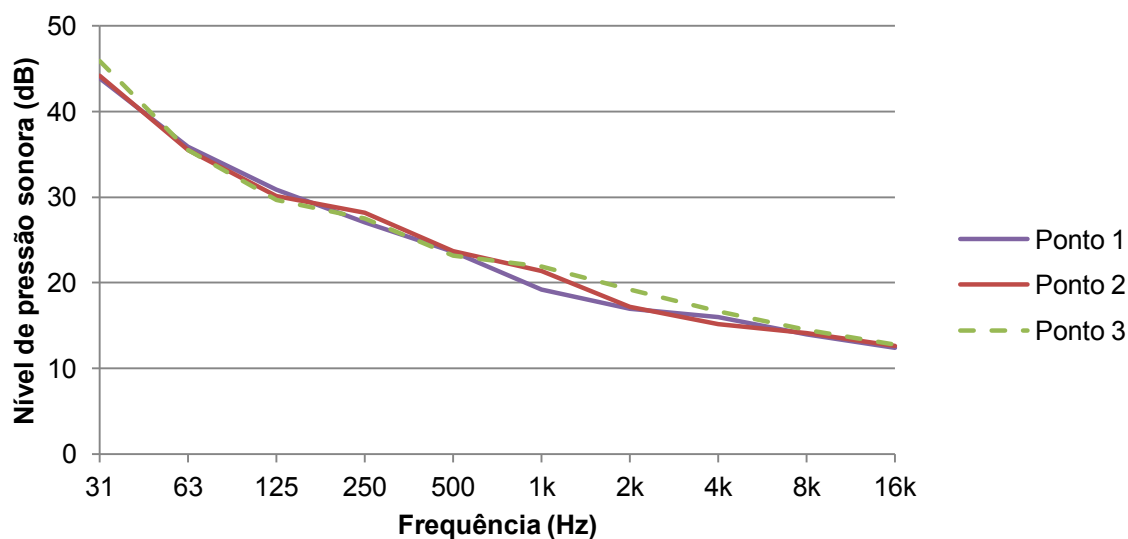


Fig. 4.17 – Níveis de pressão sonora do ruído de fundo, em dB, por banda de frequência de oitava, dos 31 Hz aos 16000 Hz, nos três pontos de medição

A aplicação do filtro A aos valores dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo está representada na figura 4.18. Os maiores valores registam-se nas médias frequências, as bandas de frequência mais audíveis, sendo que os valores mais altos se encontram na banda de frequência de oitava dos 1000 Hz. Por este motivo, apesar dos valores mais elevados terem sido registados para as frequências mais baixas, é o ruído das médias frequências, dos 500 Hz aos 2000 Hz, que o ouvinte mais sente.

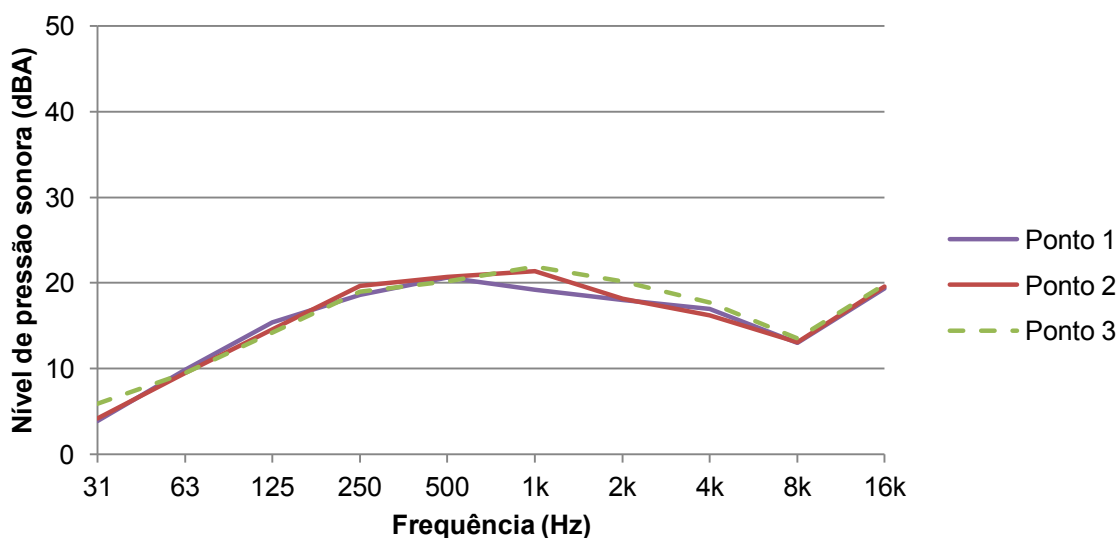


Fig. 4.18 – Variação dos níveis de pressão sonora, L_{Aeq} em dB, por banda de frequência de oitava, dos 31 Hz aos 16000 Hz, nos três pontos de medição

O ruído de fundo tornará a ser analisado mais à frente neste trabalho com o auxílio das curvas de incomodidade NC e NR, sendo possível desta forma tirar conclusões no que diz respeito à qualidade acústica do auditório em termos de ruído de fundo e até que ponto este pode incomodar o público presente na plateia.

4.3.3.2. Ruído de Equipamentos – um aparelho em funcionamento (AVAC-1)

O auditório da FEUP possui um sistema de climatização (AVAC – aquecimento, ventilação e ar condicionado) composto por dois equipamentos semelhantes: AVAC-1 e AVAC-2. É expectável o aumento dos níveis de pressão sonora relativamente ao ruído de fundo, o qual não contempla nenhum equipamento a emitir ruído.

A análise ao ruído dos equipamentos é feita em duas fases, sendo a deste subcapítulo a primeira: apenas um equipamento em funcionamento (AVAC-1). No subcapítulo seguinte será feita a análise com os dois equipamentos em funcionamento (AVAC-2).

No quadro 4.6 expõem-se os resultados obtidos nas medições do nível de pressão sonora do ruído com o equipamento AVAC-1 em funcionamento.

Quadro 4.6 – Níveis de pressão sonora do ruído de AVAC-1, em dB, em cada ponto de medição, para as bandas de frequência dos 16 Hz aos 16000 Hz, e nível sonoro equivalente, sem e com filtro A

L _{Ruído de AVAC-1} (dB)					
Ponto	1	2	3	Média Energética	
Posição	F1 - centro	F8 - centro	Balcão F1-L11		
Freq. (Hz)	16	51,6	51,2	57,5	54,5
	31	51,3	51,3	53,5	52,2
	63	48,1	47,4	49,0	48,2
	125	44,1	42,3	43,3	43,3
	250	37,8	36,9	37,3	37,3
	500	38,2	37,4	37,7	37,8
	1k	37,4	35,6	35,6	36,3
	2k	36,3	34,2	35,3	35,4
	4k	28,8	26,3	28,2	27,9
	8k	17,4	15,4	18,7	17,4
16k	13,0	12,6	13,6	13,1	
L _{eq}	57,4	56,9	60,7	58,7	
L _{Aeq}	42,2	40,5	41,2	41,4	

Os valores do quadro 4.6, correspondentes às bandas de frequência de oitava dos 31 Hz ao 16000 Hz, estão representados nas curvas da figura 4.19. Assim como acontece com o ruído de fundo, é aparente uma tendência decrescente, com o aumento da frequência, dos níveis de pressão sonora neste registo. Os valores mais elevados são obtidos nas baixas frequências, ultrapassando desta vez os 50 dB, no entanto, é nas bandas de frequência de oitava dos 1000 Hz e 2000 Hz que o ruído se torna mais incomodativo para o ouvinte.

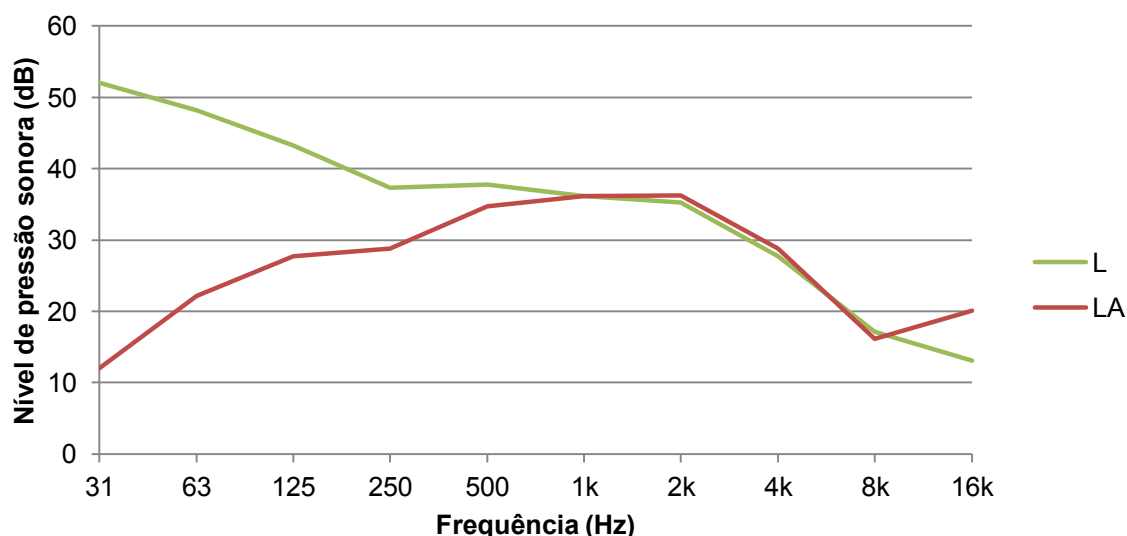


Fig. 4.19 – Curvas da média dos níveis de pressão sonora do ruído AVAC-1 nos três pontos de medição, sem e com ponderação do filtro A

Conforme se previa, os níveis de pressão sonora aumentaram, face ao ruído de fundo, quando se integrou o equipamento de climatização. Os valores da variação ocorrida estão reunidos no quadro 4.7. A variação é semelhante nos três pontos de medição, sendo ligeiramente superior no ponto 1. Tal facto poderá dever-se a uma maior proximidade do equipamento a este local do auditório.

É evidente que a presença de um equipamento de climatização provoca um aumento considerável do nível sonoro do auditório, em cerca de 14 dB(A), face ao nível sonoro do ruído de fundo.

Quadro 4.7 – Variação dos níveis de pressão sonora do ruído, L e L_A , devida à integração de um sistema de AVAC (AVAC-1)

Variação devida à integração do equipamento AVAC-1				
Ponto		1	2	3
Variação AVAC-1 - RF (dB)	ΔL	9,3	7,2	8,5
	ΔL_A	15,9	13,6	13,9

4.3.3.3. Ruído de Equipamentos – dois aparelhos em funcionamento (AVAC-2)

Durante o registo dos níveis de pressão sonora com a presença dos dois equipamentos de climatização (AVAC-2), foi evidente que estes não eram constantes ao longo do tempo. O ruído sofre diversas oscilações, sendo que os valores registados correspondem a uma média dos valores registados, num dado intervalo de tempo.

Os valores obtidos em cada ponto de medição apresentam-se no quadro 4.8 e as curvas correspondentes, dos níveis de pressão sonora registados, encontram-se na figura 4.20. Revelam bastantes semelhanças às anteriormente apresentadas, registando-se um aumento na globalidade dos valores, sendo que desta vez o valor máximo se encontra próximo dos 60 dB.

Quadro 4.8 – Níveis de pressão sonora do ruído de AVAC-2, em dB, em cada ponto de medição, para as bandas de frequência dos 16 Hz aos 16000 Hz, e nível sonoro equivalente, sem e com filtro A

L _{Ruído de AVAC-2} (dB)					
Ponto		1	2	3	Média Energética
Posição		F1 - centro	F8 - centro	Balcão F1-L11	
Freq. (Hz)	16	62,6	58,0	57,0	59,9
	31	57,4	56,4	57,1	57,0
	63	55,4	53,9	55,3	54,9
	125	49,9	50,2	51,1	50,4
	250	44,1	45,3	46,1	45,2
	500	40,8	41,1	42,1	41,4
	1k	39,4	38,9	40,8	39,8
	2k	39,1	37,8	39,8	39,0
	4k	31,4	29,6	31,9	31,1
	8k	17,6	17,5	18,4	17,9
	16k	12,7	13,0	12,9	12,9
L _{eq}		66,5	64,1	64,3	65,1
L _{Aeq}		45,2	44,8	46,3	45,5

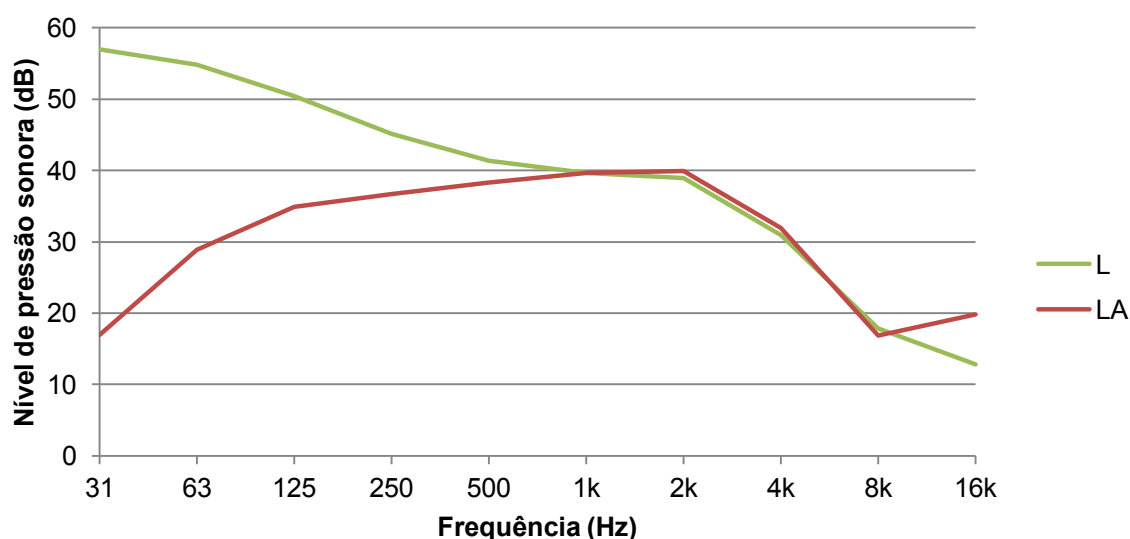


Fig. 4.20 - Curvas da média dos níveis de pressão sonora do ruído AVAC-2 nos três pontos de medição, sem e com ponderação do filtro A

Da mesma forma que se analisou a variação dos valores obtidos para o ruído de fundo devida à inclusão do equipamento AVAC-1, também faz sentido analisar as variações correspondentes à ligação do segundo equipamento, AVAC-2. Na figura 4.21 estão representados, para cada um dos três pontos de medição, os níveis de pressão sonora equivalente L_A , em dB, para as três situações estudadas.

No quadro 4.9 enunciam-se os valores das respetivas variações dos níveis de pressão sonora relativamente ao ruído de fundo e ao ruído com a presença de apenas um equipamento (AVAC-1).

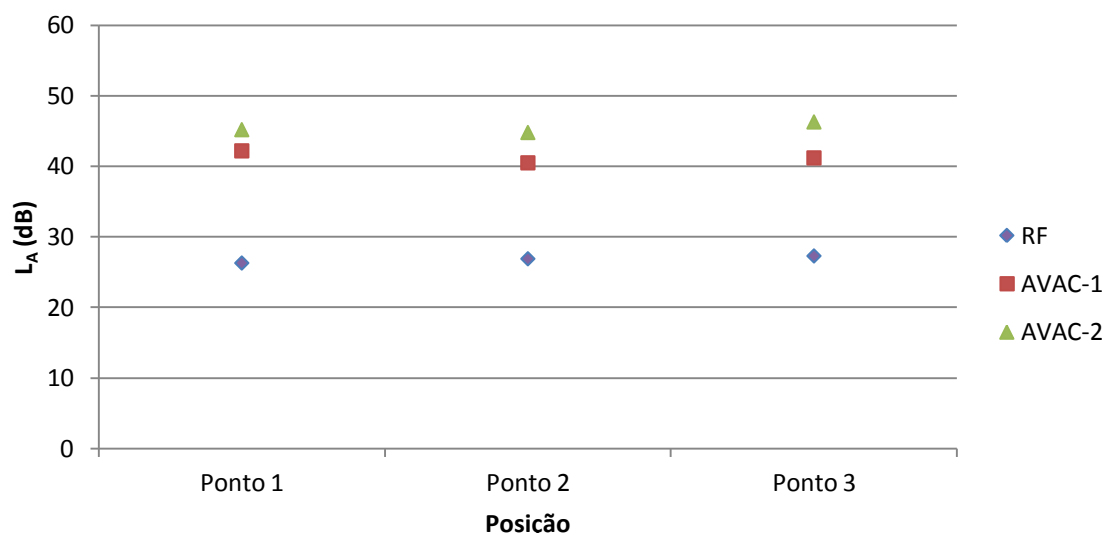


Fig. 4.21 – Variação do nível de pressão sonora, em dB(A) ao longo dos três pontos de medição, para as três situações estudadas

Quadro 4.9 – Variação dos níveis de pressão sonora do ruído, L e L_A , devida à integração do segundo sistema de AVAC (AVAC-2), relativamente aos ambientes sem AVAC e com AVAC-1

Variação devida à integração do AVAC-2				
Ponto		1	2	3
Variação AVAC-2 - RF (dB)	ΔL	18,4	14,4	12,1
	ΔL_A	18,9	17,9	19
Variação AVAC-2 - AVAC-1 (dB)	ΔL	9,1	7,2	3,6
	ΔL_A	3	4,3	5,1

O ruído existente no auditório com os dois equipamentos em funcionamento toma proporções bastante mais elevadas do que o ruído de fundo, podendo desta forma reduzir a qualidade acústica do auditório. Dado que a diferença dos níveis de pressão sonora do AVAC-1 para os níveis com o AVAC-2 são iguais ou superiores a 3 dB, conclui-se que este segundo equipamento produz um ruído pelo menos com a mesma intensidade que o primeiro. Pelas diferenças analisadas em cada ponto separadamente,

estima-se que este segundo equipamento esteja localizado mais próximo do ponto 3, onde a variação do nível de pressão sonora é superior.

Constata-se que o funcionamento conjunto dos dois aparelhos provoca um aumento do nível sonoro em cerca de 19 dB(A) face ao ruído de fundo e entre 3 a 5 dB(A) relativamente à utilização de apenas um equipamento.

4.3.3.4. Curvas de Incomodidade

As **curvas NC** e **NR** (*Noise Rating* e *Noise Criterion*) são critérios de conforto acústico, as quais já foram introduzidas no subcapítulo 2.7. Permitem avaliar a incomodidade num determinado espaço, devida ao ruído, de fundo ou de equipamentos.

Foi feita a sobreposição das curvas dos níveis de pressão sonora, para as diversas condições anteriormente apresentadas, às curvas NC e NR, sendo possível aferir os respetivos valores dos parâmetros e fazer comparação com os valores recomendados.

As curvas NC estabelecem-se para as bandas de frequência entre os 63 Hz e os 8000 Hz e as curvas NR incluem ainda, para além destas, a banda dos 31 Hz.

Apresentam-se nas figuras 4.22 a 4.27 as sobreposições das curvas de níveis de pressão sonora, nos três pontos onde foram efetuadas medições, às curvas NC e NR. As figuras 4.22 e 4.23 englobam a curva dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo, as figuras 4.24 e 4.25 correspondem ao AVAC-1 e as figuras 4.26 e 4.27 remetem para o AVAC-2. Posteriormente, serão apresentados os valores retirados de cada gráfico no quadro 4.10 tornando-se, desta forma, mais perceptíveis os valores correspondentes a cada situação.

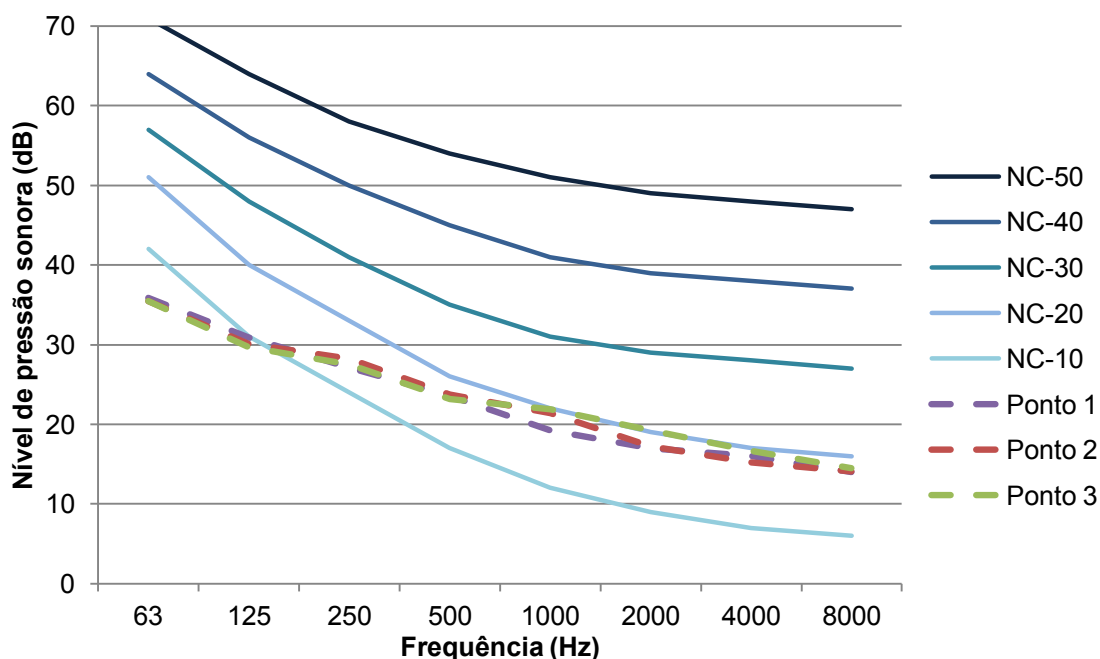


Fig. 4.22 - Comparação dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo nos três pontos com as curvas NC

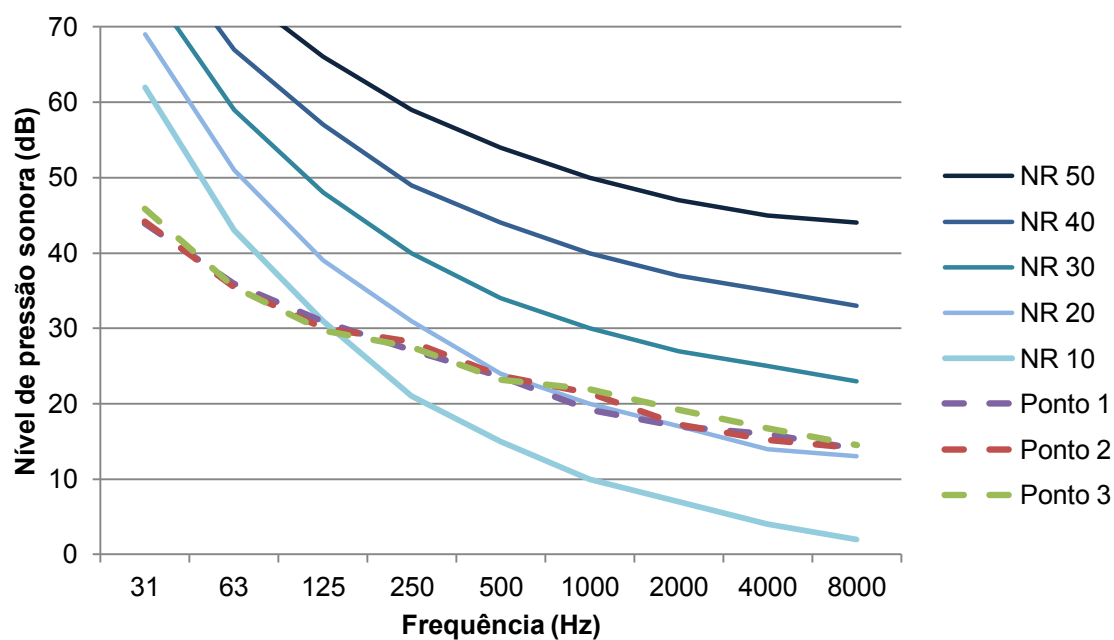


Fig. 4.23 - Comparação dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo nos três pontos com as curvas NR

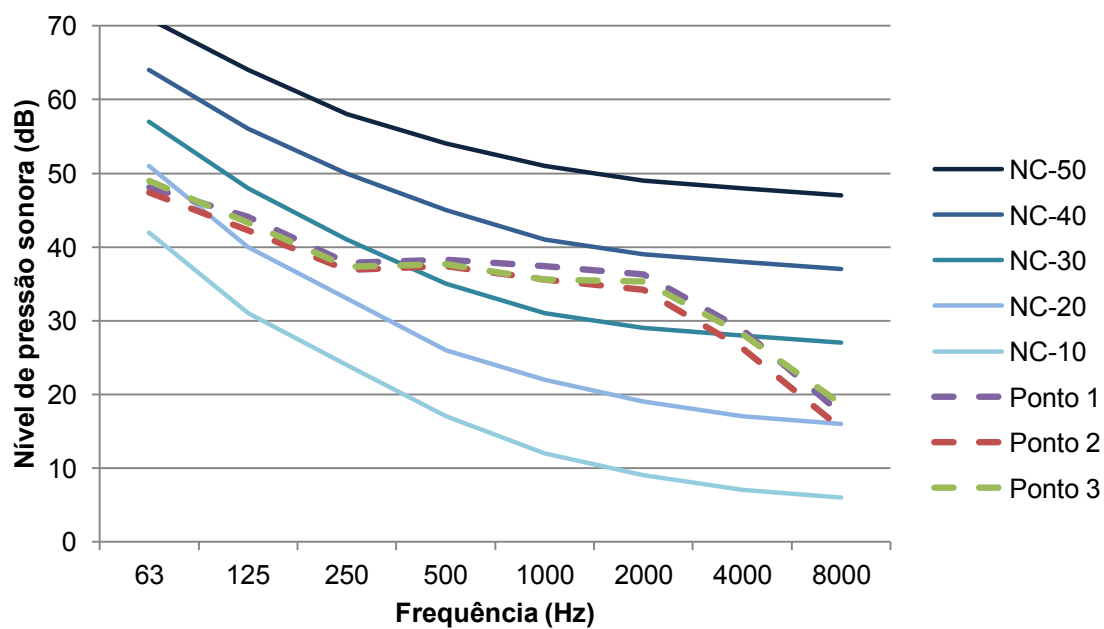


Fig. 4.24 - Comparação dos níveis de pressão sonora do ruído de equipamentos AVAC-1 nos três pontos com as curvas NC

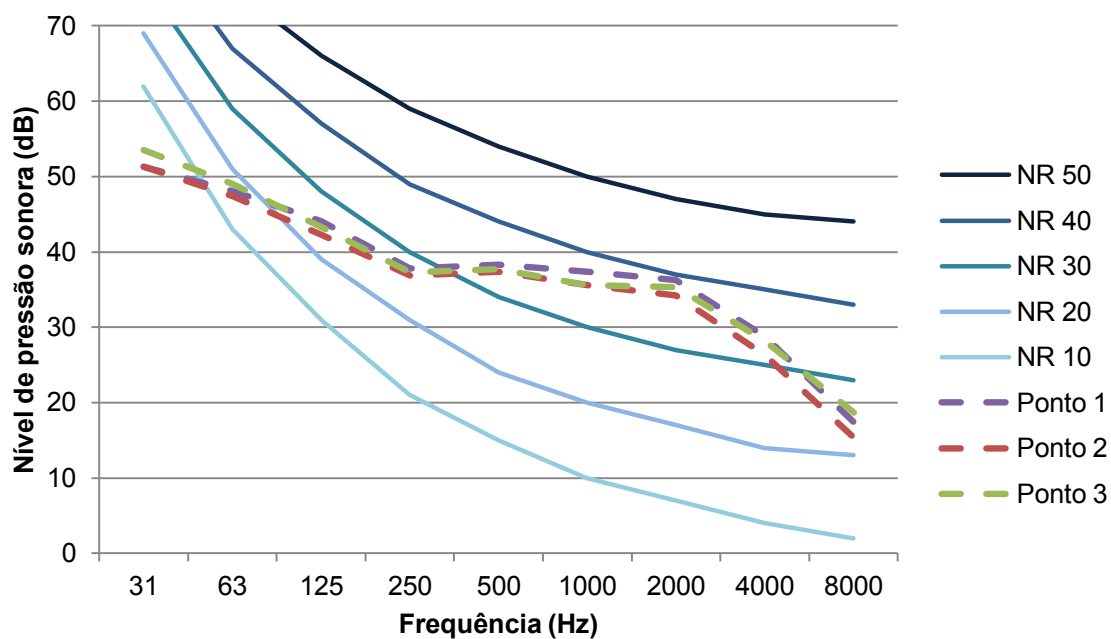


Fig. 4.25 - Comparação dos níveis de pressão sonora do ruído de equipamentos AVAC-1 nos três pontos com as curvas NR

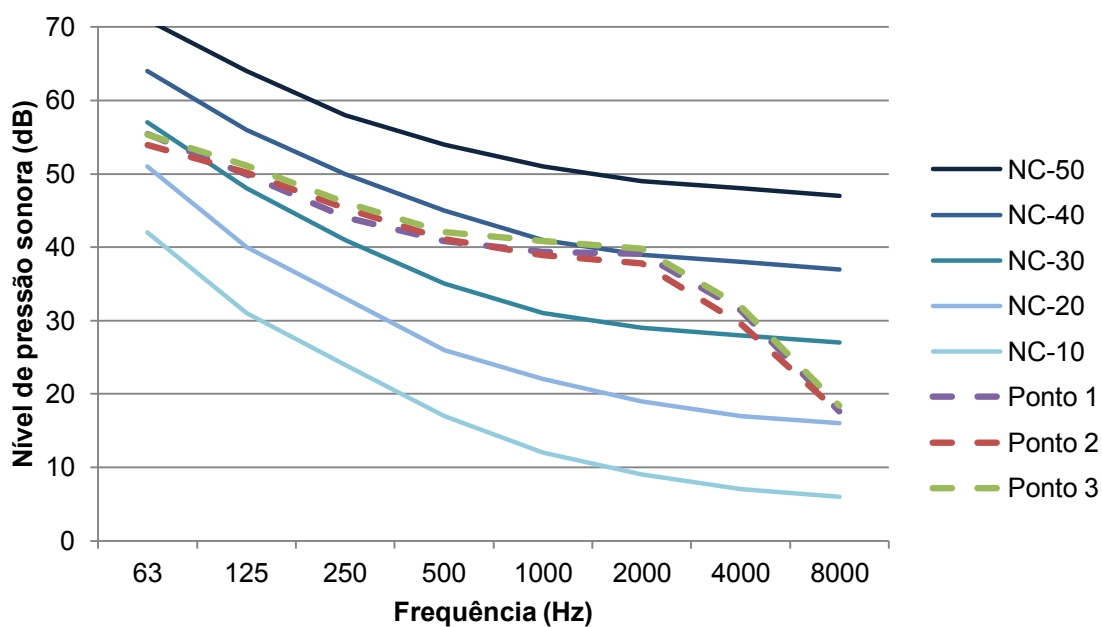


Fig. 4.26 - Comparação dos níveis de pressão sonora do ruído de equipamentos AVAC-2 nos três pontos com as curvas NC

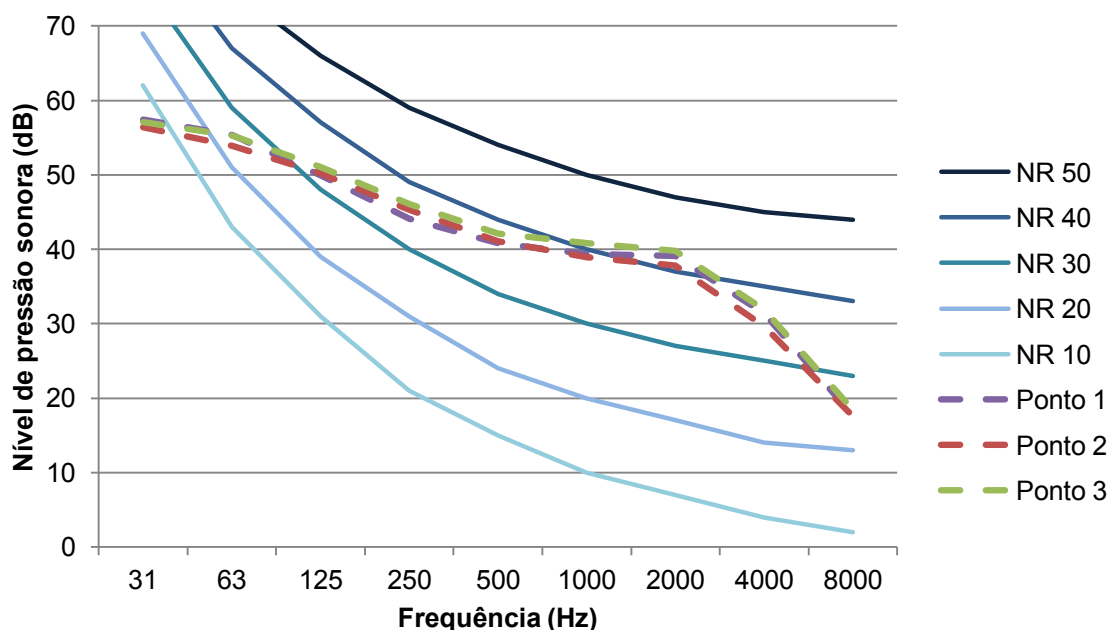


Fig. 4.27 - Comparação dos níveis de pressão sonora do ruído de equipamentos AVAC-2 nos três pontos com as curvas NR

Após análise dos gráficos apresentados, foi possível extrair os valores apresentados no quadro 4.10. Estes correspondem aos valores máximos das curvas NC e NR atingidos pelas curvas dos níveis de pressão sonora.

É evidente que são os valores correspondentes à opção sem AVAC os mais reduzidos e ao AVAC-2 os mais elevados. De forma simplificada, apresenta-se a gama de variação dos valores, a qual facilitará a comparação com os valores recomendados.

Quadro 4.10 – Valores dos parâmetros NC e NR para as diferentes medições efetuadas

Ruído	NC				NR			
	Pontos			Gama de variação	Pontos			Gama de variação
	1	2	3		1	2	3	
Sem AVAC	19	19	20	19 - 20	22	22	23	22 - 23
Com AVAC-1	37	35	36	35 - 37	39	37	38	37 - 39
Com AVAC-2	40	39	41	39 - 41	42	41	43	41 - 43

Em cada um dos três pontos de medição e para as diferentes condições de ruído no auditório é possível determinar qual é a banda de frequência de oitava condicionante dos valores de NC e NR. Esta corresponde à frequência onde se dá a tangente entre a curva dos níveis de pressão sonora com as curvas de NC e NR. No quadro 4.11 indicam-se as respetivas bandas condicionantes em cada uma das situações estudadas.

Quadro 4.11 – Frequências condicionantes dos valores de NC e NR

Ruído	Frequência condicionante (Hz)					
	NC			NR		
	Pontos			Pontos		
	1	2	3	1	2	3
Sem AVAC	4k	1k	1k	4k	1k	4k
Com AVAC-1	2k	2k	2k	2k	2k	2k
Com AVAC-2	2k	2k	2k	2k	2k	2k

Do quadro anterior podem ser retiradas algumas informações:

- O nível sonoro do ruído de fundo (sem AVAC) revela-se condicionante dos valores de NC e NR nas bandas de frequência de oitava dos 1000 Hz e dos 4000 Hz;
- No caso de existirem equipamentos AVAC em funcionamento a banda de frequência de oitava de 2000 Hz é sempre a que condiciona os valores de NC e NR.

Caso se pretenda reduzir o nível de pressão sonora do ruído no interior do auditório da FEUP, será então de interesse colocar materiais atuantes nas três bandas de frequência referidas: 1 kHz, 2 kHz e 4 kHz. Dada a predominância dos 2 kHz como frequência condicionante, esta pode tornar-se na maior preocupação no que diz respeito aos níveis de pressão sonora do ruído.

No quadro 4.12 encontram-se os valores máximos recomendados, para os níveis de NC e NR, em salas de conferências e de concertos pela mesma fonte dos valores que permitiram traçar as curvas dos gráficos anteriores [10], assim como também os valores propostos por Silva [33] e Barron [5], para os parâmetros NC e NR dos outros espaços, respetivamente. Por comparação com os valores registados, verifica-se que apenas para as condições sem AVAC (ruído de fundo), em regra geral, não são ultrapassados os valores recomendados, verificando-se apenas a exceção do valor de NR para salas de ópera e teatros.

Quadro 4.12 – Valores máximos recomendados dos níveis de NC e NR [5], [10], [33]

Tipo de espaço	Máximo ideal	
	NC [33]	NR [5]
Salas de cinema	30	-
Teatros (500 lugares, sem amplificação sonora)	25	-
Salas de concertos	20	-
Salas de conferências	30	30
Pequenos auditórios (até 500 lugares)	-	25
Salas de ópera e teatros	-	20

Dados os valores expostos e a semelhança entre si, decidiu tornar a análise abrangente aos diversos autores, atribuindo intervalos para os valores máximos ideais dos parâmetros NC e NR.

Considerar-se-á como adequado um valor de NC ou NR inferior a 30, englobando desta forma qualquer tipo de atividade no auditório realizada. Os valores medidos apenas correspondem a valores adequados quando o sistema de climatização não se encontra em funcionamento.

Desta forma, a presença do sistema de AVAC, principalmente dos AVAC-2, torna-se muito prejudicial para o conforto acústico pois implica diferenças de +21 e +18 nos valores dos parâmetros NC e NR, respetivamente.

4.3.3.5. Conclusões

A figura 4.28 tem representadas as curvas dos níveis de pressão sonora nos três pontos de medição, ao longo das bandas de frequência de oitava em análise. Para cada ponto, encontram-se as curvas dos três modos possíveis do auditório em estudo: a tons verde o ruído de fundo (inexistência de equipamentos em funcionamento), a tons de azul o ruído AVAC-1 (com apenas um equipamento ligado) e a tons de vermelho tracejado o ruído AVAC-2 (com os dois equipamentos existentes em funcionamento).

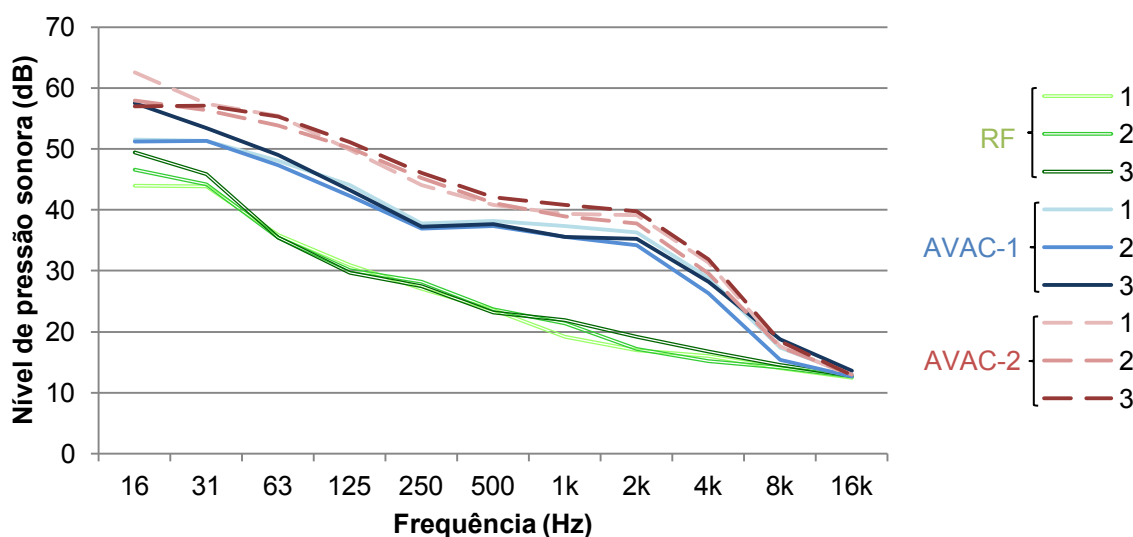


Fig. 4.28 - Curvas dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo e do ruído dos equipamentos (AVAC-1 e AVAC-2), em dB, por banda de frequência de oitava, dos 16 Hz aos 16000 Hz, para os três pontos de medição

O funcionamento dos equipamentos de climatização implica um aumento do ruído no auditório de até mais 19 dB(A) e do NC/NR até aos 43, sendo este aumento tanto maior quanto mais equipamentos se colocam em funcionamento. Níveis de pressão sonora equivalente, L_{Aeq} , de ruído de equipamentos com o valor de 46 dB são muito elevados e deveriam ser reduzidos. O ruído com esta intensidade pode interferir na qualidade acústica do auditório pois é possível que a fruição de trechos musicais de menor intensidade sonora seja perturbada.

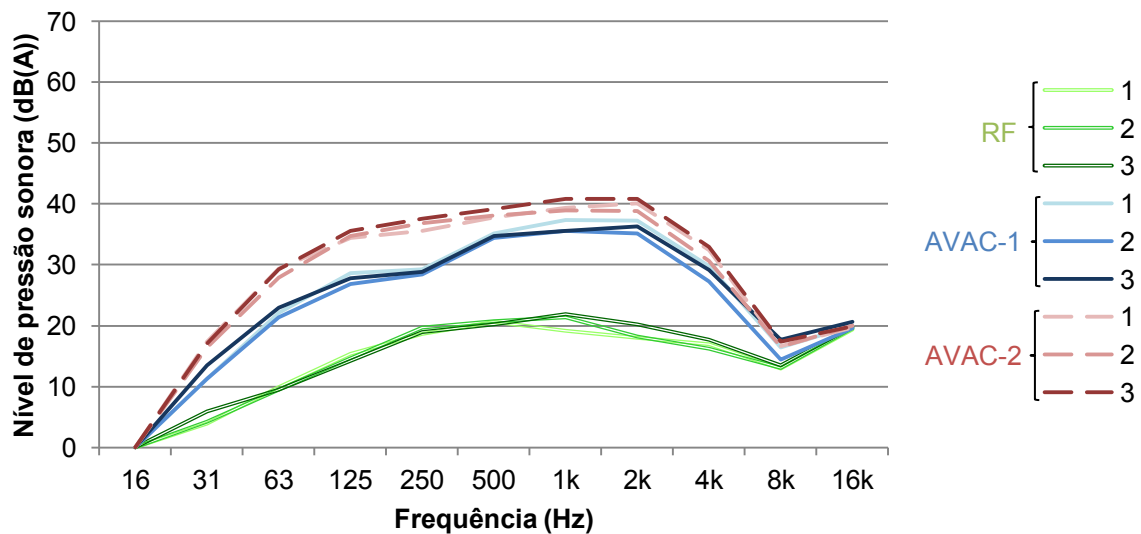


Fig. 4.29 - Curvas dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo e do ruído dos equipamentos (AVAC-1 e AVAC-2), em dB(A), por banda de frequência de oitava, dos 16 Hz aos 16000 Hz, para os três pontos de medição

4.3.4. RASTI

4.3.4.1. Preâmbulo

Para esta avaliação, foram feitas três medições, tendo em conta as diferentes hipóteses que o auditório facultava: fonte sonora sem qualquer tipo de amplificação e de seguida com recurso a sistemas de amplificação sonora, primeiramente com apenas duas colunas *public address* (PA) situadas nas zonas laterais do palco e, posteriormente, acrescentando as colunas *surround*, as quais se encontram ao longo do comprimento do auditório, nas paredes laterais.

4.3.4.2. RASTI sem Amplificação Sonora

Em cada ponto foram efetuadas três medições, das quais foi feita uma média aritmética, sendo este último valor o que terá relevância na análise. Encontram-se no quadro 4.13 os valores registados, do parâmetro RASTI sem amplificação sonora.

Os valores são semelhantes, sendo que a variação se dá entre 0,57 e 0,69, valores (mínimo e máximo, respetivamente) a sombreado. O valor máximo ocorre para F3-L1 (ponto 1), sendo esta a fila mais próxima do palco (das filas em estudo), no lugar mais central possível. Isto corresponde a dizer que, das posições em estudo, esta é a mais próxima da fonte sonora, logo ser compreensível que seja o local onde se perceba de uma forma mais clara a palavra. Já o local com o menor valor de inteligibilidade é o F8-L17 (ponto 4), o qual corresponde a um lugar afastado da zona central (mais próximo da parede lateral) situado numa fila localizada aproximadamente a meia profundidade do auditório. A razão de não ser o local mais afastado aquele que apresenta o valor mais reduzido de RASTI é, provavelmente, porque esse local se encontra numa zona mais confinada devido à reduzida altura (aproximadamente dois metros). Esta característica provoca um aumento do número de reflexões a atingir este local, aumentando o valor do RASTI, ligeiramente.

Quadro 4.13 – Valores de RASTI, sem amplificação sonora (AS)

RASTI sem AS						
Posição			Medição			
Fila	Lugar	Ponto	1	2	3	Média
F3	L1	1	0,68	0,68	0,70	0,69
	L15	2	0,61	0,61	0,62	0,61
F8	L1	3	0,58	0,58	0,60	0,59
	L17	4	0,56	0,57	0,58	0,57
F12	L1	5	0,58	0,59	0,60	0,59
	L19	6	0,60	0,59	0,61	0,60
Balcão F2	L1	7	0,60	0,61	0,62	0,61
	L15	8	0,60	0,61	0,59	0,60
Média	–	–	–	–	–	0,61

Verifica-se então que ocorre uma variação ainda significativa do valor de RASTI, logo da inteligibilidade, ao longo do auditório, sendo que o maior valor de RASTI é superior em cerca de 21% relativamente ao menor valor.

4.3.4.3. RASTI com Amplificação Sonora – duas colunas PA (*public address*)

No quadro 4.14 estão os resultados da medição do RASTI com a amplificação sonora feita através de duas colunas PA. É colocado um microfone no palco, em frente ao orador, e o som passa a ter como fonte sonora as duas colunas e também o próprio orador, que emite som direto.

Nesta avaliação, percebe-se que nem todos os pontos recebem a informação da mesma forma, pois o valor de RASTI ora diminui ora aumenta, consoante o local de medição. A diminuir são apenas dois valores, sendo um deles o que tinha o valor mais elevado na avaliação anterior. Este ponto situa-se na zona central, afastado das colunas tendo em conta que elas se encontram na zona lateral. Compreende-se que nesta avaliação, o ponto com maior valor de RASTI seja o ponto F3-L15 (ponto 2) pois, para além de se situar na fila mais próxima do palco, é o ponto que se situa mais próximo das colunas PA. Relativamente aos outros locais de avaliação, em regra geral sofrem um ligeiro aumento, o qual é devido ao aumento do nível de pressão sonora imposto pelo sistema.

É de realçar que nesta fase todos os valores de RASTI, da avaliação efetuada, são superiores a 0,60 e, em média, há um aumento de 0,02. Contudo, este aumento do valor do RASTI é muito reduzido para uma eficácia significativa de um sistema PA.

Quadro 4.14 – Valores de RASTI, com amplificação sonora (AS) - duas colunas *public address* (PA)

RASTI com AS (duas colunas PA)							
Posição			Medição				Variação face a sem AS
Fila	Lugar	Ponto	1	2	3	Média	
F3	L1	1	0,64	0,64	0,65	0,64	- 0,05
	L15	2	0,65	0,66	0,67	0,66	+ 0,05
F8	L1	3	0,63	0,65	0,64	0,64	+ 0,05
	L17	4	0,62	0,62	0,64	0,63	+ 0,06
F12	L1	5	0,62	0,62	0,62	0,62	+ 0,03
	L19	6	0,63	0,63	0,64	0,63	+ 0,03
Balcão F2	L1	7	0,60	0,60	0,61	0,60	- 0,01
	L15	8	0,62	0,62	0,61	0,62	+ 0,02
Média	–	–	–	–	–	0,63	+ 0,02

4.3.4.4. RASTI com amplificação sonora – duas colunas PA (*public address*) e sistema *surround*

Por último, apresentam-se no quadro 4.15 os valores obtidos para a amplificação sonora máxima possível no auditório, feita através da atuação conjunta das mesmas duas colunas PA e das 14 colunas *surround*, seis em cada parede lateral e duas na parede de fundo.

Quadro 4.15 – Valores de RASTI, com amplificação sonora (AS) - duas colunas *public address* (PA) e sistema *surround*

RASTI com AS (duas colunas PA e sistema <i>surround</i>)							
Posição			Medição				Variação face a sem AS
Fila	Lugar	Ponto	1	2	3	Média	
F3	L1	1	0,63	0,63	0,62	0,63	- 0,06
	L15	2	0,65	0,65	0,66	0,65	+ 0,04
F8	L1	3	0,64	0,64	0,65	0,64	+ 0,05
	L17	4	0,62	0,62	0,63	0,62	+ 0,05
F12	L1	5	0,64	0,64	0,65	0,64	+ 0,05
	L19	6	0,66	0,66	0,67	0,66	+ 0,06
Balcão F2	L1	7	0,62	0,62	0,64	0,63	+ 0,02
	L15	8	0,64	0,63	0,65	0,64	+ 0,04
Média	–	–	–	–	–	0,64	+ 0,03

Desta vez, é de esperar que os locais mais próximos da parede, incluindo o da fila mais próxima do palco, sejam os lugares que apresentem os valores mais elevados de RASTI. Apenas o ponto 1 (F3-L1) sofreu uma redução do valor. Esta diminuição, relativamente à medição anterior já não se torna tão clara, sendo possivelmente causada por alguma interferência de ondas sonoras provocada pela junção dos dois sistemas. Nos restantes pontos verifica-se um aumento do valor do parâmetro, sendo que, nesta situação, o valor que apresenta o maior valor de RASTI é o lugar F12-L19 (ponto 6). Este lugar está próximo de uma coluna e na, anteriormente referida, zona de teto rebaixado, sendo maior o número de reflexões neste local.

Mais uma vez, todos os valores registados são superiores a 0,60 sendo a média de 0,64. Neste caso regista-se um aumento médio de 0,03 face à não existência de sistema de reforço acústico, o que, mais uma vez, surpreende pelo reduzido valor. Isto é, se houver silêncio no auditório, a utilização dos sistemas de reforço acústico raramente seria necessário.

4.3.4.5. Conclusões

Na figura 4.30 apresentam-se as curvas dos valores médios do RASTI, para cada uma das situações estudadas. Por regra, as curvas das situações com amplificação sonora são superiores. Com a exceção do anteriormente comentado ponto 1 (F3-L1), que possui maior RASTI sem qualquer tipo de amplificação.

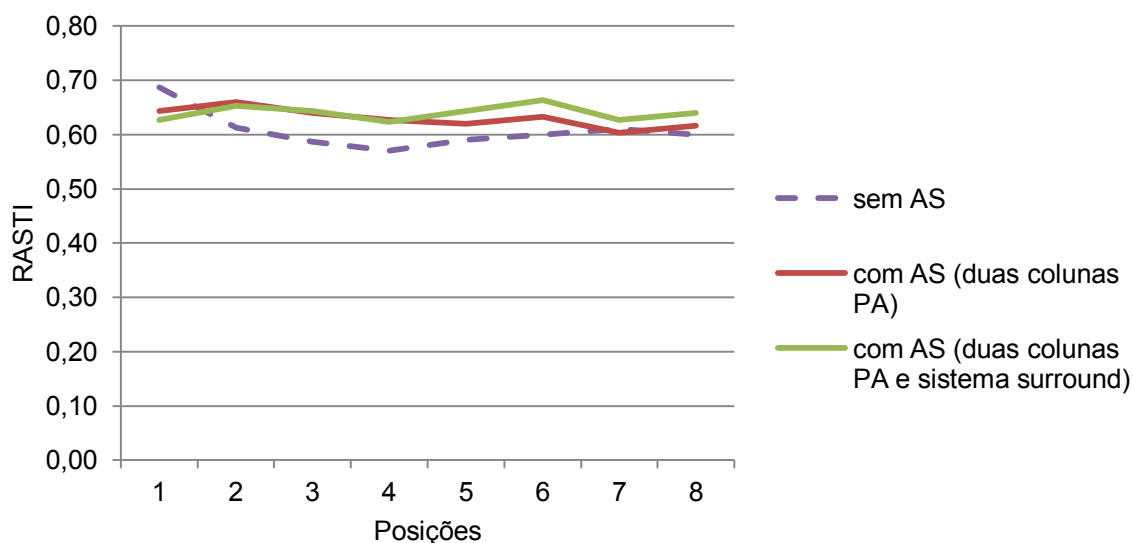


Fig. 4.30 – Curvas das médias das medições do RASTI nos diversos pontos: sem amplificação sonora (tracejado a azul) e com amplificação sonora (AS), duas colunas *public address* (PA) (a vermelho) e duas colunas PA mais sistema *surround* (a verde)

Os valores do RASTI com reforço sonoro revelam-se não muito superiores aos valores sem amplificação (com uma média de acréscimo de apenas 0,03 na utilização das colunas PA e do sistema *surround*), considerando-se desta forma, provavelmente, desnecessário este tipo de equipamentos, no que respeita à inteligibilidade.

A vantagem que estes sistemas poderão trazer ao auditório é o aumento dos níveis de pressão sonora dos oradores que, em ocasiões com um elevado número de pessoas na audiência, poderá ser necessário para ultrapassar o nível sonoro do ruído produzido pela própria audiência.

A maior diferença, embora reduzida, entre as duas opções de amplificação, surge nos pontos mais afastados do palco, pontos estes que para além de serem afastados da própria fonte sonora, estão também afastados das colunas PA, ao lado do palco.

A inteligibilidade da palavra é um parâmetro dependente de numerosas variáveis, tais como das características de absorção do espaço e da intensidade do som. Mas a inteligibilidade não é apenas influenciada por estas características, como é perceptível pelos gráficos das figuras 4.28 e 4.29: a distância à fonte sonora provoca uma considerável variação no valor do RASTI.

Na figura 4.31 representa-se, para cada uma das opções de emissão sonora, o RASTI nos pontos 1, 3 e 5, na zona central do auditório, sendo que na figura 4.32 estão representados os pontos 2, 4 e 6, na zona lateral. Cada um dos pontos está assinalado pela respetiva distância à fonte sonora, em metros.

Relativamente aos pontos da zona central verifica-se o seguinte:

- Os sistemas de amplificação sonora contribuem negativamente para a inteligibilidade da palavra na zona mais próxima do palco;
- O decréscimo da inteligibilidade com o aumento da distância acontece apenas quando a fonte sonora se encontra na zona do palco (com as colunas surround o valor do RASTI aumenta com a distância);
- Quando não existe qualquer tipo de amplificação sonora acontece um decréscimo mais acentuado do valor do RASTI, à medida que o lugar do recetor se encontra mais distante, não se verificando uma perda tão significativa de inteligibilidade na presença das colunas PA;

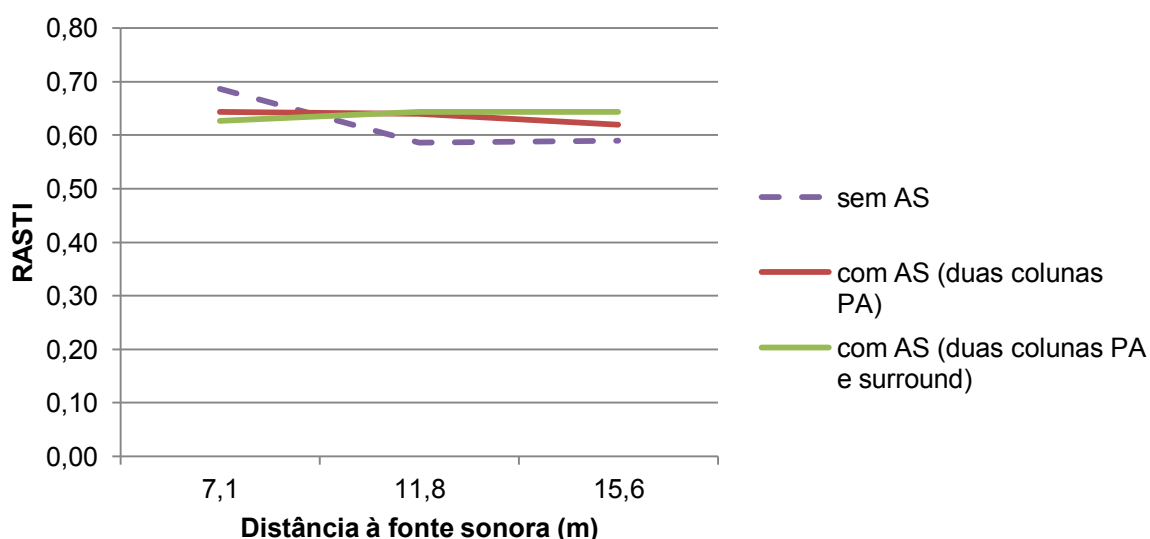


Fig. 4.31 – Variação do RASTI com a distância à fonte sonora, nos pontos 1, 3 e 5 (zona central do auditório)

Feita uma análise geral à zona central do auditório, é possível afirmar que a melhor opção numa situação de plateia cheia, será a utilização dos dois sistemas de amplificação sonora disponíveis no auditório, pois possibilitará uma inteligibilidade aproximadamente constante e ligeiramente superior na zona mais afastada do palco. Já para uma situação em que apenas os lugares da frente são suficientes para acomodar a totalidade do público, será preferível não utilizar nenhum equipamento de reforço sonoro

Analisando os pontos 2, 4 e 6, às distâncias de 8,3 m, 12,6 m e 16,3 m, respetivamente, da fonte, o comportamento em pouco se assemelha aos três pontos comentados anteriormente. Neste caso são notórios vários aspetos:

- As configurações que englobam amplificação sonora apresentam continuamente valores superiores de RASTI;
- Em todos os casos, o ponto que apresenta menor inteligibilidade é o ponto 4, a uma distância intermédia;
- A integração das colunas *surround* revela-se vantajosa apenas para o local mais afastado do palco, quando comparada com a outra opção de amplificação sonora, visto que nos restantes pontos ambas as soluções apresentam um comportamento bastante semelhante.

Ao contrário do que acontece nos pontos 1,3 e 5, quando se trata apenas da zona lateral do auditório, a amplificação sonora declara-se sempre vantajosa. Estima-se que sejam as colunas PA, ao lado do palco, as que têm efeito mais relevante no aumento do valor do RASTI nos pontos 2 e 4, pontos mais próximos desta coluna. Porém, no ponto 6, mais afastado, são as colunas *surround* que surgem como efeito amplificador do valor do RASTI (Fig. 4.32).

Presume-se que a notória diferença entre o ponto situado a meia distância e o ponto mais afastado da fonte sonora, em termos de inteligibilidade, se deva, novamente, à reduzida altura nesta última zona. O aumento do número de reflexões, que já se referiu como possível causa de um maior tempo de reverberação nessa zona do auditório, contribui, desta feita, para um aumento da inteligibilidade da palavra.

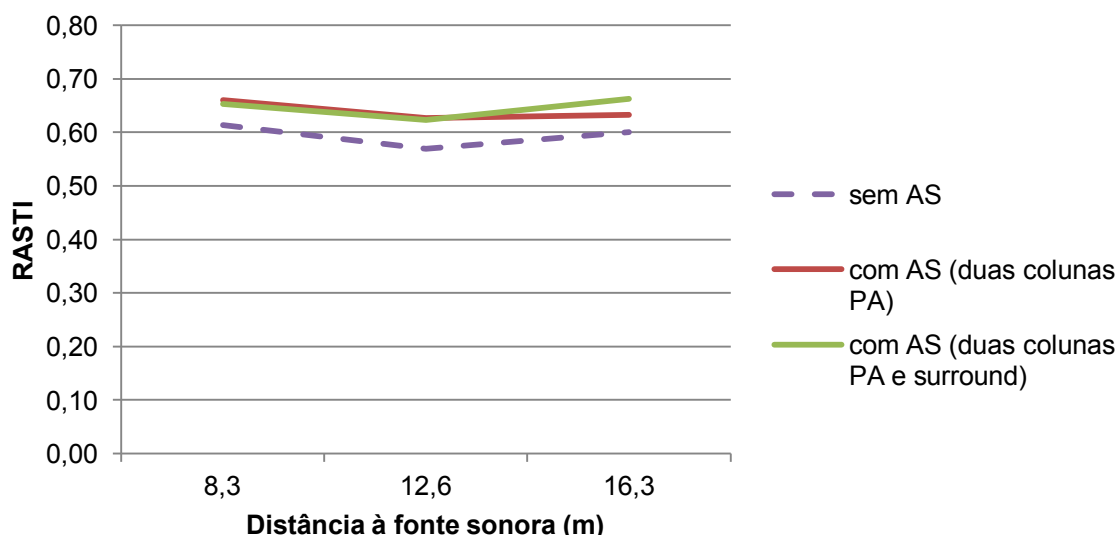


Fig. 4.32 – Variação do RASTI com a distância à fonte sonora, nos pontos 2, 4 e 6 (zona lateral do auditório)

Assentes estas diferenças entre o comportamento, em função da distância, dos locais da zona central e o dos locais da zona lateral do auditório, o anteriormente referido como mais vantajoso para pequenas audiências (a não existência de amplificação sonora) deixa de ter efeito. Constata-se que qualquer uma das duas hipóteses de amplificação sonora possibilita a ocorrência de um valor de RASTI superior a 0,60 em todos os locais estudados, atingindo-se valores inferiores se a dita amplificação não existir. No entanto, continua a sobressair o facto de as melhorias serem de ordem muito reduzida pelo que raramente serão necessárias.

Conforme explanado em 2.8.5, o valor de RASTI traduz um determinado grau de inteligibilidade da palavra, sendo que um valor pertencente ao intervalo:

- $]0,45 - 0,60]$ indica uma inteligibilidade *razoável*;
- $]0,60 - 0,75]$ revela uma inteligibilidade *boa*.

No caso em estudo, todos os valores medidos estão incluídos nestes intervalos e, por este motivo, não se apresentam os restantes intervalos de valores. A inteligibilidade da palavra no auditório da FEUP é, nas condições mais desfavoráveis, razoável sendo que quando está contemplada amplificação sonora é garantida uma boa inteligibilidade.

5

ANÁLISE A CONSIDERAÇÕES DE PROJETO

5.1. INTRODUÇÃO

Os regulamentos surgem com o intuito de proporcionar melhorias da qualidade do ambiente acústico e bem estar e saúde das populações. Em Portugal, o regulamento em vigor responsável por regular a vertente do conforto acústico no âmbito do regime da edificação é o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE) [24], o qual foi aprovado no Decreto – Lei n.º 96/2008, de 9 de junho.

À data do projeto do auditório da FEUP, o qual foi inaugurado em 2001, o Regulamento Geral sobre o Ruído [66] era o documento regulamentar em vigor, o qual não englobava requisitos mínimos para auditórios, salas de espetáculo e cinemas. Este âmbito apenas surgiu no RRAE de 2008, aquando da publicação da atualização do respetivo regulamento. Por esta razão, a existência de algum parâmetro acústico que não cumpra os requisitos mínimos do RRAE, não significa que o auditório esteja ilegal mas apenas que não está de acordo com a legislação atual.

A maior vantagem no cumprimento do regulamento é evitar a necessidade de posteriores correções acústicas devida à existência de parâmetros fora dos limites regulamentares, os quais podem originar incomodidade nos utentes do espaço em questão.

O RRAE indica valores limite regulamentares para auditórios do tempo de reverberação e do nível sonoro contínuo equivalente do ruído de fundo no interior do recinto assim como do ruído particular, L_{Aeq} , associado ao funcionamento dos equipamentos e instalações técnicas, nomeadamente de instalações de aquecimento, ventilação e ar condicionado.

Neste capítulo é feita uma análise aos valores obtidos para estes parâmetros e comparam-se com as disposições regulamentares, sendo estas encaradas como valores ideais e não como obrigações para o espaço em estudo.

5.2. ANÁLISE AO TEMPO DE REVERBERAÇÃO

O tempo de reverberação é um parâmetro acústico que só por si determina a qualidade acústica de um determinado local e o pode tornar ou não adequado para determinado tipo de atividade.

No artigo 10.º - A, n.º 1, alínea a) do RRAE está definido o tempo de reverberação máximo regulamentar, o qual corresponde à média aritmética dos valores obtidos para as bandas de frequência de oitava de 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz. Para este tipo de espaço o regulamento tem moderações

adequadas consoante o volume dos locais não se verificando, desta forma, um aumento exponencial do tempo de reverberação com o aumento do volume tal como acontece com outro tipo de espaços.

Os tempos de reverberação regulamentar, medido no auditório da FEUP, e também este último associado à incerteza (I) sugerida pelo regulamento já foram apresentados no subcapítulo 4.3.2. Os mesmos estão representados na figura 5.1. O valor registado nas medições efetuadas no auditório é, com alguma expressividade, superior ao valor regulamentar, mesmo estando este associado à incerteza de 35%. De forma a satisfazer o valor regulamentar, já reduzido da incerteza, o TR do auditório deveria ser cerca de 0,32 s inferior.

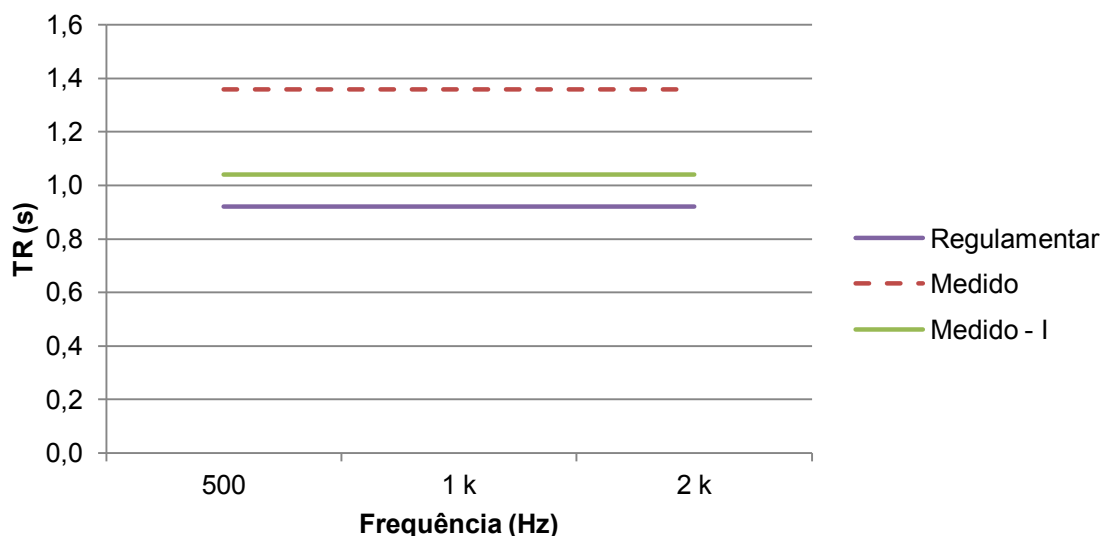


Fig. 5.1 – Tempos de reverberação, em segundos, regulamentar, medido e medido associado à incerteza sugerida pelo RRAE

Apesar do valor do TR ser superior ao limite máximo regulamentar e, portanto, não estar de acordo com o regulamento agora em vigor, não significa que seja realmente negativo. Tendo em conta que o auditório em estudo é utilizado para as mais diversas atividades, solicitando estes valores de TR tanto inferiores como superiores ao existente, pode ser vista como uma vantagem a existência de um valor intermédio. Provavelmente um tempo de reverberação igual a 1 segundo inviabilizaria o auditório de ser utilizado para espetáculos de música sinfónica ou de orquestras.

5.3. ANÁLISE AO RUÍDO DE FUNDO

Todo o ruído perceptível num determinado local na ausência de fontes sonoras é denominado por ruído de fundo ou ruído residual. Este ruído pode ser proveniente do exterior, como por exemplo do ruído de tráfego, ou ser originado pelas instalações elétricas e hidráulicas, entre outros.

A avaliação deste parâmetro é feita através do nível sonoro contínuo equivalente, L_{Aeq} em dB, um valor energético representativo de todas as bandas de frequência. Esta análise pode ser feita de forma mais detalhada, tendo em conta cada banda de frequência de oitava separadamente, através da comparação com as curvas de incomodidade. Desta forma, é possível determinar o nível de conforto existente no auditório, através de níveis de ruído máximos recomendados para as diferentes utilizações a dar ao espaço.

A análise com recurso às curvas de incomodidade foi feita no subcapítulo 4.3.3.4, tendo-se verificado que os valores do nível sonoro do ruído de fundo existente no auditório em estudo não conduzem a incomodidade nos recetores, pois apresentam valores inferiores aos recomendados (à exceção dos valores de NR que são ligeiramente superiores aos recomendados para salas de ópera e teatros). No entanto, como simplificação de algumas diferenças observadas nas sugestões dos diversos autores no quadro 4.12, considera-se apropriado ter apenas um valor de referência para cada um destes parâmetros sendo este igual a 25, tanto para o NC como para o NR. Desta feita, a totalidade dos valores medidos do nível sonoro do ruído de fundo é inferior a este valor de referência.

No que diz respeito aos parâmetros regulamentares, o nível sonoro contínuo equivalente do ruído de fundo é então o referido L_{Aeq} , em dB. O RRAE, artigo 10.º - A, n.º 3, recomenda que este nível seja inferior a 30 dB(A), sendo este assegurado pelos valores do índice de isolamento a sons aéreos, $D_{2m,nT,w}$. Vale a pena referir que a decisão de não se analisar este parâmetro no presente trabalho recaiu no facto de que a zona onde o auditório está inserido não é muito ruidosa, pelo que se estima que os ruídos exteriores não tenham influência considerável no ruído interior do auditório.

Este é medido na ausência de funcionamento de instalações técnicas e o L_{Aeq} a comparar com o valor regulamentar corresponde à média energética dos níveis sonoros contínuos equivalentes dos três pontos de medição. Os valores estão expostos no quadro 5.1, pelo que se verifica que o valor registado é menor do que o valor indicado no regulamento.

Quadro 5.1 – Valores dos níveis sonoros contínuos equivalentes do ruído de fundo, L_{Aeq} em dB

L_{Aeq}	Valor (dB)
Medido (Média energética)	26,9
Regulamentar	≤ 30

5.4. ANÁLISE AO RUÍDO DOS EQUIPAMENTOS

O ruído de fundo do auditório vê o seu valor a ser aumentado quando se colocam em funcionamento os equipamentos de climatização (AVAC). Neste subcapítulo serão analisados e comparados com os limites regulamentares os valores obtidos para os níveis sonoros contínuos equivalentes do ruído dos equipamentos para as duas situações estudadas: apenas um equipamento em funcionamento (ruído de AVAC-1) e os dois equipamentos (ruído de AVAC-2).

Mais uma vez é de realçar que os valores indicados no regulamento têm nesta análise apenas um carácter recomendável para o tipo de espaço em questão.

A média energética dos valores registados e os valores regulamentares encontram-se no quadro 5.2, sendo que nestes últimos o cinema adquire destaque pois apresenta um valor máximo superior aos restantes em 8 dB.

Quadro 5.2 – Valores dos níveis sonoros contínuos equivalentes do ruído de equipamentos (registados e regulamentares), L_{Aeq} em dB

L_{Aeq}		Valor (dB)
Regulamentar	Cinemas	$\leq$
	Restantes	≤ 0
Medido (Média energética)	AVAC-1	41,4
	AVAC-2	45,5

A avaliação feita no auditório revelou L_{Aeq} superiores aos indicados no regulamento para ambas as situações. Relativamente aos cinemas a diferença não é tão acentuada como a que acontece para os restantes tipos de espaços, no entanto, quando estão em funcionamento os dois equipamentos de climatização até para o caso dos cinemas o ruído já se torna incomodativo.

Se for tida em conta a alínea c), n.º 9, do artigo 10.º - A do RRAE, um local será considerado conforme aos requisitos acústicos aplicáveis se o valor obtido para o nível do ruído dos equipamentos, L_{Aeq} , diminuído de uma incerteza no valor de 3 dB satisfizer o limite regulamentar. Neste caso então, significa que os valores de referência a ter para o auditório serão comparados com os valores obtidos nas medições diminuídos em 3 dB relativamente aos apresentados no quadro 5.2. No entanto, considera-se que tem mais significado fazer a análise com o valor medido, pois é o valor que realmente está instalado no auditório. Os valores registados e a sua comparação com os valores recomendados pelo regulamento encontram-se no quadro 5.3.

Quadro 5.3 – Valores dos níveis sonoros contínuos equivalentes do ruído de equipamentos, L_{Aeq} em dB, associados ao fator incerteza (- 3dB ao valor registado)

L _{Aeq}			Valor (dB)	
Regulamentar			Cinemas	Restantes
			≤	≤ 0
Medido – 3 dB (Média energética)	AVAC-1	38,4	✓	✗
	AVAC-2	42,5	✗	✗

✓ – O valor obtido é inferior ao valor recomendado

✗ – O valor obtido é consideravelmente superior ao recomendado

Verifica-se que a incerteza de 3 dB permite ao auditório ter em funcionamento um dos equipamentos de AVAC e ainda assim estar apto para cinema, exatamente no limite. No entanto constata-se que todas as restantes situações se afiguram desapropriadas para uma boa qualidade acústica do auditório. O valor limite máximo regulamentar para os restantes tipo de recintos tais como, por exemplo, auditórios para a palavra, para música dos diversos estilos e para teatros, é ultrapassado em mais de 10 dB. Este facto permite estimar que o sistema de climatização, com principal destaque do AVAC-2, impõe um nível sonoro de ruído de fundo elevado o suficiente para gerar incomodidade nos intervenientes do espetáculo, diminuindo a sua qualidade. Tal como a denominação indica, os valores do regulamento são tidos como valores máximos e não como ideais pelo que, resultados superiores,

podem revelar não apenas uma ligeira incomodidade dos utentes mas também problemas a nível de saúde às pessoas expostas e à execução das atividades no local em causa.

A análise com recurso às curvas de incomodidade feita no subcapítulo 4.3.3.4 permitiu concluir que o auditório da FEUP, quando tem em funcionamento os equipamentos de climatização, revela um certo grau de incomodidade.

Considerando novamente os valores de referência de NC e NR, tendo em conta os valores apresentados para cada tipo de utilização, iguais a 25, verifica-se que em todas as medições com o sistema de AVAC em funcionamento o valor de referência é ultrapassado, em pelo menos 10 valores.

5.5. POSSÍVEIS MEDIDAS CORRETIVAS

5.5.1. ANÁLISE GERAL

Feita a caracterização do auditório da FEUP várias falhas foram detetadas nos parâmetros acústicos analisados. Considera-se o termo falha quando os valores registados não correspondem aos valores recomendados, situação que se verifica para alguns parâmetros estudados no presente trabalho:

- O tempo de reverberação revelou-se ideal apenas para as utilizações que requerem um TR intermédio, não sendo, portanto, o mais adequado para situações em que se pretenda utilizar a palavra (baixos TR) ou fazer concertos de música romântica (elevados TR), por exemplo;
- O ruído de fundo está dentro dos valores ideais, no entanto, quando se colocam em funcionamento aparelhos de climatização, os níveis de pressão sonora ultrapassam os limites considerados ideais;
- Os valores do RASTI revelaram que a inteligibilidade é boa na maioria dos locais do auditório, contudo, o sistema de reforço sonoro existente não proporciona melhorias significantes no valor do parâmetro.

5.5.2. VARIAÇÃO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO

No caso de um auditório com múltipla funcionalidade, como é o caso concreto do auditório da FEUP, a melhoria do tempo de reverberação é relativa. Neste sentido, qualquer solução de redução do TR, com consequentes melhorias nas atividades que envolvam a palavra, provocará uma diminuição da qualidade acústica do espaço para atividades que requerem um TR elevado e vice-versa.

Neste âmbito surge a acústica variável, caracteristicamente utilizada em salas de espetáculos, a qual permite alterações das condições acústicas no interior de um recinto. Existem dois modos de fazer variar o tempo de reverberação [1]:

- Variação na absorção;
- Variação no volume.

A variação da absorção pode ser conseguida através de dispositivos mecânicos ou manuais, os quais podem provocar alterações nas características acústicas das superfícies envolventes. Se o objetivo passar por reduzir o tempo de reverberação devem ser criados mecanismos que transformem zonas refletoras em zonas absorventes; por outro lado, se o objetivo for aumentar o mesmo parâmetro, transformar as zonas absorventes em zonas refletoras permitirá o aumento do TR.

No auditório da FEUP, tanto o pavimento como os assentos têm superfícies absorventes, sendo estes elementos sobre os quais não será viável fazer qualquer alteração. Outras envolventes absorventes são

as paredes revestidas com ressoadores agrupados, sendo estas as superfícies mais afastadas do palco (fonte sonora).

De forma a possibilitar um **aumento do TR**, uma solução possível passa por colocar uma cortina amovível, constituída por material refletor, sobre as superfícies referidas por último. Um aumento das reflexões será conseguido e, conseqüentemente, um aumento do tempo de reverberação. Contudo, tendo em conta a dimensão longitudinal do auditório, é provável que estas reflexões ocorram com um atraso suficiente, provocando os indesejáveis ecos.

Caso se pretenda uma **diminuição do TR**, a variação do volume, presumivelmente, seria a melhor opção. Tendo em conta a grandeza do valor do pé direito do auditório, a sua diminuição facultaria uma diminuição do volume com conseqüente diminuição do tempo de reverberação. Esta é uma opção raramente utilizada, pela sua dificuldade de aplicação.

5.5.3. DIMINUIÇÃO DO NÍVEL SONORO DO RUÍDO DOS EQUIPAMENTOS

No momento em que os equipamentos de climatização se encontram em funcionamento verifica-se um elevado, logo inconveniente, nível sonoro do ruído de fundo no auditório em estudo. Este aspeto pode ser relevante na perda de qualidade acústica do espaço, pelo que evitá-lo passaria por ser uma importante medida corretiva a aplicar.

Neste sentido, a preocupação deve começar logo na fase de projeto com um bom dimensionamento do sistema. Este deve passar pela potência do equipamento a ser instalado, tendo em conta as necessidades do local, como também pela sua localização, com cuidados e medidas a ter no momento da sua instalação (o máximo afastamento do local em estudo, isolamento das condutas, entre outros).

Os sistemas de AVAC são constituídos por inúmeros elementos, alguns dos quais originam problemas de ruído. Os elementos que se apresentam como principais fontes de ruído nestes aparelhos são os seguintes [65]:

- Unidades de tratamento de ar;
- Ventiladores;
- *Chillers*;
- Ventilo-convectores;
- Vibração das condutas;
- Etc.

Quando o excessivo ruído transmitido pelos equipamentos ao auditório não consegue ser evitado numa fase prévia à sua utilização, tal como acontece no caso em estudo, possíveis medidas corretivas podem ser tomadas:

- Acréscimo de absorção sonora do revestimento interior do recinto com conseqüente redução do campo reverberante criado pelo ruído gerado pelos equipamentos;
- Isolamento do equipamento às vibrações na sua base e nas ligações a condutas;
- Instalação de atenuadores sonoros nas entradas e saídas de ar dos equipamentos.

Sendo possível aplicar estas medidas, será previsível uma redução do nível sonoro do ruído no interior do auditório, um dos parâmetros determinantes da sua qualidade acústica.

5.5.4. AUMENTO DO GRAU DE INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA (AUMENTO DO RASTI)

Os valores do RASTI registados nas medições efetuadas revelaram uma inteligibilidade boa no auditório da FEUP. No entanto, verifica-se que os sistemas de amplificação sonora existentes não introduzem um aumento significativo da inteligibilidade.

Aumentar a inteligibilidade no caso em estudo, sem a utilização de reforço sonoro, pode passar pela redução do tempo de reverberação (caso já tratado anteriormente). Outra hipótese será a modificação do sistema de amplificação sonora existente. Este é composto por dois equipamentos diferentes: as duas colunas *public address*, localizadas no palco, e as colunas *surround*, ao longo das paredes laterais do auditório.

A utilização de sistemas de amplificação sonora pode causar uma falsa localização espacial da origem do som, sendo esta uma característica que pode ter influência negativa na inteligibilidade da palavra. O intervalo de tempo ao longo do qual o recetor vai recebendo o som é alargado, pois as colunas *surround* geralmente estão mais próximas do recetor e o som por si emitido alcança a pessoa antes do próprio som do orador. Este aumento de duração da propagação do som pode ter um efeito no valor do RASTI semelhante a um aumento do tempo de reverberação, ou seja, uma redução da inteligibilidade da palavra.

Uma possível solução para contornar este problema passa por evitar a referida falsa localização através da introdução de *delays* no sistema de amplificação sonora. Existem sistemas programados desta forma, sendo que, um exemplo de um sistema com esta capacidade é o *Delta Stereophony System* (DSS). Através da distância da fonte sonora ao recetor é possível determinar o tempo que o som demora a atingi-lo, sendo que o objetivo dos *delays* no som do sistema é que o seu som alcance o recetor no mesmo momento [1]. De forma a atingir este objetivo, uma análise complexa é necessária, conjugando o valor do respetivo *delay* com a percentagem de lugares beneficiados, sendo que o valor preferencial será aquele para o qual se atinge uma maior inteligibilidade num maior número de lugares.

Espera-se, com esta modificação no sistema de amplificação sonora, um aumento do valor do RASTI, relativamente à situação sem este sistema, mais significativo do que o que é conseguido com o sistema existente.

6

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1. CONCLUSÕES

Com o objetivo de caracterizar acusticamente o auditório nobre da FEUP foi efetuada uma avaliação de diversos parâmetros acústicos objetivos, de forma a determinar a qualidade acústica do espaço.

A análise ao tempo de reverberação não foi feita em termos legais, dado que no momento do projeto não existia regulamentação referente a auditórios. Os valores obtidos foram comparados com valores recomendados por diversos autores e com o valor retirado do RRAE, atuando este como um valor ideal (não legal).

O auditório em estudo é um espaço que recebe atividades com âmbitos bastante distintos, pelo que é denominado um auditório com fins múltiplos. Dado que não possui elementos que permitam variar a sua acústica, é natural que o valor do tempo de reverberação seja adequado para algumas atividades e menos adequado para outras. A média dos valores registados para as frequências de 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz, igual a 1,42 segundos, surge nos limites dos valores aceitáveis para atividades assentes na palavra (para alguns autores ultrapassa o aceitável) e revela-se inadequado para as atividades musicais que requerem um tempo de reverberação elevado, para a boa fruição do som. O facto de o tempo de reverberação no auditório não ser muito reduzido, condição que seria mais favorável para a inteligibilidade da palavra, tornaria, provavelmente, inviável a prática de atividades que exigem o oposto.

No estudo efetuado, o nível de pressão sonora do ruído de fundo foi registado em três configurações diferentes. Foi possível concluir que o ruído de fundo existente no auditório não é prejudicial para comodidade dos ouvintes, situação que se inverteu quando se colocou em funcionamento o sistema de climatização, composto por dois equipamentos. O nível de pressão sonora aumentou em cerca de 14 dB(A) quando se colocou um dos equipamentos em funcionamento, tendo sido este acréscimo, em média, de 19 dB(A) quando se ligaram os dois equipamentos em simultâneo. A análise efetuada com recurso às curvas de incomodidade revelou que, na presença destes equipamentos, é gerada alguma incomodidade para a audiência.

Foi também avaliada a inteligibilidade da palavra através da medição do parâmetro acústico RASTI. Para este estudo foram realizadas medições para três configurações, uma sem sistema de reforço acústico e outras duas com a utilização deste sistema. O auditório revelou um valor médio do RASTI igual a 0,61, correspondente a uma inteligibilidade boa. A atuação do sistema de amplificação sonora, composto por duas colunas PA e por uma série de colunas *surround*, proporcionou um acréscimo médio no valor deste parâmetro de 0,03. Este acréscimo surpreende pelo seu reduzido valor, sendo

praticamente desnecessária a sua utilização pois, caso a audiência esteja silenciosa, a utilização destes sistemas não impulsionará melhorias significativas.

No quadro 6.1 encontram-se compilados os resultados dos principais parâmetros acústicos medidos no auditório da FEUP.

Quadro 6.1 – Resumo dos principais parâmetros acústicos do auditório da FEUP

Parâmetro		Obtido	Recomendado	Avaliação
TR (s)		1,36	$\leq 0,92$	✖
LAeq (dB)	RF	26,9		✓
	AVAC-1	41,4	≤ 30	✖
	AVAC-2	45,5		✖
RASTI	sem AS	0,61		✓
	com colunas PA	0,63	$\geq 0,60$	✓
	com colunas PA e surround	0,64		✓
NC	RF	20		✓
	AVAC-1	36	≤ 2	✖
	AVAC-2	40		✖
NR	RF	23		✓
	AVAC-1	38	≤ 2	✖
	AVAC-2	42		✖

✓ – o resultado corresponde aos valores recomendados

✖ – o resultado não se apresenta adequado

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Perante os valores obtidos, foi possível concluir que o auditório não apresenta um comportamento perfeito acusticamente, pelo que considerar a aplicação de algumas soluções de melhoria seria interessante.

Quanto à adequação do tempo de reverberação, seria interessante aprofundar um estudo de equipamentos e materiais que permitam variar a acústica do auditório, de forma a atingir condições adequadas para as diversas atividades realizadas no recinto.

Por forma a reduzir o ruído gerado pelo sistema de climatização, o qual deve gerar incomodidade ao ouvinte, reduzindo a qualidade da sua receção sonora, poderiam ser analisadas as condições, tanto de funcionamento como de suporte, dos dois equipamentos AVAC existentes no auditório da FEUP.

Sugere-se, de forma a produzir um aumento significativo da inteligibilidade da palavra, por parte do sistema de amplificação sonora, uma análise complexa à possibilidade de introduzir *delays* em algumas colunas *surround*, determinando os seus valores e as colunas a aplicá-los.

Em desenvolvimentos futuros, seria interessante efetuar inquéritos de avaliação subjetiva aos utilizadores do auditório, com o objetivo de analisar o nível de incómodo sentido pela utilização multifuncional do recinto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Carvalho, A. P. – *Acústica Ambiental e de Edifícios*, Edição 8.1, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2011
- [2] Patrício, J. – *Acústica nos Edifícios*, 2ª edição, Lisboa, 2004
- [3] Bruneau, M. – *Fundamentals of Acoustics*, 2ª edição, Londres, 2006
- [4] The Sound of Music – http://www.antonine-education.co.uk/Salters/MUS/Making_Sounds.htm, acedido em Março de 2012
- [5] Barron, M. – *Auditorium Acoustics and Architectural Design*, 2ª edição, Spon Press, Taylor & Francis Group, 2010
- [6] Everest, F. A. – *The Master Handbook of Acoustics*, 4ª Edição, The McGraw-Hill Companies, Nova Iorque, 2001
- [7] Kuttruff, H. – *Acoustics – An introduction*, 2ª edição, Taylor & Francis, 2007
- [8] Silva, P. M. – *Acústica de Edifícios*, Informação técnica de Edifícios ITE 8, LNEC, Lisboa, 1978
- [9] Almeida, in Lança, P. – *Física dos Edifícios*, Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Beja, Beja, 2007
- [10] Acoustics – http://www.engineeringtoolbox.com/acoustics-noise-decibels-t_27.html, acedido em Março de 2012
- [11] Comportamento do som em salas – http://www2.unochapeco.edu.br/~fernandes/disciplinas_leandro/conf_amb_II/apostila/parte-2.pdf, acedido em Março de 2012
- [12] Lazzarini, V. E. P. – *Elementos de Acústica*, Music Department, National University of Ireland, Maynooth, 1998
- [13] What gives a studio its sound? – <http://lossenderosstudio.com/sound.php>, acedido em Março de 2012
- [14] Damaske, P. – *Acoustics and Hearing*, Springer, Berlim, 2008
- [15] Watson, F. R. – *Acoustics of Auditoriums*, University of Illinois, Urbana, EUA, 1914
- [16] Beranek, L. L. – *Acoustics*, Acoustical Society of America, Nova Iorque, 1996
- [17] Isolação e absorção – http://chracustica.zip.net/arch2008-08-24_2008-08-30.html, acedido em Março de 2012
- [18] Vigran, T. E. – *Building Acoustics*, 2ª Edição, Taylor & Francis, 2008
- [19] Masini, H. F.; Teodoro, E. B. – *Medição Automática do Coeficiente de Absorção Acústica de Materiais*, Universidade Federal de Uberlândia, 2011
- [20] Bistafa, S.R.; A.R. – *Acústica Aplicada ao Controle de Ruído*, 1ª Edição, Edgard Blücher, 2006
- [21] NP EN ISO 354:2007 – Acústica. Medição da absorção sonora em câmara reverberante
- [22] Portela, M. – *Materiais Acústicos - Conceitos para a acústica arquitetónica*, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil, 2011
- [23] Moreira, A. – *Acústica nos Edifícios*, Escola Superior de Tecnologia de Tomar, 2011

- [24] *Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios*, Decreto-Lei n.º 96/2008 de 9 de Junho, Diário da República, 2008
- [25] Long, M. – *Architectural Acoustics*, Elsevier Academic Press, Oxford, 2006
- [26] Cavanaugh, W. J.; Wilkes, J. – *Architectural Acoustics: Principles and Practice*. 2ª edição, J.W. & Sons, Inc., 1999
- [27] Calixto, A. – *Vibração, som e luz*, Conceitos Fundamentais, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011
- [28] Beranek, L. L. – *Music, Acoustics and Architecture*, John Wiley & Sons, Inc, EUA, 1962
- [29] Beranek, L. L. – *Concert and Opera Halls: How They Sound*, Woodbury, Acoustical Society of America, Nova Iorque, 1996
- [30] Soluções - Acústica – <http://www.imperialum.com>, acessado em Março de 2012
- [31] NP EN ISO 717-1:2009 – Medição *in situ* do isolamento sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos e determinação do índice de isolamento sonoro
- [32] NP EN ISO 717-2:2009 – Medição *in situ* do isolamento sonoro a sons de percussão sobre pavimentos e determinação do índice de isolamento sonoro
- [33] Silva, P. M. – *Projecto de condicionamento acústico de edificios*, LNEC, Lisboa, 2006
- [34] Concert Hall Acoustics: Art and Science, http://www.acoustics.salford.ac.uk/acoustics_info/concert_hall_acoustics/?content=index, acessado em Março de 2012
- [35] Losso, M. A. F. – *Qualidade acústica de edificações escolares em Santa Catarina: avaliação e elaboração de diretrizes para projeto e implantação*, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003
- [36] Penedo, C. – *Ruído de equipamentos electromecânicos em espaços ocupados*, Acústica, Universidade de Coimbra, 2008
- [37] Fernandez, S.; Feijóo, S. – *Acoustic cues to perception of vowel quality*, Beijing, China, 2000
- [38] Bradley, J. S., *et al.* – *On the combined effects of signal-to-noise ratio and room acoustics on speech intelligibility*, Journal of the Acoustical Society of America, 106 (4), pp 1820-1828, 1999
- [39] Larm, P.; Hongisto, V. – *Experimental comparison between speech transmission index, rapid speech transmission index, and speech intelligibility index*, Journal of the Acoustical Society of America, 119 (2), pp. 1106-1117, Fevereiro, 2006
- [40] Simões, F. – *Acústica Arquitectónica*, PROCEL EDIFICA – Eficiência energética em edificações, Rio de Janeiro, 2011
- [41] Isbert, A. C. – *Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos*, Edicions UPC, Universidad Politécnica de Catalunya, 1998
- [42] Danckwardt, V. P. – *O edifício teatral. Resultado edificado da relação palco-platéia*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001
- [43] Chourmouziadou, K.; Kang, J. - *Acoustic evolution of ancient Greek and Roman theatres*, Applied Acoustics 69, 2008
- [44] Pollio, M. V. – *The ten books on architecture*, Harvard University Press, Londres, 1914

- [45] Souza, L. C. L.; Almeida, M. G.; Bragança, L. – *Bê-a-bá da acústica arquitetónica: ouvindo a arquitetura*, São Paulo: Câmara Brasileira do livro, 2003
- [46] Sabine, W. C. – *Collected papers on acoustics*, Harvard University, Cambridge, 1922
- [47] Corbioli, N. – *Teatro não é auditório*, Revista ProjetoDesign, São Paulo, n. 266, Abril, 2002
- [48] Beranek, L. – *Music, acoustics and architecture*, John Wiley, Nova Iorque, 1962
- [49] Langhans, C. F. – *Über Theater oder Bemerkungen über Katakustik*, Gottfried Haydn, Berlim, 1810
- [50] Izenour, G. C. – *Theater design*, McGraw-Hill, Nova Iorque, 1977
- [51] Scott Russell, J. – *Elementary considerations of some principles in the construction of buildings designed to accommodate spectators and auditors*, Edinburgh New Philosophical Journal, n.º 27, 1838
- [52] Bagenal, H.; Wood, A. – *Planning for good acoustics*, Methuen, Londres, 1931
- [53] Knudsen, V. O. – *Architectural acoustics*, John Wiley, Nova Iorque, 1932
- [54] Watson, F.R. – *Acoustics of building including acoustics of auditoriums and soundproofing of rooms*, JohnWiley & Sons, Londres, 1948
- [55] Mehta, M.; Johnson, J.; Rocafort, J. – *Architectural Acoustics: principles and design*, Courier Kendallville Inc., Nova Jersey, 1999
- [56] Saunders, G. – *A treatise on theatres*, Londres, 1790
- [57] Silva, P. M. – *Acústica de auditórios para música*, Lisboa, 1975
- [58] Nickson, A. F. W.; Muncey, R. W. – *The audience and room acoustics*, Elsevier, Londres, 1961
- [59] Kuhl, W. – *Ueber Versuche zur Ermittlung der Gunstigsten Nachhallzeit Grosser Musikstudios*, Genebra, 1954
- [60] Dare, T. – *Multipurpose Auditorium*, Physics 498 POM, 2005
- [61] Google Earth, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, <http://www.google.com/earth/index.html>, acedido em Abril de 2012
- [62] Imagem, Comunicação e Cooperação, Serviços de – *Regulamento de Cedência e Utilização do Auditório da FEUP*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2005
- [63] Secção de Eventos da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2012
- [64] FEUP - <http://www.coolheat.pt/gallery.php>, acedido em Abril de 2012
- [65] Fernandes, F. – *Análise e Caracterização do Ruído de Equipamentos AVAC em Edifícios Públicos*, Tese MIEC, FEUP, 2010
- [66] *Regulamento Geral sobre o Ruído*, Decreto-Lei n.º 251/87 de 24 de Junho, 1987